

ANÁLISE DE DESEMPENHO EM REDE WIRELESS DE AMBIENTE INSTITUCIONAL

PERFORMANCE ANALYSIS IN A WIRELESS NETWORK FOR INSTITUTIONAL ENVIRONMENT

Felipe Silva PICCHI
felipepicchi@gmail.com

Bacharelado em Ciência da Computação
Centro Universitário Padre Anchieta

Prof. Dr. Carlos Eduardo CÂMARA
Ciência da Computação
Centro Universitário Padre Anchieta – Jundiaí – SP
ccamara@anchieta.br, dinhocamara@gmail.com

RESUMO

A demanda por conectividade em nossa sociedade está em constante crescimento. As redes *wireless* passaram a ser utilizadas como *Tier 1* em diversos locais do mundo, principalmente com as demandas do setor industrial, que utiliza sistemas de IoT e conceitos de Indústria 4.0, do setor educacional, com a implementação de ensino a distância, e do setor empresarial, que visa implementação de infraestrutura eficiente e de baixo custo. Essa necessidade de redes *wireless* exige certos padrões de qualidade, capacidade e disponibilidade, prezando pela boa comunicação. Este artigo visa analisar o desempenho, pontos fortes e fracos, e compreender o funcionamento de uma rede *wireless* em ambiente institucional.

Palavras-Chave

Wireless, conectividade, redes, *wi-fi*,

ABSTRACT

The demand for connectivity in our society is constantly growing. The wireless networks are being used as Tier 1 in various locations around the world, especially with the demands of industrial sector, which uses IoT systems and Industry 4.0 concepts, the

educational sector, with the implementation of long-distance learning, and the business sector, which aims to implement efficient and low-cost infrastructure. All this need on wireless networks requires certain standards of quality, capacity and availability, always looking for good communication. This article aims to analyze the performance, strengths and weaknesses, and to understand the behavior of a wireless network in an institutional environment.

Keywords

Wireless, connectivity, networks, wi-fi

1. INTRODUÇÃO

O presente trabalho visa estudo, análise e avaliação de desempenho de uma rede *wireless*, num cenário real, em uma escola de nível superior situada em Jundiaí, São Paulo, através de testes, para fins didáticos, permitindo compreender e avaliar o comportamento, a Qualidade de Serviço (QoS) e a experiência do usuário. Para realizar as propostas acima, foram realizados testes utilizando ferramentas de análise de espectro aliadas a um *software* para identificar e auxiliar na análise dos resultados, determinando os pontos fortes e fracos e apontando os principais motivos que determinam o seu comportamento na utilização dos recursos pelos usuários.

Para esta atividade, foi utilizado uma solução de diagnóstico de redes wireless, que é um conjunto composto por um *software* de análise e um sensor dedicado de redes *wireless* da companhia Ekahau. A versão do *software* é a Ekahau Pro 10.2 e o sensor de análise de espectro é denominado Ekahau Sidekick, o qual é detalhado posteriormente.

Durante a análise e captação de dados, foram realizadas diversas medições nos quatro pisos que compõem o prédio do cenário proposto avaliado. A estrutura dos andares podem ser observadas na figura 09. O conjunto da Ekahau, após a realização dos testes, fornece o mapeamento do espectro Wi-Fi, permitindo a avaliação de diversos pontos e itens importantes. Essa captação de dados permite a obtenção de diversos tipos de mapas de cobertura, mostrando a visualização e análises do estado atual da rede e suas características, o que permite avaliar um conjunto de problemas que impactam a experiência de utilização da mesma.

Vale salientar que as medições foram realizadas enquanto o prédio não estava populado, devido à impossibilidade de interromper as aulas para a realização do estudo.

1.1 OBJETIVOS

O objetivo principal deste trabalho é estudar, compreender e apresentar um estudo e avaliação técnica da uma rede *wireless* real, obtidos através de testes realizados com equipamento e *software* da Ekahau, realizado em um prédio com 4 andares e 84 salas.

Pretende-se justificar, através do presente artigo, a importância de um estudo e levantamento de requisitos da área a ser coberta por uma rede *wireless*, considerando as características determinantes do padrão IEEE 802.11 e, que devem ser aplicadas durante a projeção e instalação desse tipo de solução. O estudo realizado neste trabalho, tem por objetivo, utilizar conceitos básicos de rede *wireless* estudados no desenvolvimento do artigo, e explicando determinados comportamentos da rede através de análises dos testes realizados.

Através dos resultados obtidos, são apresentadas conclusões sobre o funcionamento da rede wi-fi, com justificativas técnicas, baseadas nos conceitos e características da solução e do padrão IEEE 802.11 utilizados, para apresentar os resultados do comportamento de uma rede real.

2. SOLUÇÃO EKAHAU®

O sensor Ekahau Sidekick foi desenvolvido para se tornar uma ferramenta completa de análise de espectro e concorrer com as atuais soluções do mercado. A seguir serão apresentadas as características de *hardware* do sensor para melhor compreensão de seu funcionamento. [3]

Wi-Fi

-Padrões suportados: 802.11 a/b/g/n/ac/ax; [4]

-Bandas suportadas: 2.4 GHz / 5 GHz;

-Variação dinâmica (potência): -20 a 95 dBm;

Análise de espectro

-Faixas de operação do padrão IEEE 802.11n/ac: 2400-2495 MHz (2.4GHz) na banda (n) e 5000 – 5950 MHz (5GHz) na banda (a);

-Velocidade de análise (tempo de ciclo): 20 vezes por segundo – 20Hz;

Outros

-Armazenamento: 128 GB SSD;

-Bateria: 10.8V 6400 mAh.

O *software Ekahau Site Survey* foi desenvolvido para analisar adaptadores (Access Points (AP) ou Antenas Base) de rede sem fio, utilizando-os para realizar medições de espectro no ambiente. O funcionamento do *software* não é limitado ao conjunto (*Ekahau Site Survey* e *Ekahau Sidekick*), porém a precisão dos resultados pode não ser tão eficiente caso seja utilizado um adaptador diferente.

A licença do *software* está atrelada ao adaptador wireless, tornando necessário conectar o adaptador licenciado através da interface USB (no caso do *Sidekick*) ou bastando iniciar o *software* caso a licença esteja atrelada ao adaptador *wireless onboard* do computador.

O *software* estabelece comunicação com o adaptador e permite algumas visualizações em tempo real em ambas as faixas de frequências, como análise de espectro, canais alocados, distribuição de APs e nível de sinal de cada AP medido, tanto em gráfico quanto em lista. A Figura 01 apresenta uma das interfaces do software num dos momentos de obtenção de medidas durante os testes:

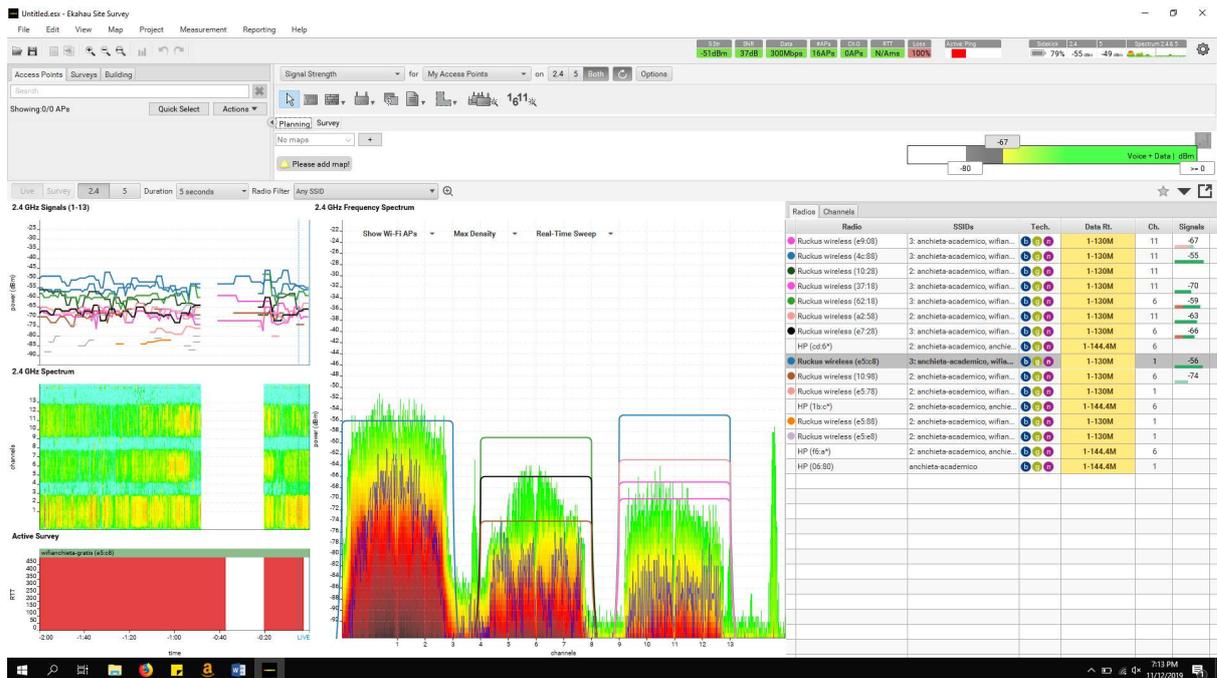


Figura 01: Tela inicial do software, na aba de análise de espectro em tempo real

3. CONCEITOS BÁSICOS

Neste estudo foram envolvidos os padrões IEEE 802.11n/ac, que são os padrões predominantemente utilizados no ambiente abordado. Ambos os padrões possuem diversas características específicas. A seguir são apresentados algumas de suas características principais.

-IEEE 802.11n: [5]

“O padrão 802.11n introduziu a possibilidade de utilização de canais com 40 MHz de banda, permitindo praticamente duplicar as taxas de transferência por canal. Mais do que isto, permite que 2 canais adjacentes (sem superposição) de 20 MHz sejam combinados para formar um único canal de 40 MHz. (...) Em relação a banda de 2,4 GHz, isto não representa um ganho significativo porquanto podem existir apenas 3 canais de 20 MHz que não se superpõem, mas em relação a banda de 5GHz os resultados são bastante satisfatórios. (...)

O padrão 802.11a/g atinge uma taxa total de 54 Mbps, dividindo cada canal de 20 MHz em 52 subportadoras com capacidade de até 1,038 Mbps cada. No padrão 802.11n o

mesmo canal de 20 MHz é dividido em 56 portadoras com a mesma taxa individual, aumentando a taxa de transferência total em cerca de 7,7%. Utilizando canais de 40 MHz, pode-se acomodar até 114 subportadoras, representando um incremento de 119% na taxa de transferência em relação aos padrões 802.11a/g. (...)

Nos sistemas legados 802.11, o equipamento de rádio opera uma antena de cada vez, e recebe apenas sobre uma antena de cada vez, geralmente a mesma antena. Apesar de que frequentemente existam 2 antenas, a entrada de rádio e a saída de rádio são alternadas de modo que somente uma delas está ativa de cada vez. O padrão IEEE 802.11n permite que múltiplas antenas sejam utilizadas simultaneamente quer pelas funções de transmissão, quer pelas funções de recepção ou por ambas.” [14]

-IEEE 802.11ac: [6]

O padrão 802.11ac até a data de escrita deste trabalho, é um padrão recente que se encontra efetivamente em produção nos mais diversos ambientes. É aplicado em soluções de rede wireless que operam na faixa de frequência de 5GHz. Nessa faixa de frequência, os projetistas de redes wireless podem usufruir de larguras de banda de até 160MHz, que acaba sendo 4 vezes maior que a banda suportada pelo padrão 802.11n (40MHz). Além disso, o padrão 802.11ac utiliza técnica de transmissão *MU-MIMO* (*multiple users – multiple input multiple output*), é um método de gerenciamento de distribuição de sinal denominado *beamforming*, definido a seguir:

“O beamforming é uma técnica que os APs usam para concentrar seus sinais de rádio na direção dos clientes com os quais estão se comunicando, a fim de ganhar melhor capacidade e taxa de transferência.” -Ruckus Wireless (<https://www.ruckuswireless.com/pt-br/rucktionary/beamforming>). Acesso em 11/11/2019. [8]

Em outras palavras, *beamforming* é uma técnica onde um array ou vetor de duas ou mais antenas são direcionadas a fim de transmitir sinais mais fortes em direções específicas ao invés de distribuir sinal de maneira uniforme dentro de uma área circular, ou seja, omnidirecional. Essa técnica é muito utilizada em diversas tecnologias, como radares, sonares e em telecomunicações (*Wi-Fi* e *5G*). Nessa técnica, um *array* de duas

ou mais antenas independentes provocam variações de fase e amplitude com o objetivo de concentrar energia na área desejada.[7]

