

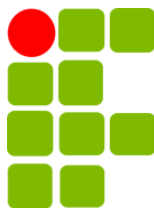
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
Campus Campina Grande
Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Telemática

Impacto das condições reais de Wi-Fi ofertado para os alunos do IFPB CG na escolha de modulação e codificação em um sistema ponto-a-ponto SDR

Maria Giovana Serafim de Almeida

Orientador: José Antônio Cândido Borges da Silva

Campina Grande, Novembro de 2025



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
Campus Campina Grande
Coordenação do Curso Superior de Tecnologia em Telemática

Impacto das condições reais de Wi-Fi ofertado para os alunos do IFPB CG na escolha de modulação e codificação em um sistema ponto-a-ponto SDR

Maria Giovana Serafim de Almeida

Monografia apresentada à Coordenação do Curso
Superior de Tecnologia em Telemática do IFPB -
Campus Campina Grande, como requisito parcial
para conclusão do Curso Superior de Tecnologia
em Telemática.

Orientador: José Antônio Cândido Borges da Silva

Campina Grande, Paraíba, Brasil
Novembro/2025

Catálogo na fonte:
Ficha catalográfica

A447i Almeida, Maria Giovana Serafim de.

Impacto das condições reais de Wi-Fi ofertado para os alunos do IFPB CG na escolha de modulação e codificação em um sistema ponto-a-ponto SDR / Maria Giovana Serafim de Almeida. – Campina Grande, 2025.
75f.: il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Tecnologia em Telemática) - Instituto Federal da Paraíba, 2025.

Orientador: José Antônio Cândido Borges da Silva.

1. Telemática - SDR (Software Defined Radio) 2. Wi-Fi. 3. Modulação. 4. Codificação. 5. GNU Radio. I. Silva, José Antônio Cândido Borges da (orient.). II. Título.

CDU 621.39:004.7

Impacto das condições reais de Wi-Fi ofertado para os alunos do IFPB CG na escolha de modulação e codificação em um sistema ponto-a-ponto SDR

Maria Giovana Serafim de Almeida

José Antônio Cândido Borges da Silva
Orientador

Ewerton Romulo Silva Castro
Membro da Banca

Marcelo Portela Sousa
Membro da Banca

Campina Grande – PB
Novembro de 2025

Dedico este trabalho à minha maior saudade, meu irmão Alexandre de Almeida Filho. Apesar da dor de sua ausência ter sido meu maior obstáculo, foi a confiança que sempre depositou em mim que me deu forças para continuar. Te amarei eternamente, Xandy.

*"Tudo tem o seu tempo determinado, e há tempo para todo o propósito
debaixo do céu."*

Eclesiastes 3:1

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço àquele que me guia e sustenta em todos os momentos, **Deus** Todo-Poderoso, fonte de força e esperança em minha vida. À minha família, expresso minha mais profunda gratidão: aos meus pais, Alexandre e Roseane, exemplos de amor, dedicação e inspiração, que sempre estiveram ao meu lado, oferecendo apoio incondicional; à minha avó Lindalva, cujo carinho e cuidado sempre me acolheram; e à minha querida irmã Débora, minha bonequinha, que ilumina meus dias com sua presença constante.

Meus sobrinhos Laysa, Alexandre Neto, Lorena e Arthur que são verdadeiros presentes de Deus em minha vida. Com sua inocência e ternura, me fazem esquecer dos desafios e enchem meu coração de amor e alegria.

Agradeço, também, aos colegas de curso, pelo companheirismo e pelas ricas trocas de experiências. Em nome de meus pais de EJC Carlos e Marciana, agradeço aos “Verdinhos amostradinhos”, que foram pilares fundamentais em minha caminhada de fé, especialmente em momentos delicados da minha trajetória espiritual. À minha amiga Alinne Priscila, agradeço por cada momento de apoio, por compartilhar sorrisos, desafios e conquistas comigo.

Não poderia deixar de expressar minha gratidão ao meu orientador, José Antônio, por sua orientação, paciência e incentivo nesta etapa final do curso. A todos os professores que contribuíram para minha formação no IFPB – Campus Campina Grande, e em especial aos membros da banca avaliadora, Ewerton Castro e Marcelo Portela, registro meu sincero respeito e reconhecimento.

A todos vocês, meu muito obrigada. Cada gesto, palavra e incentivo fez parte desta caminhada, tornando-a mais leve, significativa e memorável.

Resumo

No presente estudo são analisadas como as condições reais da rede Wi-Fi do IFPB – Campus Campina Grande influenciam o desempenho de sistemas de comunicação digital implementados via SDR, relacionando métricas de Qualidade de Serviço, como latência, *jitter*, perda de pacotes, intensidade do sinal e *throughput*, ao comportamento de diferentes esquemas de modulação e codificação. A pesquisa foi conduzida com medições em dez laboratórios, revelando grande instabilidade e variação de sinal, decorrentes principalmente da distância física e limitação estrutural do ponto de acesso utilizado pelos estudantes. Os valores de RSSI foram convertidos para SNR e utilizados em simulações no GNU Radio, onde BPSK, QPSK e 16-QAM foram testados com e sem codificação de canal. Os resultados mostraram que modulações de ordem superior são viáveis apenas em cenários de SNR elevado, enquanto ambientes típicos do campus, frequentemente degradados, favorecem o uso de modulações mais robustas e a aplicação de FEC para manter a confiabilidade do enlace. A análise evidencia que a baixa qualidade da rede impacta diretamente a experiência dos usuários e demonstra a relevância do SDR como ferramenta para compreender o comportamento da camada física e propor melhorias estruturais e operacionais na infraestrutura sem fio.