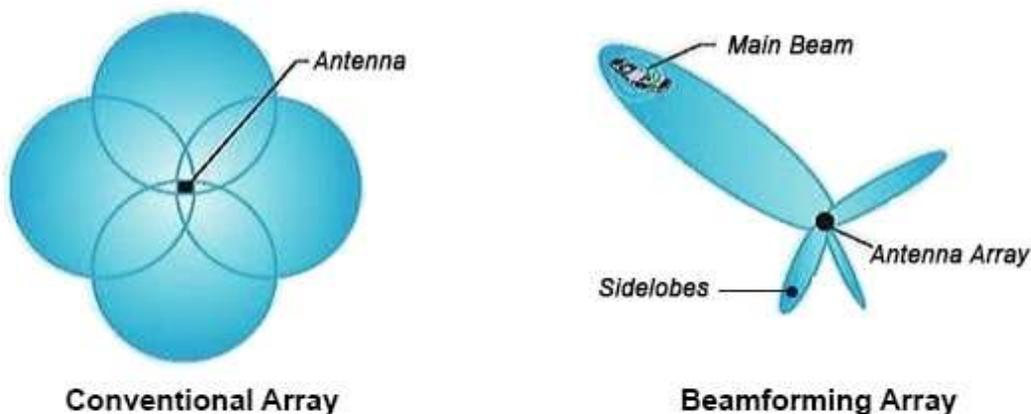


Figura 02: cobertura de uma antena convencional (a) e utilizando a técnica de *beamforming* (b) [7]

PADRÃO	LARGURA DE BANDA(MHz)
802.11b	5
802.11a/g	20
802.11n	20 / 40
802.11ac (fase 1)	80

Tabela 01 – largura de banda das versões mais comuns do IEEE 802.11 [9]

PADRÃO	Técnicas de Modulação de dados utilizada na transmissão
802.11b	DSSS, modulação BPSK/QPSK
802.11a/g	OFDM (52 subportadoras), modulação QAM64
802.11n	OFDM (108 subportadoras), modulação QAM64, MIMO 4x4
802.11ac	OFDM (234, 2x234 subportadoras), modulação QAM256, MIMO 8x8

Tabela 02 : modulações utilizadas nas versões comuns do padrão IEEE 802.11 [9]

A seguir estão interpretadas brevemente as técnicas de modulação apresentadas na Tabela 02:

PSK: modulação por mudança de fase. A transição entre bits 0 e 1 ocorre pela alteração do grau angular da fase da onda (BPSK/QPSK) [12]

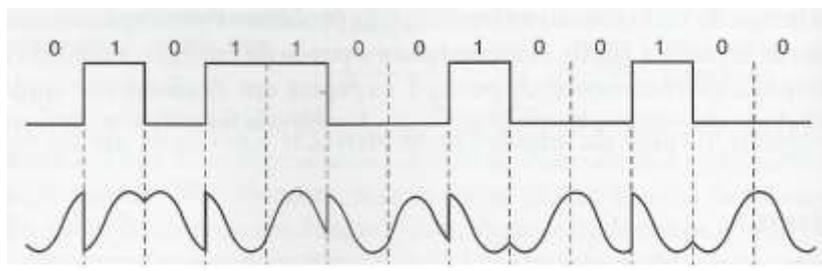


Figura 03: Modulação BPSK [12]

OFDM: transmissão através de portadoras ortogonais por entrelaçamento, evitando interferências e possível perda de dados. Implementa correção de erro. [12]

QAM: valores mapeados em diagrama de fase e quadratura. Cada valor possui uma distância do ponto de origem, representando sua amplitude. O número representa a quantidade de bits (16, 64, 256...) [12]

MIMO: *Multiple Input & Multiple Output*, é a capacidade da rede de enviar ou receber fluxo de dados simultâneos com a presença de duas ou mais antenas por dispositivo. [13]

3.1 ANÁLISE DE COBERTURA DE SINAL

A potência do sinal, que determina a área de cobertura, é um dos principais requisitos básicos de uma rede *wireless*. Uma diminuição da área de cobertura está diretamente relacionada tanto a conexões instáveis e insatisfatórias, quanto a diversos fatores não analisados corretamente em seu projeto, causando, como perda mais perceptível, baixas taxas de transferência de dados. Isso pode estar diretamente relacionado, também, com a quantidade de APs, sua distribuição no espaço e na configuração de potência, o mapeamento adequado da escolha dos canais para evitar interferências de co-canal e levantamento de outros APs próximos de outras redes distintas. Além disso, também é válido avaliar outros dispositivos que operam nesta mesma faixa de frequência ou em faixas semelhantes, na área em estudo, como microondas e telefones sem fio.

A configuração da potência também deve ser estudada cautelosamente, pois nem sempre a potência máxima é a melhor escolha, podendo resultar em interferência de co-canal (assunto tratado nas próximas seções).

Um dos principais fatores de grande impacto na distribuição de sinal das redes wireless são as barreiras presentes no ambiente, como portas, paredes e divisórias. Diversos estudos foram realizados até a presente data com o objetivo de analisar os níveis de atenuação de sinal em relação a diferentes materiais presentes no ambiente. Na tabela abaixo, pode-se ter uma ideia do impacto que alguns materiais acabam causando na propagação do sinal. [11]

Tipo de barreira	Potencial de interferência	Perda de Sinal(dBm)
Madeira	Baixo	-50 para -54
Vidro	Baixo	-50 para -53
Mármore	Médio	-50 para -62
Parede com tubulação de agua	Médio	-50 para -64
Parede de tijolo	Médio	-50 para -60
Metal	Alto	-50 para -85

Tabela 03: estudo de atenuação de sinal de rede wireless em diferentes materiais [11]

3.2 RELAÇÃO SINAL-RUÍDO (SNR)

A relação sinal-ruído (SNR) indica a relação entre a potência do sinal e a potência do ruído sobreposto ao sinal. Quanto maior for esta relação, menor é o efeito do ruído sobre este sinal, e também a interferência co-canal, dentre outros fatores. O sinal deve ser mais forte que o ruído para que a transferência de dados seja possível. Se o ruído é mais forte que o sinal, o usuário pode enfrentar, ocasionalmente, perda de comunicação.

A relação sinal-ruído em dB é dada pela equação (1):

$$SNR_{dB} = 10\log_{10}(P_{sinal}/P_{ruído}) = 10\log_{10}(P_{sinal}) - 10\log_{10}(P_{ruído}) = P_{sinal-dB} - P_{ruído-dB}$$

Equação 01: equação de cálculo de SNR

Quando a relação sinal-ruído (SNR) apresenta níveis insatisfatórios e prejudica a comunicação entre o AP e o cliente e, a retransmissão se torna necessária. Quanto mais retransmissões são necessárias, mais o tráfego é afetado, tornando os canais sempre mais ocupados e prejudicando a transferência de dados. [15]

Diversos fatores podem prejudicar o nível de SNR, dentre eles: forno micro-ondas, por operar em frequência próxima a 2.4GHz, porém com potência centenas de vezes mais forte (como 1000W, por exemplo); telefones sem fio que utilizam faixa de frequência similar; outros APs operando na mesma frequência e, eventualmente, no mesmo canal (normalmente em configuração de fábrica).[15]

Nas redes wireless, diversas soluções podem ser adotadas visando o aumento do SNR e estabilização da rede. A instalação de mais APs operando em potências menores e com canais adequadamente distribuídos na área de cobertura para este ambiente, é um bom exemplo. Dessa forma é possível manter a cobertura de sinal no ambiente sem que a potência de um AP atinja células de cobertura de APs vizinhos, mitigando o impacto na relação sinal-ruído. [15]

3.3 INTERFERÊNCIA DE CO-CANAL

Quando dois ou mais APs, configurados no mesmo canal, independente da faixa de frequência (2.4GHz / 5GHz) em que operam, estão fisicamente posicionados próximos um do outro, ocorre o fenômeno da interferência de co-canal. O padrão 802.11 é baseado na técnica de CSMA (*Carrier Sense Multiple Access – Acesso Múltiplo com Detecção de Portadora*) que segue o paradigma *listen-before-talk (LBT)*. Isso obriga um dispositivo a transmitir dados apenas se o canal estiver livre. A interferência co-canal pode confundir o mecanismo de detecção de portadora, dando a entender que o canal está ocupado e, conseqüentemente, impedindo a utilização do mesmo.[14]

Através da figura 04 é possível compreender a sobreposição de canais nas redes que operam em 2.4GHz, já que nessa frequência o fenômeno é muito frequente. Deve-se levar em conta que podem existir outros sistemas transmitindo na mesma faixa de 2.4GHz e, dependendo da recorrência, o impacto na rede pode ser extremamente crítico.

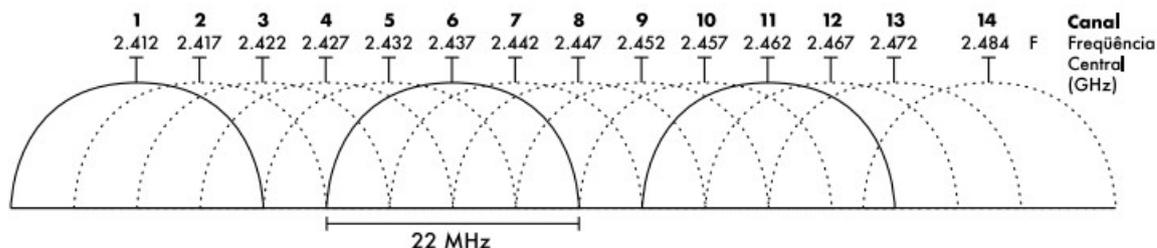


Figura 04: representação gráfica da distribuição de canais em rede 2.4GHz

Em um projeto de rede wireless, são normalmente considerados os canais ortogonais 1, 6 e 11 ou 1, 5, 9 e 13 na faixa de frequência 2.4GHz. Estes canais operam com largura entre 20 e 22MHz de banda e, sendo escolhidos desta forma, evita-se que possuam algum canal sobreposto, mitigando a interferência. [2][14]

A faixa de frequência de 5GHz possui menos problemas de sobreposição de canal devido à sua maior largura de banda disponível, além de ser uma faixa ainda pouco utilizada, principalmente no Brasil. As técnicas de modulação aplicadas nesse padrão (802.11ac) também são mais eficientes (vide tabela 02). Isso permite que uma maior quantidade de canais possam ser utilizados sem que o problema de interferência co-canal seja recorrente, conforme ilustrado abaixo:

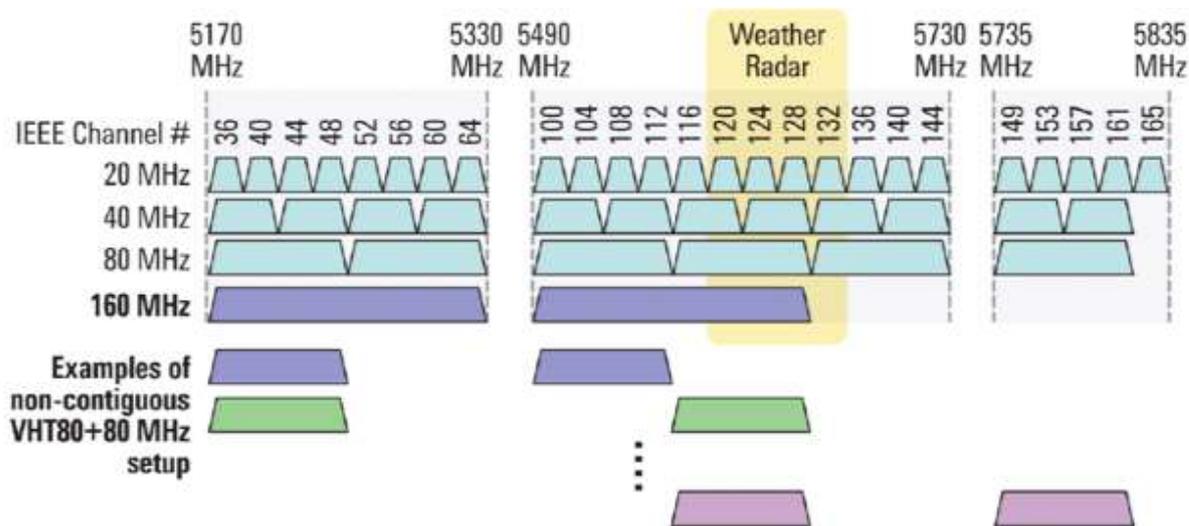


Figura 05: representação gráfica da distribuição de canais e rede 5GHz [10]

Diferentemente das redes 2.4GHz, que pela definição mais recente (IEEE 802.11n) podem operar em arranjos de 20 e 40MHz, as redes 5GHz (IEEE 802.11ac)

podem ser projetadas em faixas de 20, 40, 80 ou 160MHz, visando melhoria das taxas e capacidade de transmissão da rede. Quanto maior a largura utilizada, menor a quantidade de canais não sobrepostos, fator o qual deve ser levado em consideração durante a fase de projeto e planejamento.

Quando dois ou mais APs operam na mesma frequência e sua potência atinge os demais, o tempo de resposta, de confirmação de conexão e de transmissão de dados entre os APs e os dispositivos usuários geralmente aumenta, podendo causar confusão entre os dispositivos e ocupando drasticamente o tempo de utilização do canal, impedindo a comunicação através do mesmo.[1] O problema se torna ainda mais grave conforme a quantidade de usuários aumenta, pois o canal tem aumentada a sua ocupação, e, conseqüentemente, o tempo de espera para uso do mesmo.

3.3.1 TÉCNICAS DE ALOCAÇÃO DE CANAIS

Existem diversas técnicas possíveis de alocação de canais, utilizando diversos conceitos e interpretações, mas todas incluem o estudo do local para compreender e mapear os melhores parâmetros a serem definidos nos APs. Uma técnica eficiente para definir os canais adequados é baseada no cálculo do fator de sobreposição de canal:

$$f_s(i, j) = \begin{cases} 1 - \frac{|F_i - F_j|}{w} & \text{se } f_s(i, j) \geq 0 \\ 0 & \text{senão} \end{cases}$$

Equação 2: cálculo do fator de sobreposição de canal [19]

Este cálculo utiliza dois APs para determinar a porcentagem de interferência entre eles. Na fórmula, F_i é a frequência do canal atribuído ao AP denominado “i”, F_j é a frequência do canal do AP “j” e “w” é a largura do canal. [19] Com base nesse cálculo, obtêm-se as relações entre canais apresentadas na tabela 04.

Esse estudo [Alex Monteiro *et al.*, 2016] também comprova os dados apresentados na sessão 3.3, a respeito da utilização dos canais ortogonais. O valor presente nos campos da tabela correspondem à porcentagem de interferência que um canal possui sobre o outro.

Matriz de sobreposição														
Canal	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	1	0.77	0.54	0.31	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.77	1	0.77	0.54	0.31	0.09	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0.54	0.77	1	0.77	0.54	0.31	0.09	0	0	0	0	0	0	0
4	0.31	0.54	0.77	1	0.77	0.54	0.31	0.09	0	0	0	0	0	0
5	0.09	0.31	0.54	0.77	1	0.77	0.54	0.31	0.09	0	0	0	0	0
6	0	0.09	0.31	0.54	0.77	1	0.77	0.54	0.31	0.09	0	0	0	0
7	0	0	0.09	0.31	0.54	0.77	1	0.77	0.54	0.31	0.09	0	0	0
8	0	0	0	0.09	0.31	0.54	0.77	1	0.77	0.54	0.31	0.09	0	0
9	0	0	0	0	0.09	0.31	0.54	0.77	1	0.77	0.54	0.31	0.09	0
10	0	0	0	0	0	0.09	0.31	0.54	0.77	1	0.75	0.5	0.31	0
11	0	0	0	0	0	0	0.09	0.31	0.54	0.77	1	0.75	0.54	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0.09	0.31	0.54	0.77	1	0.77	0.22
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0.09	0.31	0.54	0.77	1	0.45
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.22	0.45	1

Tabela 04: matriz de sobreposição de canais em rede 2.4Ghz

É possível constatar, na tabela 04, que os canais 1, 6 e 11 (padrão Americano) não interferem entre si, e os canais 1, 5, 9 e 13 (padrão Europeu) interferem em 9% apenas. Por conta disso, é interessante utilizar essa seleção de canais em projetos de rede, trabalhando na alternância e potência para ter uma distribuição de sinal eficiente.

Outro cálculo interessante para o cenário é o cálculo de Intensidade de sinal (I_R). Ele é dado pela subtração da intensidade do sinal pelo nível de menor sensibilidade de recepção.[19] Nesse estudo, conforme níveis observados nas medições presentes na sessão 5, os menores níveis notados, dos APs mais distantes, ficaram entre -90 e -100 dBm. Para este cálculo, foi considerado o menor nível de sensibilidade como -100 dBm. Nas melhores medições, em áreas próximas aos APs, foi obtido um nível de sinal com média de -35dBm. Logo, a equação, é dada por:

$$I_R = -35 - (-90) \text{ dBm} = 65$$

Equação 03: equação de cálculo de intensidade de sinal

O cálculo acima complementa a justificativa apresentada na sessão 4, a respeito dos parâmetros utilizados nas medições.

Unindo os dois resultados, podemos calcular o peso de utilização de canal (P_u) e determinar o melhor canal para alocação de um novo AP ou distribuição dos APs existentes. [19] A fórmula da utilização do canal é dada por:

$$P_U(\text{canal}) = \sum_{i=0}^{14} \left(M_{fs}(\text{canal}, i) * \left(\sum_{red}^n I_R(\text{rede}, i) \right) \right)$$

Equação 04: equação de cálculo de peso de utilização de canal

3.4 HANDOFF

Handoff (ou *handover*) é uma técnica aplicada em redes *wireless* e redes móveis (celulares). O conceito em ambas as redes é muito semelhante. A técnica visa a transição de um dispositivo/usuário entre antenas/ APs, enquanto o mesmo se movimenta no ambiente, entre as áreas de cobertura, sem perder a comunicação. A técnica deve ocorrer antes que o usuário tenha sua conexão afetada [16].

Essa técnica não depende somente da solução *wireless*, mas também da tecnologia implementada nas interfaces de rede dos dispositivos usuários. Interfaces de rede mais simples, na maioria das vezes, só buscam novos pontos de acesso quando perdem a conexão com o AP anterior. Por conta disso, durante a transição entre áreas de cobertura, muitas vezes o dispositivo usuário se mantém conectado a um AP distante, mesmo quando um AP com sinal melhor próximo a ele está disponível. Algumas soluções *wireless* aplicam a técnica de “*handoff assist*”, que consiste em interromper a conexão com o dispositivo quando o nível do sinal entre o ponto de acesso e o usuário se torna ruim, obrigando-o a buscar um novo AP. Porém, durante a aplicação do “*handoff assist*”, o usuário perde a conexão por alguns instantes. [18]

Para que a transição seja eficiente, os APs devem se comunicar entre si, informando sobre a movimentação do usuário entre áreas de cobertura diferentes. As interfaces de rede dos usuários também devem colaborar na aplicação da técnica. [17][18]

3.5 EFICIÊNCIA DA REDE WIRELESS

Diversos parâmetros devem ser considerados para avaliar a eficiência de uma rede. No conceito de infraestrutura e propagação de sinal, além dos fatores citados

anteriormente e abordados neste trabalho (potência de sinal, interferência co-canal, relação sinal-ruído), podemos destacar: largura de banda e a distribuição da mesma de forma correta; a taxa de transmissão de dados suportada pela rede; o tempo de resposta e de transmissão de pacotes; interferência adjacente, entre outros.

4. PROJETO DE TESTES PARA A REDE

Para o desenvolvimento do projeto, será realizada uma bateria de testes, com o objetivo de estudar uma rede *wireless* já implementada, incluindo suas características técnicas, permitindo compreender seu funcionamento e analisar seu comportamento através dos resultados obtidos, seus pontos fortes e possíveis falhas e problemas que podem vir a impactar os usuários.

Para que este estudo seja possível, os seguintes testes são propostos, com base nas características da Solução Ekahau: análise de cobertura e potência de sinal, interferência de co-canal e áreas impactadas, relação sinal-ruído e áreas impactadas, listagem de APs que afetam determinada área (sessão 5.7) e relação das características da rede *wireless* predominantes por área.

Os seguintes parâmetros foram utilizados para as leituras de espectro e cobertura da rede *wireless* durante o estudo:

Potência de sinal – mínimo	-65.0 dBm
Relação Sinal-Ruído (SNR) - mínimo	30.0 dB
Velocidade de transferência de dados	20 Mbps
Interferência de canal – máximo	3 canais, com no mínimo -75.0 dBm

Tabela 05: Parâmetros utilizados nas análises com a Solução Ekahau

Os parâmetros acima foram definidos após pré análise de uma sala de aula sem problemas aparentes de comunicação com a rede *wireless* a ser analisada. Nesta análise prévia, foi descoberto, inicialmente, um ponto crítico na cobertura de sinal. A potência do sinal teve, nesta medida, uma média de -65dBm. O AP predominante estava, em média, 30dBm acima dos APs interferentes na mesma área, e a incidência de interferência

co-canal de APs não ultrapassava 3 canais com potência máxima de -75dBm conforme pode ser verificado nas figuras 06, 07 e 08.



Figura 06: medidas de potência retiradas de local sem problemas de comunicação

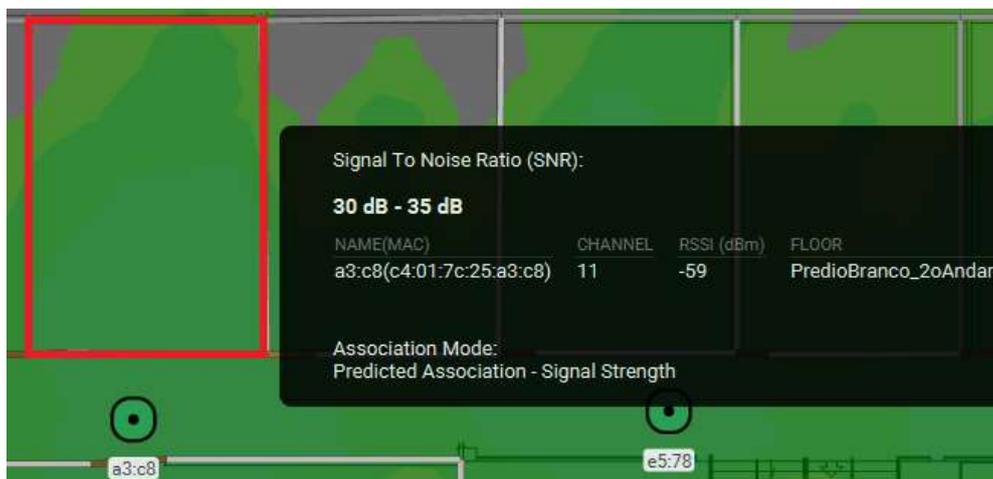


Figura 07: medidas de relação sinal-ruído retiradas de local sem problemas de comunicação

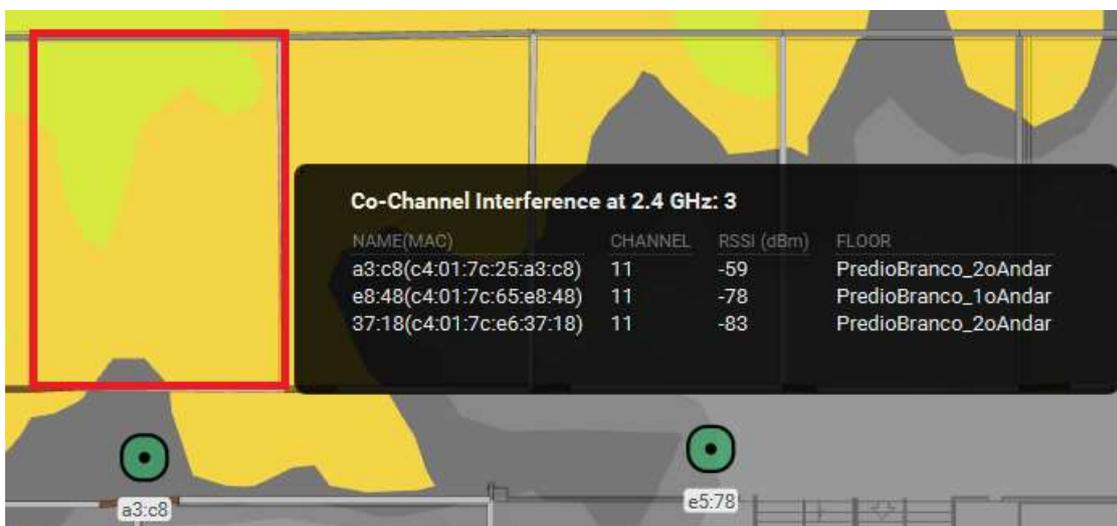


Figura 08: medidas de interferência de canal retiradas de local sem problemas de comunicação

5. TESTES REALIZADOS

Durante a etapa de levantamento de dados, foi feita a leitura de todo o prédio, incluindo salas, laboratórios, salas de coordenação e docentes, corredores, escadas e rampas.

Por conta da quantidade de informações, neste estudo foi selecionado o primeiro andar do prédio, onde grande parte dos usuários estão presentes, incluindo coordenação, docentes e alunos, e, portanto, onde há mais impacto na utilização da rede.

A bateria de testes realizada está ordenada da seguinte forma:

- Potência de Sinal (rede 2.4GHz e 5Ghz)
- Relação Sinal-Ruído (rede 2.4GHz e 5Ghz)
- Interferência co-canal (rede 2.4GHz e 5Ghz)
- APs presentes e suas interferências em cada área
- Erros predominantes separados por área (2.4GHz e 5Ghz)

Para fins de entendimento dos gráficos, cada círculo verde pequeno corresponde a um ponto de leitura realizado pelo sensor, e cada círculo maior é um APs localizado durante a leitura.