Palavras-chave: Qualidade de Serviço (QoS), modulação, codificação, SDR, Redes Wi-Fi, GNU Radio.

Abstract

This study examines how the real operating conditions of the Wi-Fi network at IFPB – Campus Campina Grande influence the performance of digital communication systems implemented through Software Defined Radio (SDR). It correlates Quality of Service metrics, such as latency, jitter, packet loss, signal strength, and throughput—with the behavior of different modulation and coding schemes. Measurements carried out in ten laboratories revealed significant instability and signal variation, mainly caused by physical distance and structural limitations of the access point available to students. The collected RSSI values were converted into SNR and applied in GNU Radio simulations, where BPSK, QPSK, and 16-QAM were tested with and without channel coding. The results indicate that higher-order modulations are feasible only under high, SNR conditions, while typical campus environments, often degraded, favor the use of more robust modulation schemes and the application of FEC to ensure link reliability. The analysis highlights that the low quality of the wireless network directly affects user experience and demonstrates the relevance of SDR as a tool for understanding physical, layer behavior and supporting structural and operational improvements in the Wi-Fi infrastructure.

Keywords: Quality of Service (QoS), modulation, coding, SDR, Wi-Fi networks, GNU Radio.

Lista de Abreviaturas

3GPP Third Generation Partnership Project (Projeto de Parceria de Terceira Geração)

AMC Adaptive Modulation and Coding (Modulação e Codificação Adaptativa)

APs Access points (Pontos de acesso)

AWGN Additive White Gaussian Noise (Ruído Gaussiano Branco Aditivo)

BER Bit Error Rate (Taxa de Erro de Bit)

BLER Block Error Rate (Taxa de Erro de Bloco)

BP Belief Propagation (Propagação de crenças)

BPSK Binary Phase Shift Keying (Chaveamento por Deslocamento de Fase Binária)

CCs Convolutional Codes (Códigos Convolucionais)

eMBB Enhanced Mobile Broadband (Banda larga móvel aprimorada)

FEC Forward Error Correction (codificação de canal)

IEEE Institute of Electrical and Electronics Engineers (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos)

IQ In-phase $\times$ Quadrature (Em fase $\times$ Quadratura)

LDPC Low-Density Parity-Check (Verificação de Paridade de Baixa Densidade)

MC Modulation and Coding (Modulação e Codificação)

MIMO Multiple Input, Multiple Output (Múltiplas Entradas, Múltiplas Saídas)

MIT Massachusetts Institute of Technology (Instituto de Tecnologia de Massachusetts)

MP Message-Passing (Passagem de mensagens)

NR New Radio (Nova Rádio)

PAs Power Amplifiers (Amplificadores de Potência)

Pe Bit Error Probability (Probabilidade de Erro de Bit)

PER Packet Error Rate (Taxa de Erro de Pacotes)

PoE Power over Ethernet (Alimentação via Ethernet)

QAM Quadrature Amplitude Modulation (Modulação de Amplitude em Quadratura)

QC-LDPC Quasi-Cyclic Low-Density Parity-Check (Verificação de paridade de baixa densidade quase cíclica)

QOE Quality of Experience (Qualidade de Experiência)

QOS Quality of Service (Qualidade do Serviço)

QPSK Quadrature Phase Shift Keying (Chaveamento por Deslocamento de Fase em Quadratura)

RSSI Received Signal Strength Indication (Indicação da intensidade do sinal recebido)

SDR Software Defined Radio (Rádio definido por software)

SNR Signal to Noise (Relação Sinal-Ruído)

VoIP Voice over Internet Protocol (chamadas de voz sobre IP)

WLANs Wireless Local Area Networks (Redes locais sem fio)

Wi-Fi Wireless Fidelity (Fidelidade sem fio)

WMM Wireless Fidelity Multimedia (Multimídia de Fidelidade Sem Fio)