5.1 PONTOS DE LEITURA E LOCALIZAÇÃO DE APs (SUBSEÇÃO)

No mapa da figura 09 é possível ver a localização dos APs e os pontos de leitura realizados no primeiro andar. Quanto mais pontos de leitura, maior precisão nos resultados apresentados pela ferramenta, em diversos aspectos. Deste modo, é possível refinar assim o resultado e auxiliar no trabalho de identificação do comportamento da rede, possíveis propostas de análises e correção dos possíveis problemas.

Juntamente aos ícones dos APs, podemos encontrar informações como canal de operação na frequência 2.4GHz, e logo abaixo, canal de operação e largura de banda na frequência 5GHz.



Figura 09: pontos de leitura realizados através da solução Ekahau

5.2 POTÊNCIA DE SINAL

Para este estudo, o valor mínimo aceitável considerado foi -65dbm, conforme justificativa apresentada na sessão 4. Na figura 10, as áreas coloridas ficaram dentro do padrão definido, conforme a legenda, e as áreas cinzas ficaram fora do nível aceitável.

A cobertura da rede 2.4GHz aparenta estar satisfatória, cobrindo boa parte das áreas do andar, mas pode-se notar com clareza algumas áreas afetadas pela falta de sinal. O resultado deste teste está na figura 10.

Rede 2.4GHz:

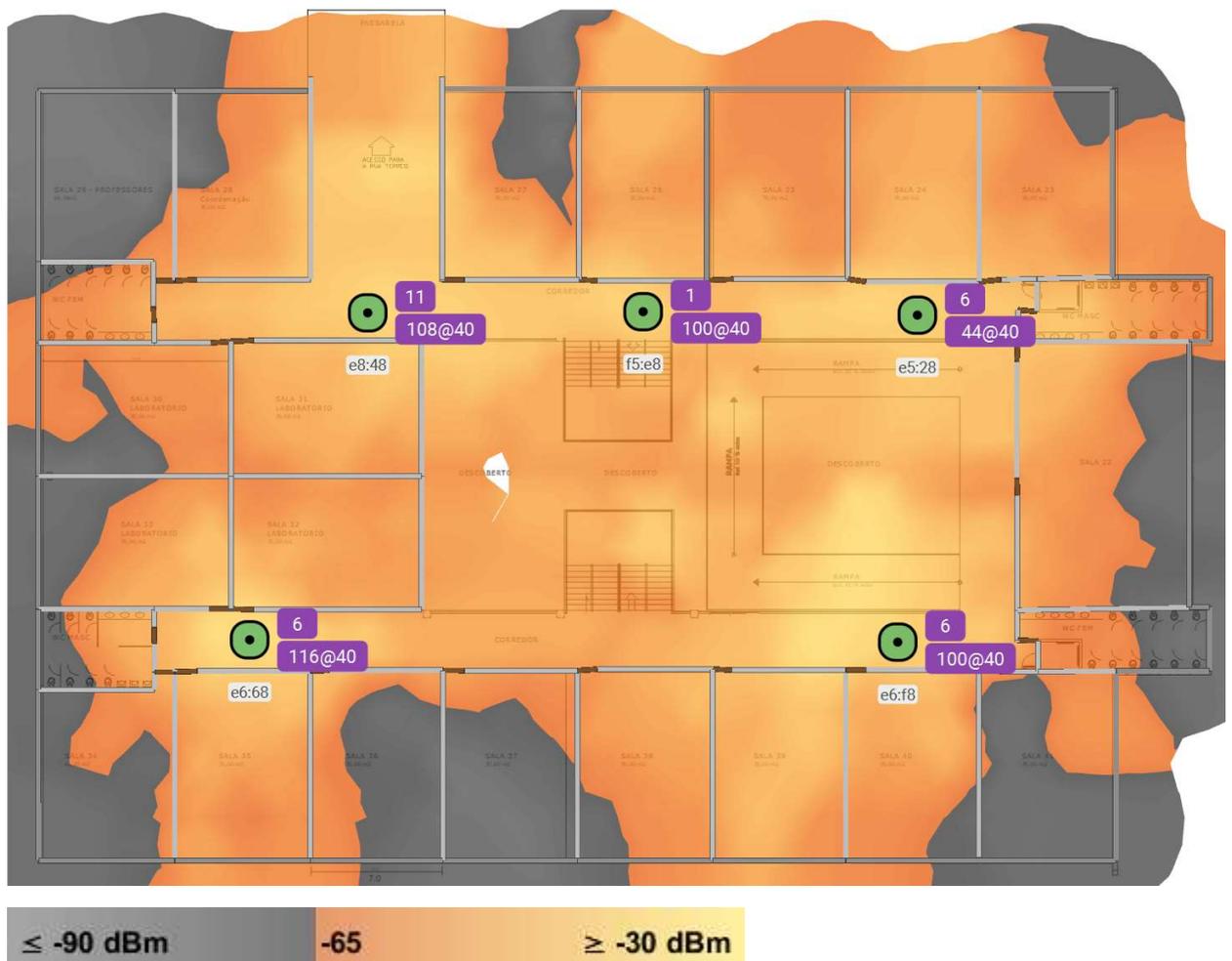


Figura 10: resultado da análise de potência de sinal em 2.4GHz no ambiente estudado

O mesmo padrão de leitura foi mantido para a rede 5GHz, considerando aceitável o sinal de no mínimo -65dbm. Devido às limitações da rede, a baixa quantidade e posicionamento dos APs, podemos notar consideráveis pontos de falha na distribuição do sinal, que é apresentado na figura 11.

Como a rede 5GHz enfrenta menor sobreposição de canais e possui maior banda por canal, conforme discutido na sessão de Conceitos Básicos, a mesma apresenta velocidade superior e, conseqüentemente, melhor experiência para os usuários. É tendência usar essa frequência como base no projeto de redes wireless. Deve-se ter como objetivo uma ampla cobertura da rede 5GHz, e evitar, quando possível, o investimento na rede 2.4GHz, devido às suas limitações abordadas anteriormente, ou ser tratada como foco secundário no projeto.

Rede 5GHz:



Figura 11: resultado da análise de potência de sinal em 5GHz no ambiente estudado

Nas figuras 10 e 11, pode-se destacar a concentração de sinal principalmente nos corredores, devido ao posicionamento dos APs. As salas de aula apresentam coberturas insatisfatórias, devido à baixa quantidade de APs e às barreiras que o sinal enfrenta, como portas e paredes. Na representação, o sinal respeita a escala gráfica de amarelo a laranja, onde amarelo significa sinal muito satisfatório ($\geq -30\text{dBm}$), e laranja representa que o sinal está próximo do limite definido (-65dBm).

5.3 RELAÇÃO SINAL-RUÍDO (SNR)

Para este cenário, foi definido um limite de pelo menos 30dB de diferença entre o sinal e o ruído, ou seja, sinal pelo menos 30dB acima do ruído (APs vizinhos), com base no estudo da sessão 4, mitigando as possibilidades dos dispositivos dos usuários se

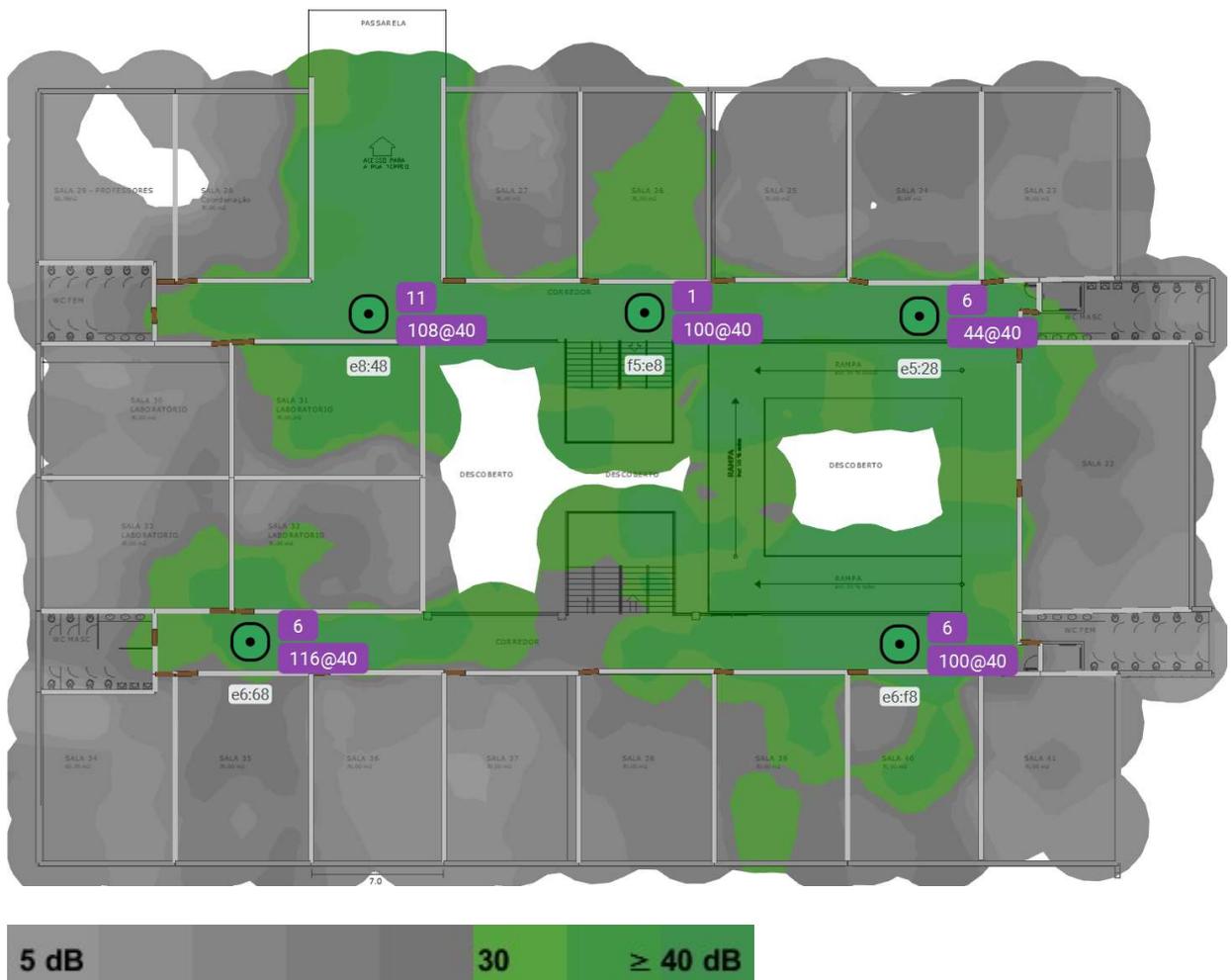


Figura 13: resultado da análise de relação sinal ruído em 5GHz no ambiente estudado

5.4 INTERFERÊNCIA CO-CANAL

Este teste tem a finalidade de identificar interferência de co-canal na rede *wireless*, causada por APs que foram configurados trabalhando no mesmo canal, dentro da área de cobertura da AP co-canal. Pode-se notar, nas figuras 14, para 2.4GHz e figura 15 para 5.0GHz, os APs e seus canais de operação. A área cinza indica que naquela exata localização há interferência co-canal de 4 ou mais APs, de acordo com a legenda.

Posteriormente, neste trabalho, está documentado detalhadamente o estudo de uma área específica do prédio (sessão 5.7), que aborda, dentre outros pontos, o quesito de interferência, visando compreender como os APs estão interferindo entre si, e quais as possíveis causas do problema.

Rede 2.4GHz:

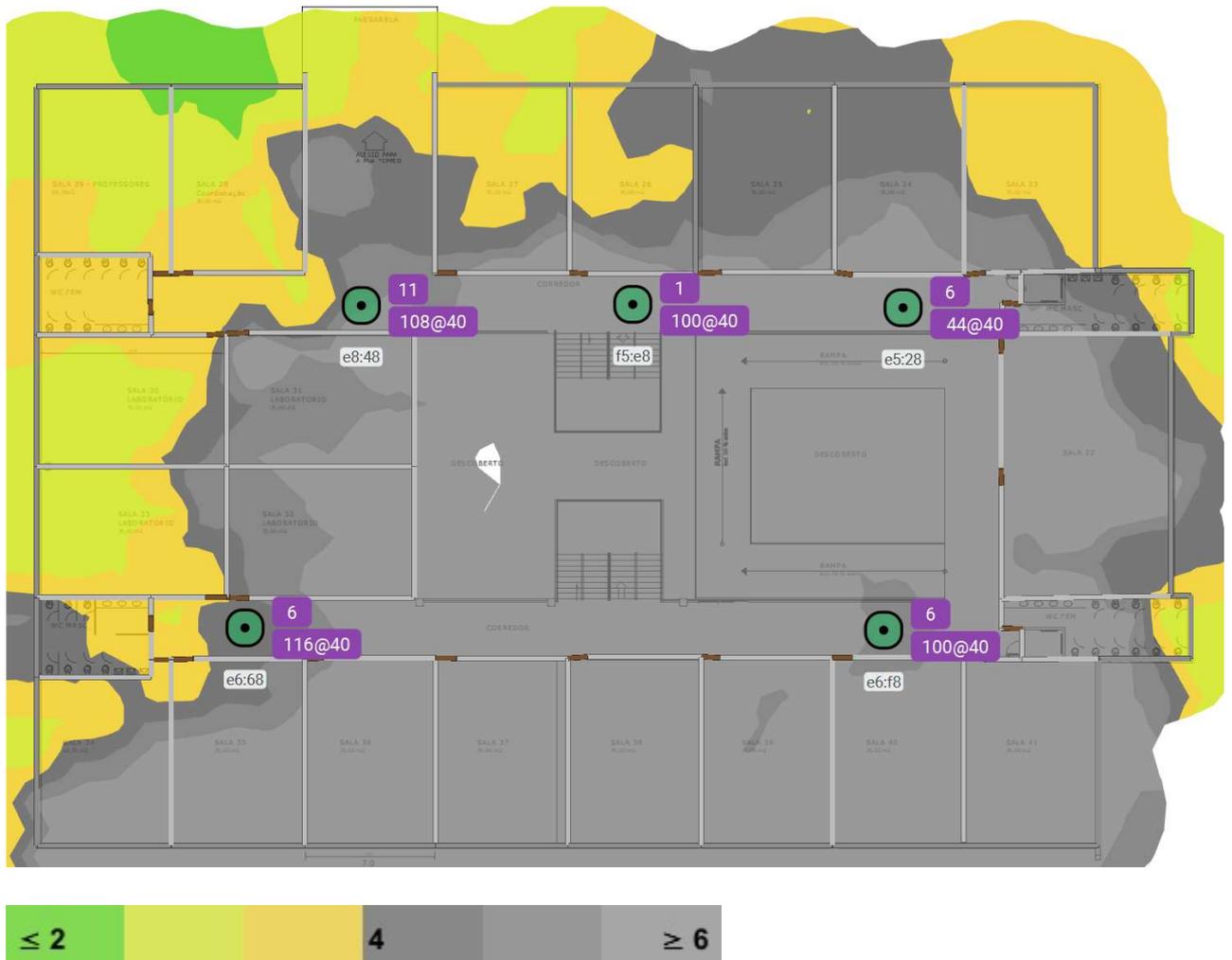


Figura 14: resultado da análise de interferência co-canal em 2.4GHz no ambiente estudado

O mesmo teste foi realizado na rede 5GHz. Na figura 15, pode-se notar que interferências também estão presentes, e este problema deveria ser quase inexistente devido a enorme variedade de canais que não se sobrepõem nessa frequência.

No estudo detalhado (seção 5.7), pretende-se compreender as possíveis causas dessa interferência presente na rede 5GHz do ambiente.

Rede 5GHz:

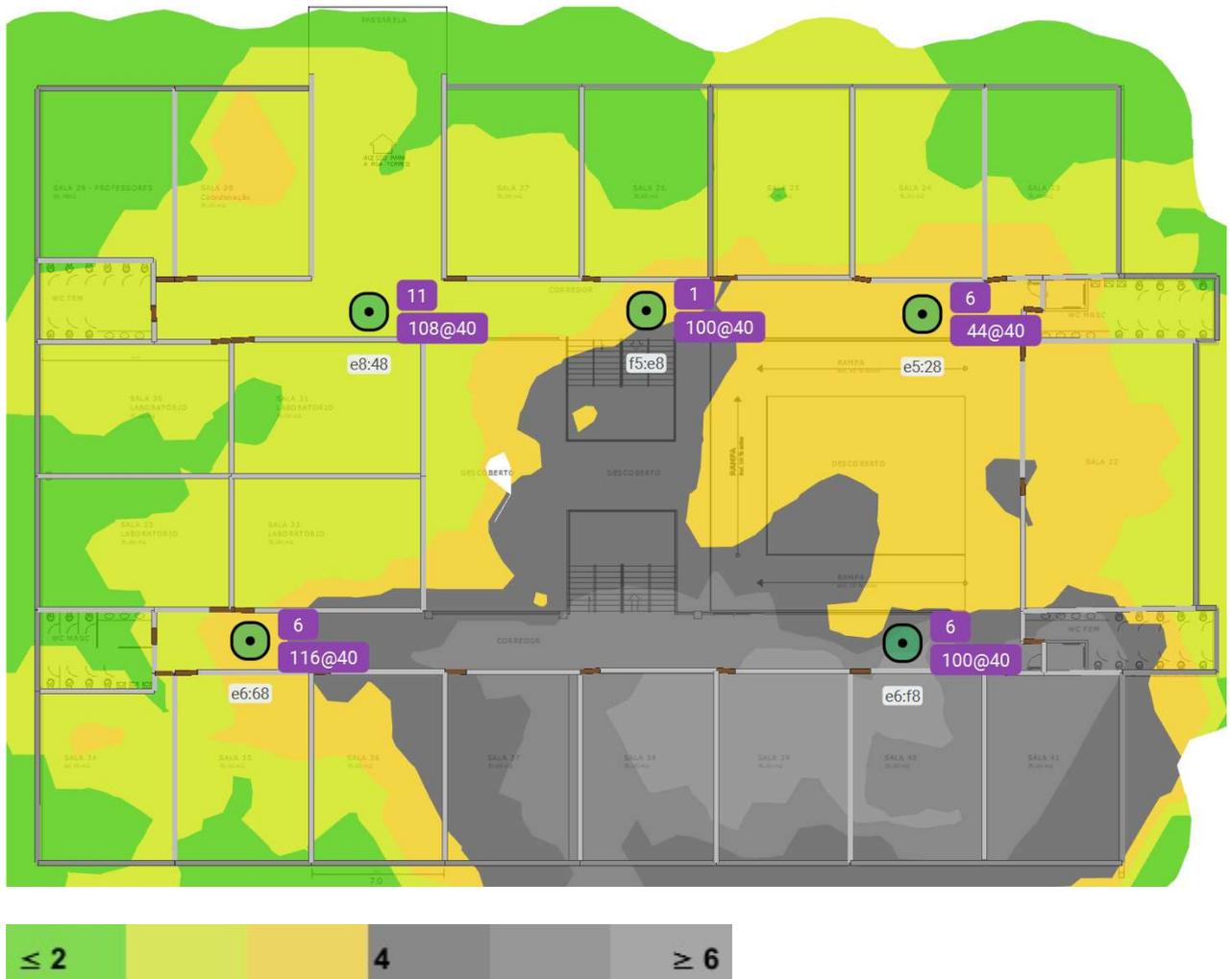


Figura 15: resultado da análise de interferência co-canal em 5GHz no ambiente estudado

5.5 ACCESS POINTS ASSOCIADOS

No mapa da figura 16, o andar foi dividido em diversas áreas coloridas, com a numeração dos APs. Na tabela 06, pode-se identificar os APs por seus respectivos números, o canal de operação do referido AP e a sua área cobertura, agrupados por cor. Em seguida, alguns gráficos ilustram a quantidade de APs separados por canal de operação.

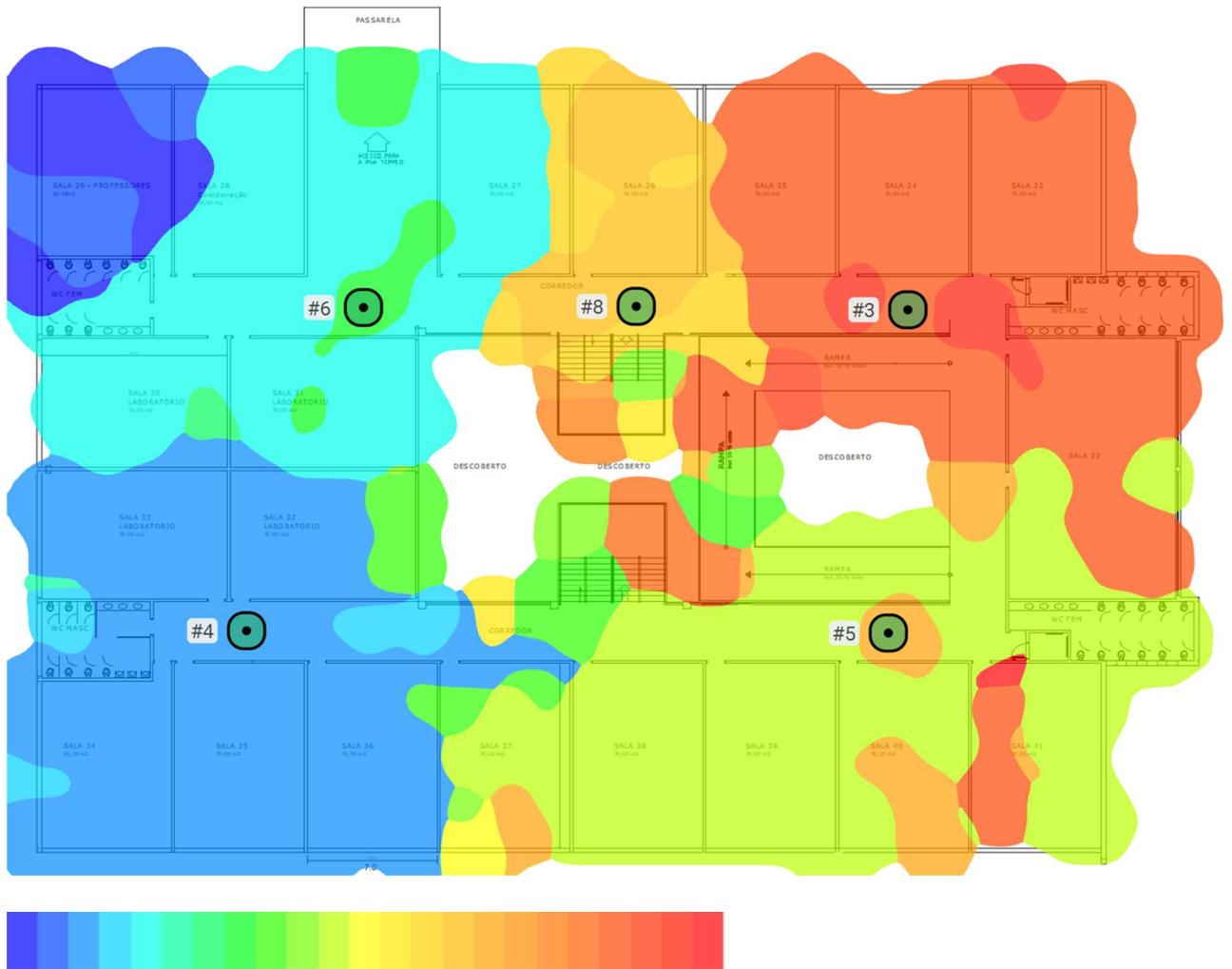


Figura 16: resultado da análise cobertura de Access Points no ambiente estudado

Através do mapa (figura 16) e da tabela 06, é possível compreender a localização física do AP, seu canal de operação em ambas as faixas de frequência e o alcance de sua cobertura de sinal. Essa visualização permite compreender um pouco mais sobre como a cobertura de um AP está invadindo a área de cobertura de outros APs, quais as áreas mais afetadas e possíveis conflitos que podem vir a ocorrer tanto em cobertura quanto em interferência.