Lista de Figuras

2.1	Constelações de sinais para BPSK, QPSK e 8-PSK.	21
2.2	Constelação 16- <i>square</i> QAM.	24
4.1	Láboratórios escolhidos e localização dos Pontos de Acesso.	32
4.2	Média de <i>Throughput</i> de Recepção por Laboratório em Diferentes Períodos.	34
4.3	Média de <i>Throughput</i> de Transmissão por Laboratório em Diferentes Períodos.	35
4.4	Média de <i>Ping</i> por Laboratório em Diferentes Períodos.	36
4.5	Média de <i>Jitter</i> por Laboratório em Diferentes Períodos.	37
4.6	Média de dBm por Laboratório em Diferentes Períodos.	38
6.1	<i>GNU Radio Flowgraph</i> das modulações(BPSK, QPSK, 16QAM).	43
6.2	<i>GNU Radio Flowgraph</i> 16QAM.	45
6.3	Forma de Onda BPSK no Domínio do Tempo - Laboratório de Telecomunicações.	45
6.4	Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) BPSK - Laboratório de Telecomunicações.	46
6.5	Diagrama de Constelação BPSK - Laboratório de Telecomunicações.	47
6.6	Forma de Onda QPSK no Domínio do Tempo - Laboratório de Telecomunicações.	47
6.7	Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) QPSK - Laboratório de Telecomunicações.	48
6.8	Diagrama de Constelação QPSK - Laboratório de Telecomunicações.	48
6.9	Forma de Onda 16-QAM no Domínio do Tempo - Laboratório de Telecomunicações.	49
6.10	Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) 16QAM - Laboratório de Telecomunicações.	50
6.11	Diagrama de Constelação 16QAM - Laboratório de Telecomunicações.	50
6.12	Forma de Onda BPSK no Domínio do Tempo - Laboratório de Programação 4.	51
6.13	Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) BPSK - Laboratório de Programação 4.	52
6.14	Diagrama de Constelação BPSK - Laboratório de Programação 4.	52

6.15	Forma de Onda QPSK no Domínio do Tempo - Laboratório de Programação 4.	53
6.16	Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) QPSK - Laboratório de Programação 4.	53
6.17	Diagrama de Constelação QPSK - Laboratório de Programação 4.	54
6.18	Forma de Onda 16QAM no Domínio do Tempo 16QAM - Laboratório de Programação 4.	55
6.19	Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) 16QAM - Laboratório de Programação 4.	55
6.20	Diagrama de Constelação 16QAM - Laboratório de Programação 4.	56
6.21	Forma de Onda BPSK no Domínio do Tempo - Laboratório de Programação 2.	56
6.22	Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) BPSK - Laboratório de Programação 2.	57
6.23	Diagrama de Constelação BPSK - Laboratório de Programação 2.	57
6.24	Forma de Onda QPSK no Domínio do Tempo - Laboratório de Programação 2.	58
6.25	Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) QPSK - Laboratório de Programação 2.	58
6.26	Diagrama de Constelação QPSK - Laboratório de Programação 2.	59
6.27	Forma de Onda 16QAM no Domínio do Tempo - Laboratório de Programação 2.	59
6.28	Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) 16QAM - Laboratório de Programação 2.	60
6.29	Diagrama de Constelação 16QAM - Laboratório de Programação 2.	60
6.30	Forma de Onda BPSK no Domínio do Tempo - Laboratório de Informática 1.	61
6.31	Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) BPSK - Laboratório de Informática 1.	62
6.32	Diagrama de Constelação BPSK - Laboratório de Informática 1.	62
6.33	Curva BER x SNR Comparação Completa e Mapeamento de Campo.	63
6.34	Simulação sem Codificação - BPSK.	64
6.35	Simulação Codificada - BPSK.	64
6.36	Curva Ber x SNR para QPSK - Comparação Completa e Mapeamento de Campo.	66
6.37	Simulação sem Codificação - QPSK.	66
6.38	Simulação Codificada - QPSK.	67
6.39	Curva 16-QAM - Comparação Completa e Mapeamento de Campo.	68
6.40	Simulação sem Codificação - 16QAM.	68
6.41	Simulação Codificada - 16QAM.	69

Lista de Tabelas

4.1	Medições do dia 30 de Maio de 2025	31
4.2	Medições do dia 2 de junho de 2025	32
5.1	Cenários de Teste de Qualidade de Sinal Wi-Fi	41

Sumário

Lista de Abreviaturas	8
Lista de Figuras	9
Lista de Tabelas	12
1 Introdução	15
1.1 Objetivos	16
1.1.1 Objetivo Geral	16
1.1.2 Objetivo Especifico	16
2 Fundamentação Teórica	18
2.1 Conceitos Básicos de Redes Sem Fio (Wi-Fi)	18
2.2 QoS: Qualidade de Serviço	19
2.3 Modulação e Codificação Adaptativa (AMC)	20
2.4 Modulação digital	20
2.4.1 BPSK (<i>Binary Phase Shift Keying</i> - Chaveamento por Desloca- mento de Fase Binária)	22
2.4.2 QPSK (<i>Quadrature Phase Shift Keying</i> - Chaveamento por Deslo- camento de Fase em Quadratura)	22
2.4.3 16QAM (<i>Quadrature Amplitude Modulation</i> - Modulação de Am- plitude em Quadratura)	23
2.5 FEC (<i>Forward Error Correction</i> - codificação de canal)	25
2.5.1 Códigos Convolucionais	25
2.5.2 LDPC (<i>Low-Density Parity-Check</i> - Verificação de Paridade de Baixa Densidade)	25
2.6 <i>Software Defined Radio</i> (SDR)	26
3 Metodologia	27
3.1 Coleta de Dados da Rede Wi-Fi	27
3.2 Análise Comparativa e Identificação de Padrões	27
3.3 Simulação de Sistema SDR	27