ID do AP	Cor e canal de operação (2.4 e 5GHz)	MAC Address e SSID		
3	e5:28		Ruckus wireless	
	 802.11n	6	c4:01:7c:65:e5:2	Unknown SSID
	 802.11n	6	8	wifianchieta
	 802.11n	6	c4:01:7c:65:e5:2	anchieta-academico
	 802.11n	6	8	wifianchieta-gratis
	 802.11n	6	c4:01:7c:25:e5:2	wifianchieta
	 802.11n		8	
	 802.11n		c4:01:7c:e5:e5:2	
	 802.11n		8	
	 802.11n		c4:01:7c:65:e5:2	
 802.11n		8		
 802.11n	44@40	c4:01:7c:25:e5:2	anchieta-academico	
	44@40	c	wifianchieta-gratis	
 802.11n		c4:01:7c:e5:e5:2		
		c		
4	e6:68		Ruckus wireless	
	 802.11n	6	c4:01:7c:65:e6:6	wifianchieta
	 802.11n	6	8	wifianchieta-gratis
	 802.11n	6	c4:01:7c:e5:e6:6	anchieta-academico
	 802.11n	6	8	wifianchieta
	 802.11n		c4:01:7c:25:e6:6	
	 802.11n		8	
	 802.11n		c4:01:7c:65:e6:6	
	 802.11n		8	
	 802.11n		c4:01:7c:25:e6:6	anchieta-academico
 802.11n	116@40	c	wifianchieta-gratis	
 802.11n	116@40	c4:01:7c:e5:e6:6		
 802.11n		c		

5	e6:f8		Ruckus wireless	
		6	c4:01:7c:e5:e6:f	wifianchieta-gratis
	802.11n	6	8	anchieta-academico
		6	c4:01:7c:25:e6:f	wifianchieta
	802.11n		8	
		802.11n	c4:01:7c:65:e6:f	
			8	
	100@40	c4:01:7c:25:e6:f	anchieta-academico	
802.11n	100@40	c	wifianchieta-gratis	
	802.11n	100@40	wifianchieta	
	802.11n	c4:01:7c:e5:e6:f		
		c		
		c4:01:7c:65:e6:f		
		c		
6	e8:48		Ruckus wireless	
		11	c4:01:7c:65:e8:4	wifianchieta
	802.11n	11	8	anchieta-academico
		11	c4:01:7c:25:e8:4	wifianchieta-gratis
	802.11n		8	
		802.11n	c4:01:7c:e5:e8:4	
			8	
	108@40	c4:01:7c:e5:e8:4	wifianchieta-gratis	
802.11n	108@40	c	anchieta-academico	
	802.11n	c4:01:7c:25:e8:4		
		c		
	f5:e8		Ruckus wireless	

8	● 802.11n	1	c4:01:7c:24:f5:e	anchieta-academico
		1	8	wifianchieta-gratis
	● 802.11n	1	c4:01:7c:e4:f5:e	wifianchieta
			8	
	● 802.11n		c4:01:7c:64:f5:e	
			8	
	● 802.11n	100@40	c4:01:7c:e4:f5:e	wifianchieta-gratis
		100@40	c	anchieta-academico
	● 802.11n		c4:01:7c:24:f5:e	
			c	

Tabela 06: lista de access points posicionados no ambiente estudado e seus respectivos canais

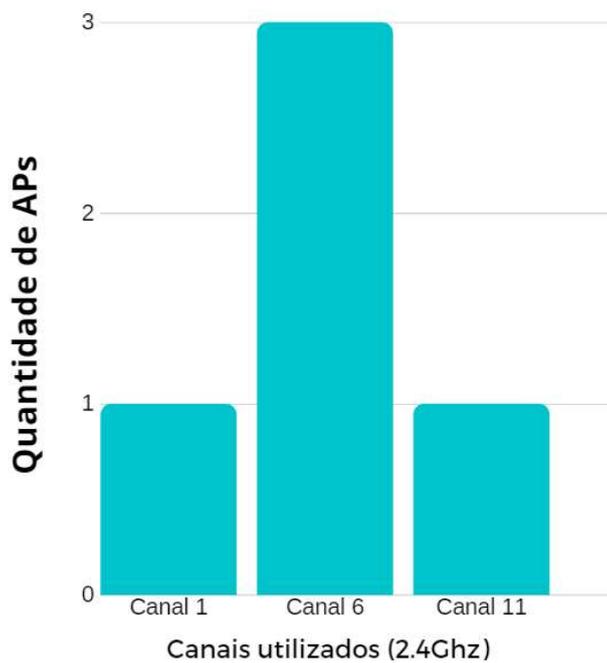


Figura 17: gráfico ilustrando a utilização de canais do andar selecionado (rede 2.4GHz)

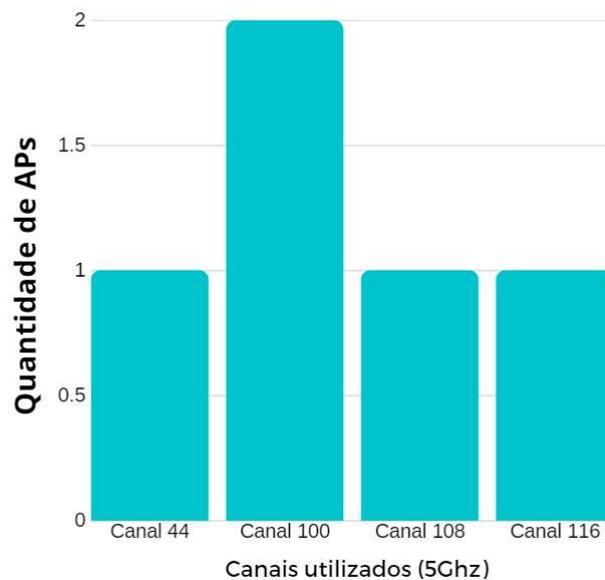


Figura 18: gráfico ilustrando a utilização de canais do andar selecionado (rede 5GHz)

Os gráficos das figuras 17 e 18 representam a quantidade de APs que operam no mesmo canal em cada faixa de frequência. No primeiro gráfico, que faz referência a faixa de frequência 2.4GHz, pode-se notar que do total de 5 APs, um deles trabalha no canal 1, três deles operam no canal 6 e o último opera no canal 11. Já no segundo gráfico, referente a 5GHz, nota-se que 2 APs trabalham no canal 100, e os outros três operam nos canais 44, 108 e 116, respectivamente.

5.6 VISUALIZAÇÃO DE PROBLEMAS PREDOMINANTES POR ÁREA

A imagem abaixo mostra um mapeamento dos requerimentos que estão abaixo do padrão esperado em cada localização. Com essa visualização, é possível identificar os principais problemas que afetam cada área. Pode-se notar que diversos problemas prevalecem, porém a interferência de sinal e o SNR se destaca entre os demais.

Legenda: S. Str = potência do sinal; #APs: Access Points; Data: taxa de transferência de dados; SNR: relação sinal-ruído; RTT: intervalo de envio de pacotes e resposta; Loss: perda de pacotes; Ch. I: interferência de canal.

Rede 2.4GHz:

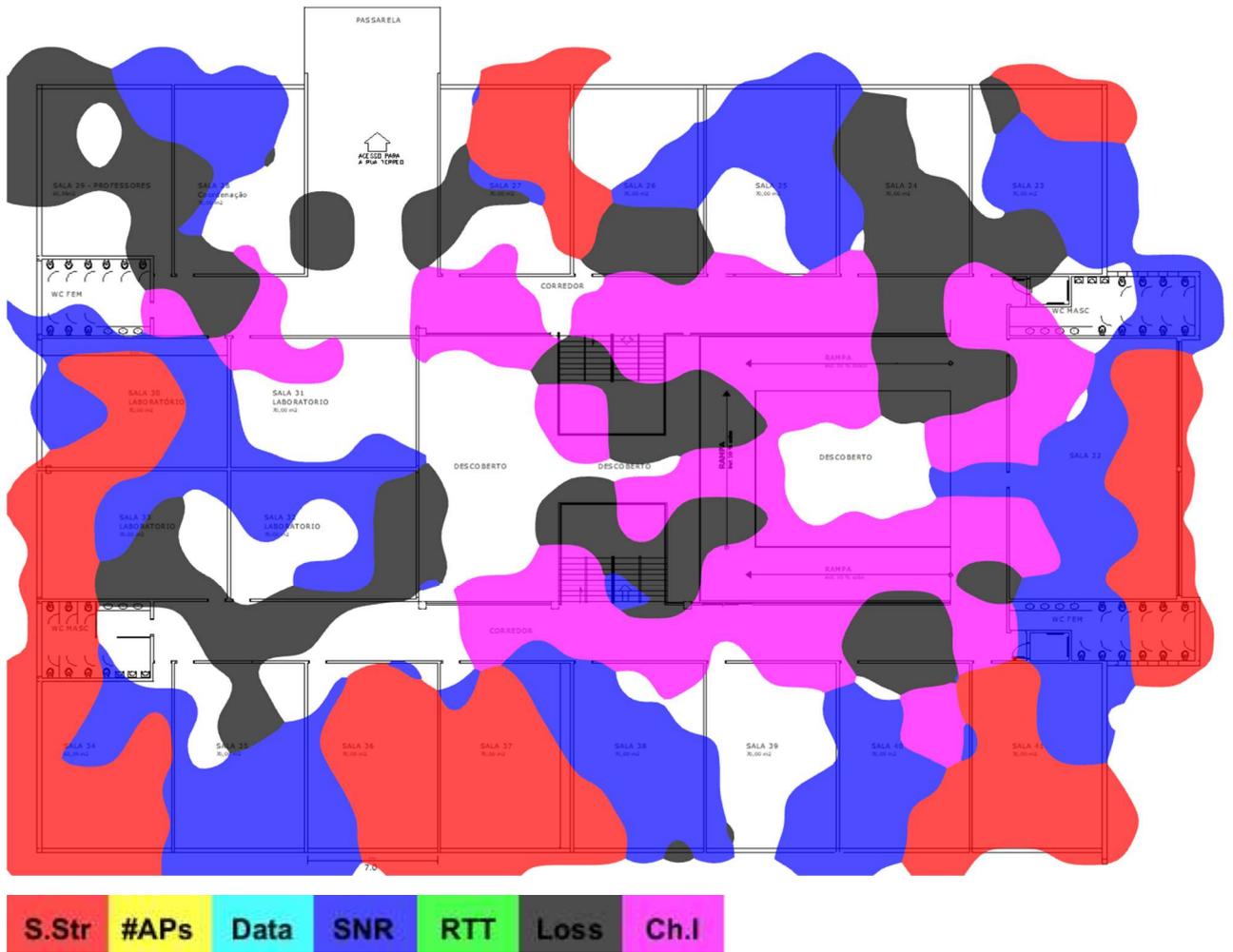


Figura 19: análise de problemas predominantes na rede 2.4GHz no ambiente estudado

Rede 5GHz:

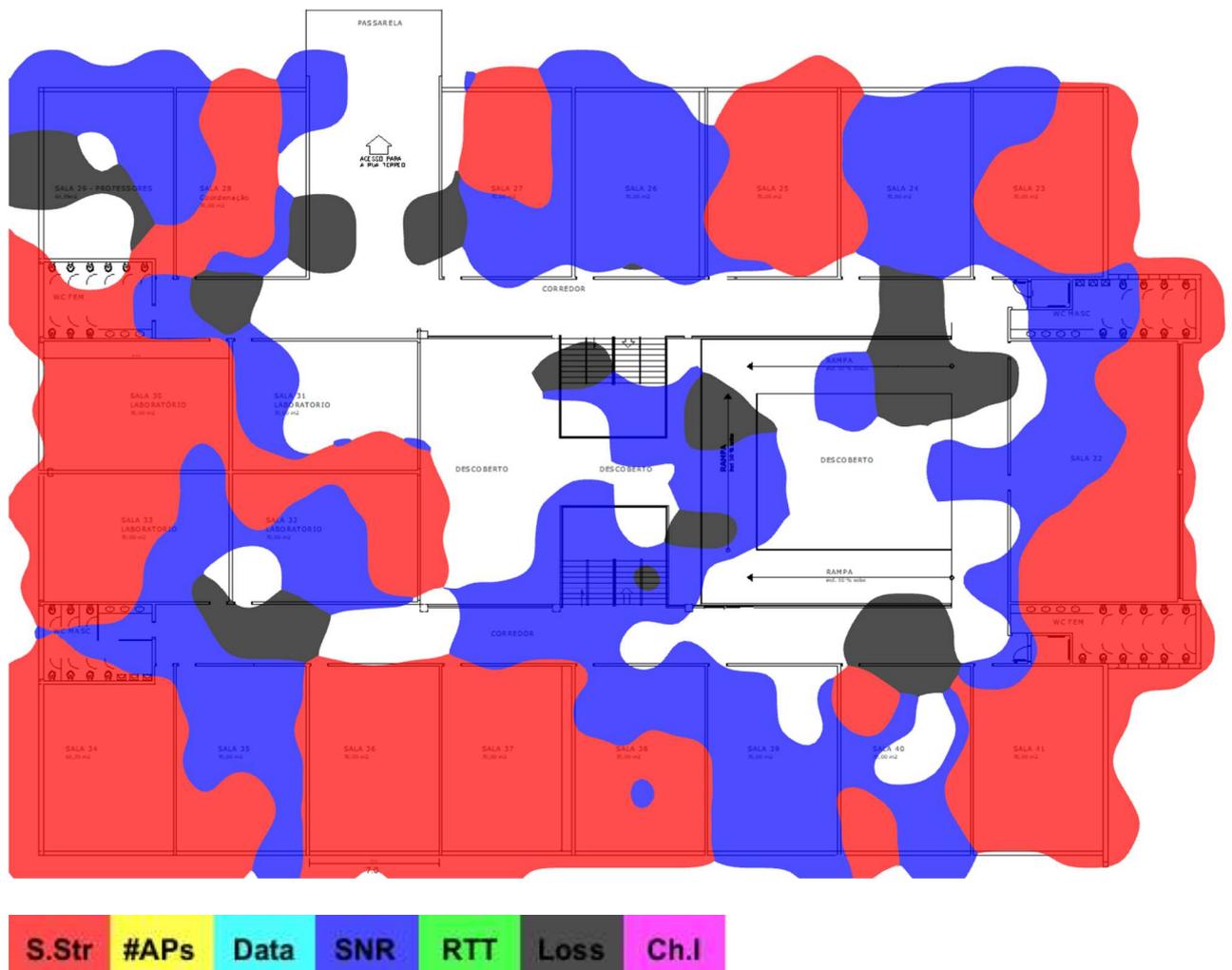


Figura 20: análise de problemas predominantes na rede 5GHz no ambiente estudado

5.7 ESTUDO DETALHADO

O objetivo dessa seção é compreender os elementos causadores dos problemas destacados nos testes de interferência de co-canal e na relação sinal ruído (SNR). É possível visualizar, através das figuras 12, 13, 14 e 15, diversas áreas que não atingiram os resultados esperados nos testes. Entre os problemas citados, ganha destaque o alto nível de interferência de co-canal na frequência 5GHz (figura 15) e baixa relação sinal-ruído em áreas próximas aos APs, na parte inferior do mapa (figuras 12 e 13). Já na figura 14, que se refere a análise da interferência de co-canal na frequência 2.4GHz, notam-se altos níveis dessa interferência em grande parte do prédio.