3.4	Materiais e Métodos	28
3.5	Ferramentas	28
3.6	Avaliação e Comparação de Resultados	29
4	Pesquisa de Campo	30
4.1	Primeira Etapa: Menor Fluxo	31
4.2	Segunda Etapa: Maior Fluxo	31
4.3	Análise Comparativa	34
5	Estratégia de Mapeamento dos Dados de Campo para o Simulador SDR	40
5.1	Mapeamento do Sinal: RSSI para SNR	40
5.2	Passo a Passo do Mapeamento	41
5.3	Validação do Canal: Perda de Pacotes para BER Mínima	41
6	Simulações SDR	42
6.1	4 cenários de SNR mapeados dos laboratórios	42
6.1.1	Laboratório de Telecomunicações (30 de maio de 2025 - Tarde): . .	45
6.1.2	Laboratório de Programação 4 (02 de junho de 2025 - Tarde)	51
6.1.3	Laboratório de Programação 2 (02 de junho de 2025 - Tarde)	56
6.1.4	Laboratório de Informática 1 (02 de junho de 2025 - Tarde)	61
6.2	Curva de Referência: BER X SNR	63
6.2.1	BER X SNR - BPSK	63
6.2.2	BER X SNR - QPSK	66
6.2.3	BER X SNR - 16-QAM	68
7	Resultados e Discussões	71
7.1	Análise dos Resultados	71
7.2	Intervenções Propostas	72
7.3	Considerações finais	73
7.4	Trabalhos Futuros	73
	Referências Bibliográficas	74

Capítulo 1

Introdução

As redes sem fio tornaram-se essenciais para a infraestrutura de conectividade em ambientes acadêmicos, sobretudo em instituições públicas de ensino como o Instituto Federal da Paraíba – Campus Campina Grande (IFPB CG). Tais ambientes abrigam um volume crescente de usuários que demandam acesso estável e rápido à internet, para fins educacionais, científicos e administrativos. Entre as tecnologias disponíveis, o Wi-Fi (*Wireless Fidelity* - Fidelidade Sem Fio) é a mais utilizada. Esta tecnologia baseia-se no padrão IEEE 802.11, um conjunto de especificações que foi desenvolvido pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers*), define a arquitetura e os protocolos de comunicação sem fio, é a mais utilizada em ambientes institucionais, devido à praticidade de acesso e à capacidade de atender múltiplos usuários simultaneamente.

A qualidade da rede Wi-Fi é um elemento crítico, pois impacta diretamente a QOE (*Quality of Experience* - Qualidade de Experiência) e precisa ser constantemente avaliada e aprimorada. Tradicionalmente, o desempenho de redes sem fio é medido por parâmetros de QOS (*Quality of Service* - Qualidade de Serviço), como latência, *jitter* e perda de pacotes. No contexto do IFPB – CG, medições realizadas revelaram variações significativas nesses parâmetros, com sinais fracos, oscilações de velocidade e altos valores de latência e *jitter*, especialmente em laboratórios distantes dos APs (*Access points* - Pontos de acesso). Essa instabilidade reforça a necessidade de compreender de que maneira as condições reais da rede impactam os sistemas de comunicação digital.

Nesse cenário, técnicas de modulação digital como BPSK (*Binary Phase Shift Keying* - Chaveamento por Deslocamento de Fase Binária), QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying* - Chaveamento por Deslocamento de Fase em Quadratura) e QAM (*Quadrature Amplitude Modulation* - Modulação de Amplitude em Quadratura) e de FEC (*Forward Error Correction* - codificação de canal) assumem papel fundamental na robustez de enlaces sem fio. A escolha adequada da modulação e da codificação podem mitigar os efeitos adversos do canal, assegurando maior confiabilidade. Com o avanço das ferramentas de SDR (*Software Defined Radio* - Rádio definido por *Software*), tornou-se possível simular diferentes

cenários de comunicação ponto-a-ponto em ambiente controlado, utilizando *software* para reproduzir a transmissão, o canal e a recepção dos sinais digitais.

Diante do exposto, o objetivo do presente trabalho é avaliar o impacto das condições reais da rede Wi-Fi do IFPB – CG especificamente latência, *jitter* e perda de pacotes, na escolha de técnicas de modulação e codificação em um sistema ponto-a-ponto implementado via SDR. Busca-se, por meio da inserção dos parâmetros medidos em campo em simulações controladas, estabelecer uma correlação entre a QoS observada e o desempenho da comunicação digital, oferecendo bases para identificar estratégias mais adequadas em cenários acadêmicos caracterizados por alta variabilidade da qualidade de sinal.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar o impacto das condições reais da rede Wi-Fi disponibilizada aos alunos do IFPB Campus Campina Grande na seleção de esquemas de modulação e codificação em um sistema ponto-a-ponto baseado em SDR, visando otimizar a performance e a confiabilidade da comunicação sem fio.

1.1.2 Objetivo Especifico

- Realizar medições das condições reais da rede Wi-Fi do IFPB CG, incluindo latência, *jitter*, perda de pacotes, *throughput* e intensidade do sinal.
- Efetuar uma análise comparativa dos dados coletados para identificar padrões de desempenho da rede.
- Simular um sistema ponto-a-ponto SDR utilizando diferentes esquemas de modulação (BPSK, QPSK e 16-QAM) para avaliar o impacto das condições reais de Wi-Fi.
- Implementar e testar técnicas de codificação de canal no sistema SDR para verificar seu efeito na confiabilidade e eficiência da comunicação.
- Comparar os resultados das simulações e propor recomendações sobre a escolha de modulação e codificação em ambientes Wi-Fi reais do IFPB.

Este conjunto de objetivos orienta a pesquisa por uma abordagem em duas fases. Inicialmente, o foco é na caracterização empírica da rede Wi-Fi do IFPB CG através de métricas de Qualidade de Serviço (QoS), como *throughput* e latência. A segunda fase utiliza esses dados reais para informar simulações de rádio definido por *software* (SDR), onde diferentes esquemas de modulação (BPSK, QPSK, 16QAM) e codificação de canal

são implementados e testados. O propósito final é estabelecer uma estratégia de mapeamento entre as condições Wi-Fi observadas e as configurações ideais de comunicação, culminando em recomendações práticas para a otimização da eficiência e confiabilidade da transmissão de dados em ambientes acadêmicos.

O presente trabalho está organizado em cinco seções principais. A Introdução contextualiza o problema, apresenta a motivação da pesquisa e define os objetivos geral e específicos. Em seguida, o Referencial Teórico aborda os conceitos essenciais para a compreensão do estudo, incluindo redes sem fio, métricas de Qualidade de Serviço (QoS), modulação digital (como BPSK, QPSK e QAM), e os fundamentos de Rádio Definido por *Software* (SDR). A seção de Metodologia descreve os procedimentos adotados, contemplando as medições realizadas na rede Wi-Fi do IFPB-CG e os parâmetros utilizados na implementação e simulação do sistema ponto-a-ponto em SDR. A seção de Resultados e Discussão apresenta os dados obtidos e analisa o desempenho dos diferentes esquemas de modulação e codificação à luz das condições reais da rede. Por fim, a Conclusão sintetiza as principais contribuições do estudo, destaca suas implicações práticas e sugere possíveis direções para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Nesta seção serão apresentados os conceitos essenciais para o entendimento do projeto em desenvolvimento.

2.1 Conceitos Básicos de Redes Sem Fio (Wi-Fi)

Redes sem fio, também chamadas de WLANs (*Wireless Local Area Networks* - Redes locais sem fio), são sistemas que permitem a comunicação de dados através de ondas de rádio, eliminando a necessidade de conexões físicas entre dispositivos. Baseadas no padrão IEEE 802.11, essas redes são formadas por APs (*Access Points* – Pontos de acesso) e estações móveis, como *notebooks*, *smartphones* e *tablets* (Kurose and Ross, 2021). Os APs funcionam como intermediários, repassando o tráfego entre os dispositivos e a infraestrutura com fio.

A difusão das redes Wi-Fi nos campi universitários se deu em resposta à mobilidade dos usuários, à flexibilidade na disposição dos ambientes de estudo e à necessidade de acesso constante a serviços online. Entretanto, o desempenho de redes Wi-Fi pode ser severamente afetado por fatores como:

- Obstáculos físicos, como paredes, portas ou móveis que atenuam ou refletem sinais;
- Interferência de outros dispositivos eletrônicos (ex: fornos micro-ondas, telefones sem fio);
- Aglomeração de usuários conectados a um mesmo ponto de acesso;
- Mobilidade dos usuários, que acarreta variações na intensidade e estabilidade do sinal;
- Uso ineficiente de canais ou sobreposição de frequências entre APs próximos (Stallings, 2020).

2.2 QoS: Qualidade de Serviço

O conceito de QoS (*Quality of Service* - Qualidade de Serviço) refere-se ao conjunto de mecanismos e métricas que descrevem o desempenho de uma rede sob a ótica técnica. Alguns dos principais indicadores utilizados para avaliar a QoS em redes Wi-Fi incluem:

- **Largura de Banda**

A Largura de banda é a largura do canal que os dados enviados atravessam, refere-se à distância ou alcance total entre os sinais mais altos e mais baixos na transmissão (Saleh et al., 2022).

- **Latência**

É o tempo que os dados levam para chegar da origem ao destino (latência). Distância física média, congestionamento e tempos de processamento prolongados podem contribuir para o atraso (Saleh et al., 2022).

- **Perda de pacotes**

Perda de pacotes refere-se ao número de pacotes perdidos durante o processo de transmissão para o destino. Se a perda de pacotes exceder um determinado limite, o desempenho se degrada significativamente e o sistema se torna inutilizável se a perda de pacotes for excessiva (Saleh et al., 2022).

Cálculo de perda: $(\text{Pacotes enviados} - \text{pacotes recebidos}) \times 100\% / \text{pacotes de dados enviados}$

Essas métricas são fundamentais para garantir o funcionamento adequado de aplicações sensíveis, como chamadas de voz sobre IP (VoIP), videoconferências e transmissões ao vivo, muito utilizadas em instituições de ensino.

- ***Throughput* (Taxa de Transferência)**

O *Throughput* é a largura de banda real medida durante um período específico de tempo e sob condições de rede definidas, refletindo a taxa de transferência efetiva para o envio ou recebimento de arquivos de determinado tamanho. Diferentemente da taxa nominal (*data rate*), o *throughput* corresponde ao desempenho prático da rede em cenários reais de operação. (Saleh et al., 2022)

Valores elevados de *throughput* geralmente estão associados ao uso de modulações de ordem superior, como 64-QAM e 256-QAM, capazes de transportar mais bits por símbolo

e, conseqüentemente, aumentar a eficiência espectral. Contudo, essas técnicas modulatoriais exigem condições ideais de sinal, pois são mais sensíveis a ruídos e interferências.