Primeiramente foi estudada a questão da interferência na rede 2.4GHz. É possível visualizar, na figura 21, como os APs de diferentes andares acabam atingindo outros andares.

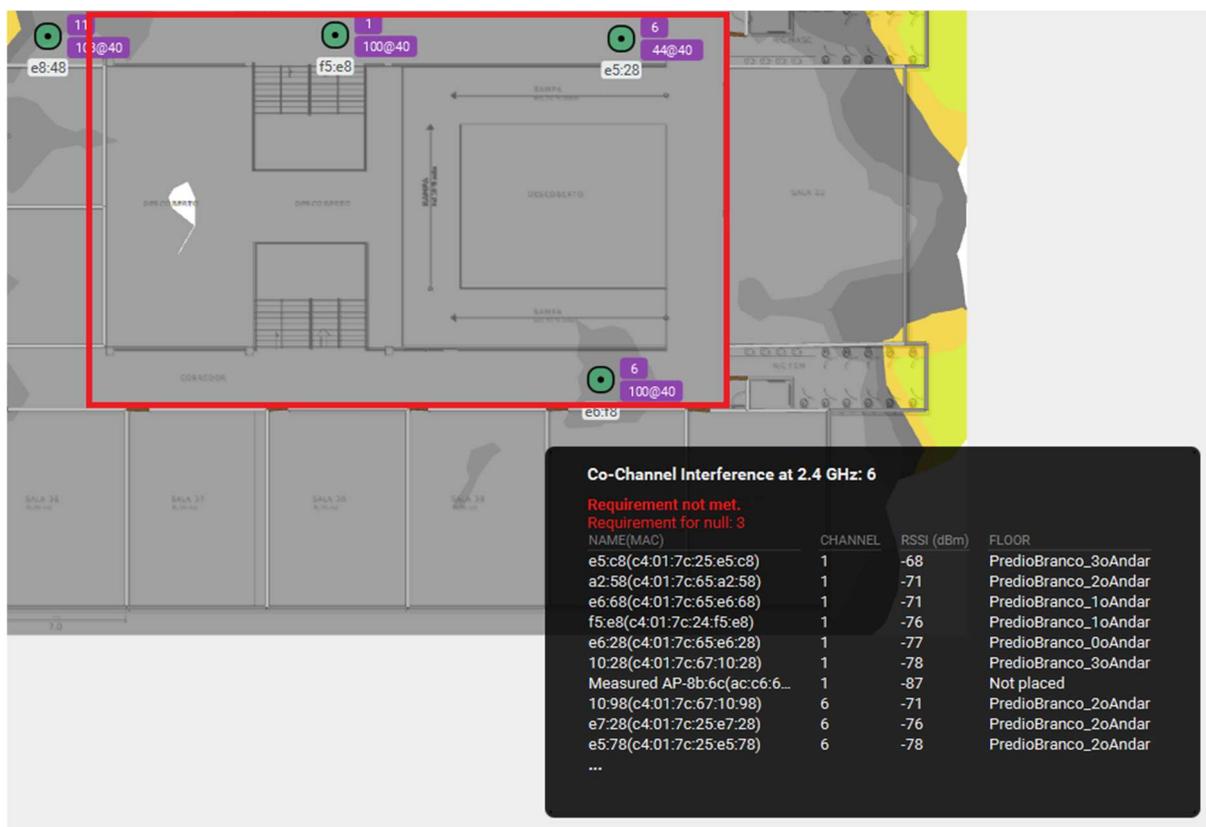


Figura 21: estudo interferência co-canal e lista de APs na área selecionada

Na lista apresentada na figura 21, vale destacar a quantidade de APs, que surgiram no topo da lista, operando no canal 1, e, logo a direita, sua localização. Na lista estão presentes APs do térreo, primeiro, segundo e terceiro andares do prédio. Dado que a grande área central do prédio quase não possui barreiras extensas, como paredes e, analisando a figura 21, pode-se concluir que o sinal de todos os APs posicionados nos corredores acabam se encontrando e criando uma grande zona de interferência.

Na tabela a seguir é possível ver a quantidade de APs presentes em todo o prédio, na solução atual, e seus respectivos canais de operação.

Os canais dos APs, na frequência 2.4GHz, estão agrupados da seguinte forma: de um total de 20 APs no prédio, 5 estão operando no canal 1, 10 estão operando no canal 6 e 5 estão operando no canal 11. Já na frequência 5GHz, a organização é: de 20 APs, 2

operam no canal 100, 3 operam no canal 116, 3 operam no canal 44, 3 operam no canal 108, 2 operam no canal 124, 1 opera no canal 132, 1 opera no canal 157, 3 operam no canal 52, 1 opera no canal 60 e 1 opera no canal 36.

ID	2.4GHz	5GHz	Final do MAC Address	Localização
7	1	100@40	f5:e8	Primeiro andar
5	6	100@40	e6:f8	Primeiro andar
4	6	116@40	e6:68	Primeiro andar
3	6	44@40	e5:28	Primeiro andar
6	11	108@40	e8:48	Primeiro andar
12	1	124@40	e5:78	Segundo andar
13	1	44@40	e5:88	Segundo andar
11	6	116@40	a3:c8	Segundo andar
9	6	132@40	37:18	Segundo andar
8	11	108@40	10:98	Segundo andar
10	11	108@40	a2:58	Segundo andar
14	11	157@40	e7:28	Segundo andar
20	1	44@40	e9:08	Terceiro Andar
15	6	116@40	10:28	Terceiro Andar
19	6	52@40	e5:e8	Terceiro Andar
17	6	60@40	62:18	Terceiro Andar
18	1	124@40	e5:c8	Terceiro Andar
16	11	36@40	4c:88	Terceiro Andar
1	6	52@40	9e:18	Térreo
2	6	52@40	e6:28	Térreo

Tabela 07: lista de APs instalados no prédio

Em seguida, foram estudadas as falhas apresentadas na rede 5GHz, e duas causas distintas foram encontradas. A primeira é similar ao problema descrito anteriormente, onde devido a ausência de barreiras na parte central do prédio, os sinais dos APs se encontram, e aqueles com canais idênticos interferem um no outro. A segunda causa é a presença de diversos APs pertencentes a redes pessoais de um condomínio residencial localizado paralelamente ao prédio estudado. Na figura 22, podemos notar a presença dos mesmos.

Mesmo apresentando níveis de potência abaixo do limite especificado no estudo (-75dBm), há um número elevado de APs, detalhe o qual influencia negativamente tanto na interferência co-canal quanto na relação sinal-ruído, visto que o ruído gerado por eles acaba se acumulando.

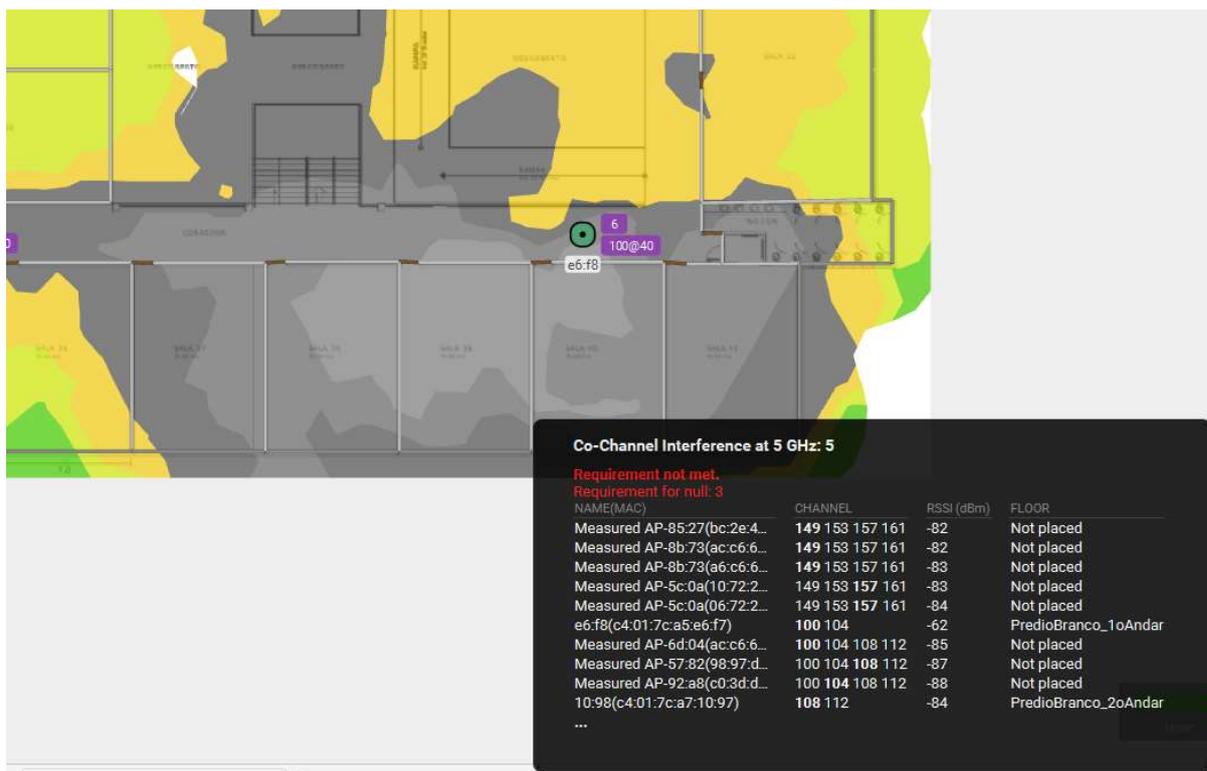


Figura 22: estudo de interferência co-canal em 5GHz e lista de APs vizinhos

Outro fator que justifica as afirmações sobre os APs vizinhos está representado na figura 23. Os APs da instituição, em seu escopo de 5GHz, operam com largura de banda de 40MHz (vide tabela 07). Na figura 23, a área em vermelho possui, predominantemente, cobertura de sinal 5GHz com banda de 80MHz, proveniente dos APs pertencentes ao condomínio residencial.

Nesse estudo detalhado foi possível compreender as principais causas dos problemas de interferência co-canal e relação sinal ruído, complementando a sequência de testes realizadas anteriormente e esclarecendo os resultados obtidos durante o trabalho.