Nesse contexto, a RSSI (*Received Signal Strength Indication* - Indicação da intensidade do sinal recebido), o nível de ruído e a SNR (*Signal to Noise* - Relação Sinal-Ruído) assumem papel central. A partir desses parâmetros, é possível estimar a Taxa de BER (*Bit Error Rate* - Taxa de Erro de Bit), que, em última instância, define a confiabilidade da transmissão. Esses indicadores constituem os verdadeiros critérios utilizados pelos rádios (inclusive em arquiteturas de Rádio definido por *software*) para realizar a adaptação dinâmica de taxa, escolhendo o esquema de modulação adequado e determinando, de forma direta, o *throughput* alcançado.

2.3 Modulação e Codificação Adaptativa (AMC)

O AMC (*Adaptive Modulation and Coding* - Modulação e Codificação Adaptativa) é a técnica empregada pelos usuários para ajustar dinamicamente seus parâmetros de transmissão (esquema de modulação e taxa de código) em resposta às condições variáveis do canal sem fio.

O AMC permite que o transmissor varie os níveis de modulação e codificação de forma inteligente para mitigar os severos efeitos do desvanecimento variável no tempo em canais sem fio.

O objetivo principal é garantir que a transmissão ocorra com a maior eficiência espectral possível, ao mesmo tempo que mantém uma Qualidade de Serviço (QoS) aceitável, minimizando a taxa de BLER (*Block Error Rate* - Taxa de Erro de Bloco). (Radbord and Harsini, 2022)

2.4 Modulação digital

A modulação digital apresenta vantagens significativas sobre a modulação analógica. Enquanto os esquemas analógicos ocupam mais banda, possuem menor eficiência e são mais suscetíveis a ruído e degradação contínua do sinal, a modulação digital oferece maior eficiência espectral, maior robustez a interferências e permite o uso de técnicas avançadas de processamento digital, como correção de erros e equalização. Além disso, as modulações digitais integram-se naturalmente às arquiteturas SDR, possibilitando flexibilidade, reconfiguração e suporte a altas taxas de dados. Assim, a adoção de modulações digitais atende às demandas atuais por comunicações mais eficientes, confiáveis e compatíveis com sistemas modernos de voz, dados e multimídia.

A modulação digital representa a base para a transmissão de informações em sistemas

de comunicação modernos. Ao projetar um sistema *wireless*, a escolha do esquema de modulação digital adequado exige um *tradeoff* entre duas características críticas:

- **Eficiência de Largura de Banda:** Refere-se a quantos bits por segundo podem ser transmitidos em uma determinada largura de banda (taxa de dados alta).
- **Eficiência de Potência:** Refere-se à capacidade de um esquema de modulação de operar com uma baixa relação Sinal-Ruído (SNR) e baixa potência de transmissão.

O *design* de SDR é particularmente afetado por essa escolha, pois a flexibilidade exigida pelo SDR frequentemente significa ter que suportar múltiplas formas de onda (padrões), cada uma com seus próprios requisitos de modulação, largura de banda e potência. (Rouphael, 2008)

Um elemento essencial para a análise das modulações digitais é o diagrama de constelação, que representa graficamente os símbolos digitais no plano IQ (*In-phase* $\times$ *Quadrature* - Em fase $\times$ Quadratura). Cada ponto da constelação corresponde a uma combinação específica de amplitude e fase do sinal, associada a um grupo de bits. Quanto maior o número de pontos (ex.: 16-QAM, 64-QAM), maior a taxa de transmissão de dados, porém os pontos ficam mais próximos entre si, tornando o sistema mais suscetível a ruído e distorções. Dessa forma, o diagrama de constelação permite visualizar não apenas a eficiência espectral da modulação, mas também sua robustez frente às degradações do canal, sendo amplamente utilizado em depuração (*debug*), avaliação de desempenho e otimização em sistemas SDR.

A seguir na Figura 2.1, são apresentadas as constelações de sinais para BPSK, QPSK e 8-PSK, imagem do capítulo 3 do livro "*RF and Digital Signal Processing for Software Defined Radio*" Rouphael (2008).



Figura 2.1: Constelações de sinais para BPSK, QPSK e 8-PSK.

2.4.1 BPSK (*Binary Phase Shift Keying* - Chaveamento por Deslocamento de Fase Binária)

O BPSK (*Binary Phase Shift Keying* - Chaveamento por Deslocamento de Fase Binária) é uma forma de onda de modulação digital que possui uma envoltória constante (a amplitude do sinal não muda). É representado por dois sinais antipodais (opostos um ao outro), o que lhe confere um coeficiente de correlação de -1. É um esquema de modulação eficiente em potência, pois a envoltória constante permite o uso de amplificadores de potência não lineares e de alta eficiência. O BPSK coerente apresenta um desempenho de 3 dB superior na taxa de BER (*Bit Error Rate* - Taxa de Erro de Bit), tornando-o mais eficiente em termos de energia. (Rouphael, 2008)

O cálculo a seguir é a fórmula de P_e (*Bit Error Probability* - Probabilidade de Erro de Bit)) para o esquema de modulação BPSK em um canal com AWGN (*Additive White Gaussian Noise* - Ruído Gaussiano Branco Aditivo):

$$P_{e,\text{BPSK}} = Q\left(\sqrt{\frac{2E_b}{N_0}}\right) = \frac{1}{2}\text{erfc}\left(\sqrt{\frac{E_b}{N_0}}\right) \quad (2.1)$$

Explicação dos termos:

- E_b : Energia por bit
- N_0 : Densidade espectral de potência de ruído
- $Q(\cdot)$: Função Q Gaussiana (ou Cauda da Distribuição Normal)
- $\text{erfc}(\cdot)$: Função erro complementar

Probabilidade de Erro (*Fading Rayleigh Lento*)

A fórmula para a probabilidade de erro no cenário de canal mais realista de *fading Rayleigh* de variação lenta é:

$$P_{e,\text{BPSK}} = \frac{1}{2} \left[1 - \sqrt{\frac{E_b/N_0}{1 + E_b/N_0}} \right] \quad (2.2)$$

2.4.2 QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying* - Chaveamento por Deslocamento de Fase em Quadratura)

O QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying* - Chaveamento por Deslocamento de Fase em Quadratura) é um esquema de modulação digital amplamente utilizado devido à sua eficiência espectral. Entretanto, o QPSK padrão apresenta um desafio importante no projeto de rádios modernos: a variação de envoltória. No QPSK, saltos de fase de 180°

entre símbolos podem ocorrer, e, quando filtrados, esses saltos fazem com que a envoltória do sinal caia a zero (*zero crossing*). Essa característica é indesejável, pois obriga o uso PAs (*Power amplifiers* - amplificadores de potência) lineares, que são menos eficientes energeticamente, e pode gerar *spectral regrowth* quando PAs não lineares são empregados.

Para contornar esse problema, o projeto de SDR utiliza variações do QPSK que minimizam a variação de envoltória, destacando-se duas principais:

- **Offset QPSK (OQPSK):** Esta variação elimina o salto de fase de 180° deslocando os fluxos de bits em fase (I) e quadratura (Q) por meio período de símbolo. Com isso, a transição máxima de fase é limitada a 90° , reduzindo significativamente a variação de envoltória. O OQPSK permite o uso de amplificadores de potência não lineares mais eficientes, mantendo o mesmo desempenho de Taxa de Erro de Bit (BER) do QPSK padrão.
- **$\pi/4$ -QPSK:** Considerado um compromisso entre QPSK e OQPSK, limita a transição máxima de fase a 135° ($3\pi/4$ rad). Apesar de ainda apresentar alguma variação de envoltória, ela é menor que a do QPSK padrão. Essa modulação é utilizada em padrões de telefonia celular e pode ser detectada de forma diferencial (*non-coherent*), simplificando o receptor, embora com uma penalidade de cerca de 3 dB no BER em comparação com detecção coerente.

Em resumo, embora o QPSK ofereça excelente eficiência espectral, o uso de OQPSK ou $\pi/4$ -QPSK é preferido em rádios modernos para equilibrar eficiência de potência, desempenho de BER e complexidade do receptor, especialmente em dispositivos de baixo consumo e operação multi-modo (Rouphael, 2008).

2.4.3 16QAM (*Quadrature Amplitude Modulation* - Modulação de Amplitude em Quadratura)

O QAM (*Quadrature Amplitude Modulation* - Modulação de Amplitude em Quadratura) é um esquema de sinalização amplamente utilizado em sistemas que buscam alta eficiência espectral, como comunicações sem fio de curto alcance e sistemas telefônicos. No QAM, a informação é codificada tanto na fase quanto na amplitude do sinal. O 16-QAM (16-ary QAM) é uma das variantes mais populares, utilizando tipicamente uma constelação quadrada para representar os 16 símbolos distintos.

Diferentemente de modulações como QPSK, o QAM não possui envoltória constante, o que impõe restrições críticas no projeto de rádios definidos por software (SDR). A operação do QAM deve ocorrer na região linear de um amplificador de potência (PA), pois não linearidades podem causar compressão do sinal e degradação do desempenho. Por isso, o 16-QAM é escolhido quando a prioridade é a alta taxa de transmissão de dados, mesmo que isso implique maior consumo de energia.

O 16-QAM também é particularmente sensível a imperfeições do transceptor e interferências externas, incluindo:

- Ruído de fase (*Phase noise*);
- Não linearidade do PA (*PA nonlinearity*);
- Desequilíbrio I/Q (*I/Q imbalance*), decorrente da modulação de quadratura digital antes da conversão digital-analógica em SDR;
- Interferência de onda contínua (*CW interference*);
- Deslocamento DC (*DC offset*).

Em resumo, o 16-QAM oferece alta eficiência espectral e taxa de dados elevada, mas requer cuidados específicos no projeto do transmissor e do receptor, especialmente no contexto de SDR.

A Figura 2.2 ilustra a Constelação 16-QAM (16-square QAM). A imagem é uma extração do Capítulo 3 do livro "*RF and Digital Signal Processing for Software Defined Radio*", Roupheal (2008).