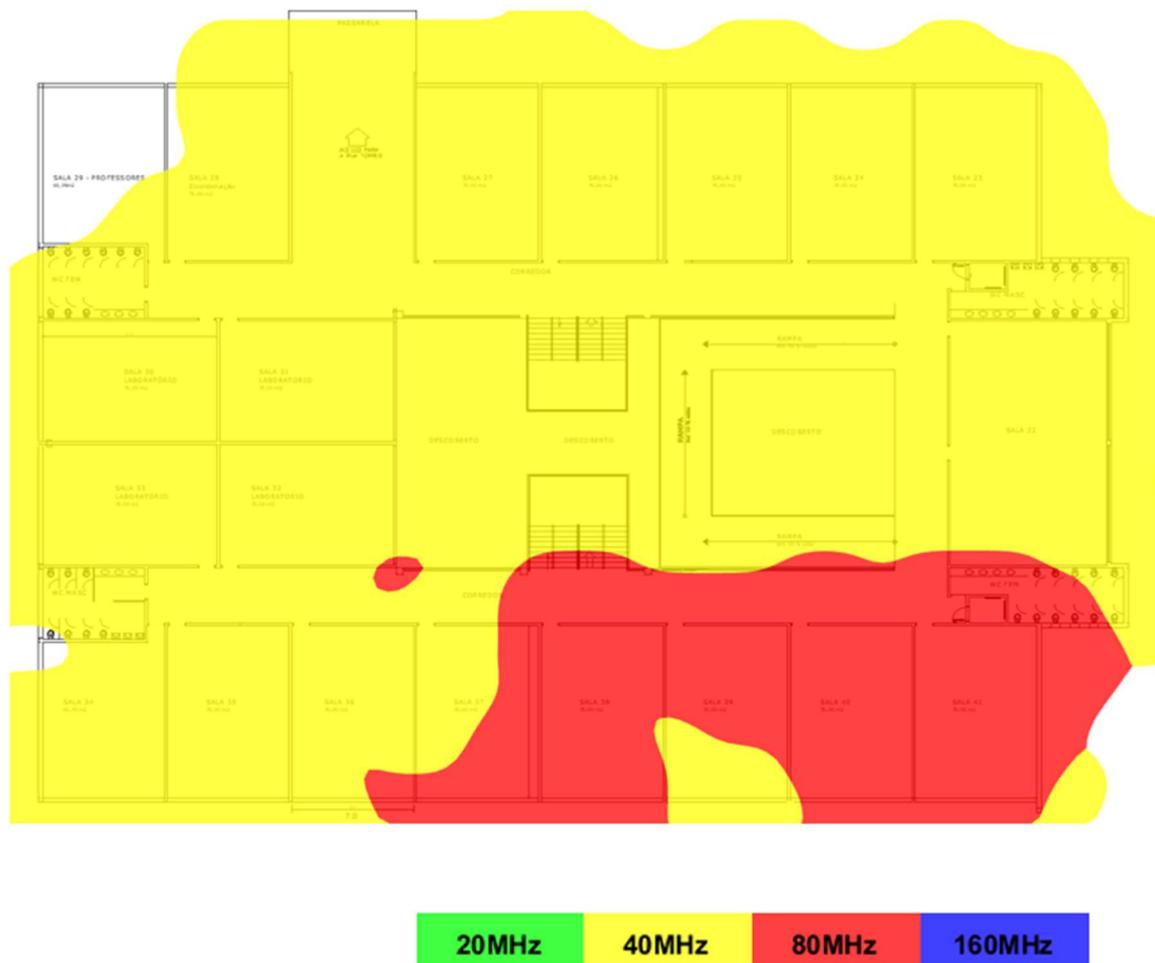


Figura 23: largura de banda predominante na frequência 5GHz

6. RESULTADOS

De acordo com os resultados obtidos através da Solução Ekahau, diversos pontos podem ser destacados e analisados. No que se refere à potência de sinal e cobertura, nota-se que há algumas áreas que não atingiram o limite de -65dBm proposto, na frequência de 2.4GHz. O problema se torna ainda mais grave na frequência 5GHz devido as suas limitações na propagação de sinal (limitações as quais podem ser consultadas em artigos técnicos como [Mihaela-Diana Dianu et al., 2014][20], que analisa a qualidade da conexão de acordo com a distância do AP em um ambiente fechado). Perdas significativas podem ser notadas dentro de determinadas salas de aula, impactando no uso da rede nas áreas mais ao fundo das salas. Devido a engenharia do prédio (com o centro aberto) e o posicionamento dos APs nos corredores, cada AP acaba atingindo todos os outros

andares, mesmo que com baixa potência. Isso é notado claramente no estudo detalhado, onde a área estudada recebe sinal dos APs de outros andares em níveis consideráveis, levando a crer que os APs operam em alta potência, senão em potência máxima suportada. Isso pode acabar tornando frequente a aplicação da técnica de *handoff*, além de diminuir a SNR e causar interferências, colaborando para a instabilidade da rede. Uma das soluções para resolver o problema é o aumento do número de APs e reposicionamento dos mesmos, evitando pontos cegos e melhorando a cobertura.

A relação sinal-ruído apresentou resultados pouco satisfatórios na rede 2.4GHz, e resultados bem insatisfatórios na rede 5GHz. Foi possível concluir que embora a quantidade de APs seja insuficiente, operando com potência de sinal alta e, muitas vezes, posicionamento inadequado, a quantidade de APs não é suficiente para cobrir toda a área do prédio. Nos testes realizados, percebe-se que os mesmos acabam alcançando áreas que outros APs seriam responsáveis pela cobertura. Isso acaba causando ruídos que avançam a faixa de 30dBm definida no estudo e, conseqüentemente, confusão nas conexões daquela área. Além disso, no estudo detalhado, foi possível observar que uma parte do ruído é proveniente da alta quantidade de APs presentes no conjunto residencial próximo ao prédio. A potência destes não atinge o prédio estudado com valores preocupantes, mas devido a alta quantidade de transmissores, o ruído é considerável no cenário do estudo. Como especificado em Conceitos Básicos, uma maneira de remediar problemas de SNR é aumentando o número de APs e controlando sua potência, além de estudar possíveis dispositivos presentes no ambiente que possam prejudicar este parâmetro.

Na interferência de co-canal, pode-se observar alta incidência de interferências, tanto na frequência 2.4GHz quanto na frequência 5GHz, o que é incomum. O limite declarado “aceitável” foi de até 3 APs atingindo uma determinada área, operando no mesmo canal, a um limite de -75dBm de potência. Na rede 2.4GHz, devido a alta sobreposição de canais, é compreensível a alta taxa de interferência, devido a infraestrutura do prédio e o posicionamento dos APs, conforme demonstrado no estudo detalhado (seção 5.7). Já na frequência 5GHz, onde a sobreposição de canais é muito mais baixa devido a elevada largura de banda, é esperado que não haja interferência de co-canal. Entretanto, o contrário pode ser observado, onde uma área notável é prejudicada pela interferência de co-canal na frequência de operação 5GHz. Essa interferência é causada, em parte, tanto pelos APs vizinhos detalhados no estudo, quanto alguns canais que se repetem na rede da instituição. A interferência co-canal é um fenômeno que pode

ser evitado na fase de projeto da rede, com estudos adequados do ambiente e levantamento de utilização de canais. A alocação adequada deve melhorar muito a interferência e o desempenho da rede, permitindo trabalhar, posteriormente, em fatores mais específicos, como posicionamento, visando maximizar o desempenho da solução.

7. CONCLUSÕES

Com base nas análises e interpretações dos resultados obtidos através da solução utilizada nesse trabalho, dos estudos realizados e dos conceitos previamente definidos, pode-se concluir a respeito da cobertura de sinal, que o posicionamento dos APs na parte central e aberta do prédio acabam provocando uma grande concentração de ondas de sinal dos mais variados APs presentes em todos os andares. Nas análises do fator de interferência de co-canal, pode-se notar que a mesma concentração de ondas notada no estudo anterior também ganha destaque, e é causada tanto pela reincidência na repetição de canais quanto por APs externos à rede. Nas avaliações da relação sinal-ruído, valores insatisfatórios foram apresentados devido a alta potência de sinal aplicada aos APs, a baixa quantidade de APs e ao ruído provenientes de APs internos e, eventualmente, redes externas.

Os resultados obtidos frisam a importância da fase de projeto da rede a ser implementada. Grande parte dos problemas podem ser minimizados nessa fase inicial, através de leituras e análises de espectro e cobertura, utilização de técnicas de mapeamento e alocação de canais, estudo de dispositivos interferentes presentes no ambiente e aplicação de regras e padrões conhecidos de redes wireless. Isso facilita na configuração dos pontos de acesso, em relação a canal, potência e posicionamento, além da quantidade necessária de equipamentos para a cobertura eficiente de toda a área.

Durante o desenvolvimento deste trabalho, a instituição iniciou a substituição da solução *wireless* Ruckus pela solução Aruba. Não houve tempo hábil para fazer uma nova análise da solução implementada, porém o estudo pode ser realizado futuramente, em conjunto com a instituição, visando possíveis melhorias e verificando se a eficiência esperada foi atingida com o novo investimento.

8. REFERÊNCIAS

- [1] CO-CHANNEL Interference and Its Impact on Wi-Fi Performance. Reston: Ekahau, 2019. (72 min.), son., color. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?reload=9&v=7qT3XS19N-0>>. Acesso em: 26 nov. 2019.
- [2] GORON, Leonardo Padua. **Avaliação de Desempenho e Interferências em Redes Wi-Fi**. 2013. 42 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/78598/000899562.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 26 nov. 2019.
- [3] EKAHAU. **Especificações técnicas do Ekahau Sidekick®**. Disponível em: <<https://www.ekahau.com/pt-br/products/sidekick/tech-specs/>>. Acesso em: 26 nov. 2019.
- [4] EKAHAU. **Funcionalidades do Ekahau Sidekick®**. Disponível em: <<https://www.ekahau.com/pt-br/products/sidekick/features/>>. Acesso em: 26 nov. 2019.
- [5] TELECO. **Redes Wi-Fi: O Padrão IEEE 802.11n**. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialwifiiee/pagina_4.asp>. Acesso em: 26 nov. 2019.
- [6] ZENG, Yunze; KIM, Kyu-han; PEFKIANAKIS, Ioannis. **MU-MIMO-Aware AP Selection for 802.11ac Networks**. 2017. 10 f., Association For Computing Machinery, Chennai, India, 2017.
- [7] EVERYTHING RF EDITORIAL TEAM. **What is Beamforming?** Disponível em: <<https://www.everythingrf.com/community/what-is-beamforming>>. Acesso em: 26 nov. 2019.
- [8] RUCKUS. **Beamforming**. Disponível em: <<https://www.ruckuswireless.com/pt-br/rucktionary/beamforming>>. Acesso em: 26 nov. 2019.
- [9] TELECO. **Redes WLAN: Visão Geral - Padrão 802.11ac**. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorial802-11ac/pagina_2.asp>. Acesso em: 26 nov. 2019.
- [10] MARDEMES. **Padrão IEEE 802.11ac de Redes Wireless a 1Gbps**. Disponível em: <<https://mardemes.wordpress.com/2013/12/30/padrao-ieee-802-11ac-de-redes-wireless-a-1gbps/>>. Acesso em: 26 nov. 2019.
- [11] FERREIRA, Lucas; MONTANHA, Gustavo Kimura. INTERFERÊNCIA DE SINAL WI-FI EM FUNÇÃO DE TIPOS DE BARREIRAS. **Tekhne e Logos**, Botucatu, v. 8, n. 2, p.73-81, set. 2017
- [12] MALBURG, Maria Moura. **MODULAÇÃO**. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/grad/04_2/Modulacao/>. Acesso em: 26 nov. 2019.

- [13] TELECO. **Rádios Cognitivos II: Padrão LTE Advanced**. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialradioscognitivos2/pagina_4.asp>. Acesso em: 26 nov. 2019.
- [14] ZUBOW, Anatolij; SOMBRUTZKI, Robert. Adjacent channel interference in IEEE 802.11n. **2012 Ieee Wireless Communications And Networking Conference (wncn)**, Berlin, p.1163-1168, abr. 2012. IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/wncn.2012.6213952>.
- [15] INTELBRAS. **SNR: o que é e quais as opções para otimizá-lo em sua rede corporativa**. 2018. Disponível em: <<http://blog.intelbras.com.br/o-que-e-snr/>>. Acesso em: 26 nov. 2019.
- [16] GRUPO DE TELEINFORMÁTICA E AUTOMAÇÃO (Rio de Janeiro). Universidade Federal do Rio de Janeiro. **Tecnologias de Rede em Telefonia Móvel**. 2010. Disponível em: <https://www.gta.ufrj.br/grad/10_1/movel/caracteristicas.html>. Acesso em: 26 nov. 2019.
- [17] FERNANDES, Ivo. **Wi-Fi**. 2006. Disponível em: <<https://paginas.fe.up.pt/~ee99207/Tecnologias/WLAN/wi-fic.html>>. Acesso em: 26 nov. 2019.
- [18] A DIFICULDADE de roaming em redes Wi-Fi. 2011. Disponível em: <<https://under-linux.org/entry.php?b=2280>>. Acesso em: 26 nov. 2019.
- [19] MONTEIRO, Alex et al. Atribuição dinâmica de canais em redes sem fio não coordenadas IEEE 802.11, baseada em fatores de sobreposição e intensidade de sinal. **Sbrc 2016**, Salvador, maio 2016. Disponível em: <<http://www.sbrc2016.ufba.br/downloads/SessoesTecnicas/152624.pdf>>. Acesso em: 03 dez. 2019.
- [20] DIANU, Mihaela-diana; RIIHJARVI, Janne; PETROVA, Marina. Measurement-Based Study of the Performance of IEEE 802.11ac in an Indoor Environment. **Wireless Communications Symposium**, Aachen, p.5771-5776, abr. 2014.

9. AGRADECIMENTOS

Agradeço, aos meus pais, que tornaram possível a minha caminhada até aqui, e também ao professor orientador Prof. Dr. Carlos Eduardo Câmara, pelo intenso suporte durante o desenvolvimento do trabalho, auxiliando a quebrar as barreiras e enfrentar os obstáculos.