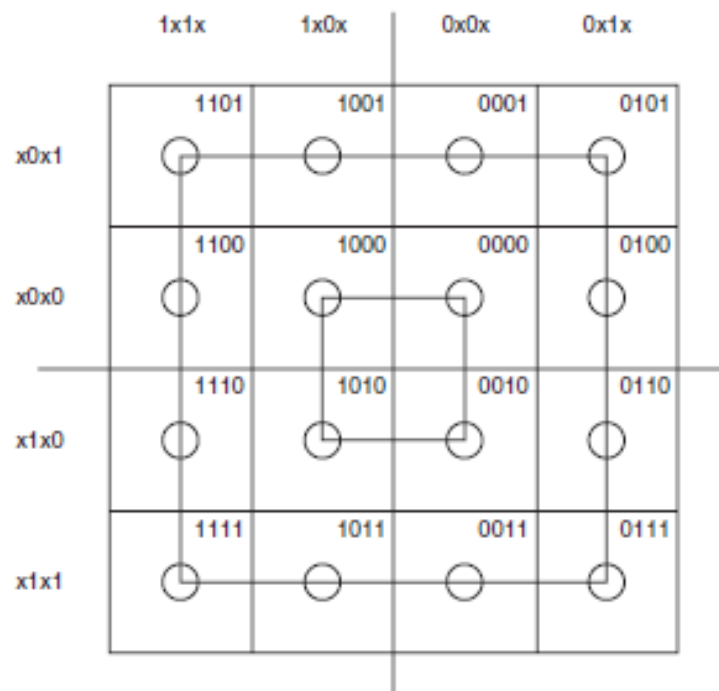


Figura 2.2: Constelação 16-square QAM.

A imagem exibe uma constelação 16-QAM (Modulação de Amplitude em Quadratura), estruturada como uma matriz quadrada 4×4 com 16 pontos distintos. Devido ao seu tamanho, cada símbolo é capaz de transportar quatro bits de informação ($\log_2 16$). Esta

constelação emprega o Código de Gray, uma técnica essencial que assegura que quaisquer símbolos adjacentes (vizinhos) difiram em apenas um bit. O principal objetivo do Código de Gray é minimizar a Taxa de BER (*Bit Error Rate* - Taxa de Erro de Bit), pois o erro mais provável em um canal ruidoso (a seleção de um símbolo vizinho) resulta no menor erro de bit possível.

O desempenho do 16-QAM é frequentemente avaliado pela probabilidade de erro de símbolo, que pode ser representada em gráficos de BER (*Bit Error Rate* - Taxa de Erro de Bit) *versus* SNR (*Signal to Noise* - Relação Sinal-Ruído), como ilustrado no Capítulo 3 do livro *RF and Digital Signal Processing for Software Defined Radio* (Rouphael, 2008).

2.5 FEC (*Forward Error Correction* - codificação de canal)

A Codificação de Canal é essencial em todos os sistemas de comunicação para garantir comunicações confiáveis e eficientes. O processo envolve: Adicionar redundância aos dados transmitidos de maneira controlada. Isso permite que o receptor detecte e corrija erros que ocorrem durante a transmissão. Em essência, a função da codificação de canal é garantir que os dados recebidos sejam idênticos aos dados enviados. O FEC (*Forward Error Correction* - codificação de canal) é crucial para melhorar a confiabilidade da comunicação, provendo capacidades de detecção e correção de erros.(Rowshan et al., 2024)

2.5.1 Códigos Convolucionais

Os CCs (*Convolutional Codes* - Códigos Convolucionais) são uma classe de códigos de controle de erro lineares (sinalizados por Peter Elias em 1955) que se distinguem por sua natureza sequencial. Isso significa que a Palavra-código de saída gerado em um dado momento não depende apenas da informação de entrada atual, mas também dos bits de entrada anteriores, que são armazenados na memória do código. Na prática, o processo de codificação é feito de forma eficiente por meio de registradores de deslocamento, e o codificador funciona como uma máquina de estados finitos. A cada passo de tempo, o codificador de taxa k/n (lê k bits de entrada e produz n bits de saída) realiza uma transição de estado. (Rowshan et al., 2024)

2.5.2 LDPC (*Low-Density Parity-Check* - Verificação de Paridade de Baixa Densidade)

Os códigos LDPC(*Low-Density Parity-Check* - Verificação de Paridade de Baixa Densidade), foram introduzidos por Robert G. Gallager em sua tese de doutorado no MIT(*Massachusetts Institute of Technology* - Instituto de Tecnologia de Massachusetts). no início da década

de 1960 e redescobertos por MacKay e Neal em meados dos anos 1990, são uma classe de códigos de bloco lineares.

A sua característica mais importante é que são capazes de operar extremamente perto da capacidade do canal. Além disso, este desempenho é alcançado sob a decodificação iterativa por BP (*Belief Propagation* - Propagação de crenças), também conhecida como decodificação por MP (Passagem de mensagens - *Message-Passing*), que tem uma complexidade linear no comprimento do bloco dos códigos.

Devido à sua importância em cenários que exigem altas taxas de dados, baixa latência e transmissão extremamente confiável, como o eMBB (*Enhanced Mobile Broadband* - Banda larga móvel aprimorada), os códigos QC-LDPC (*Quasi-Cyclic Low-Density Parity-Check* - Verificação de paridade de baixa densidade quase cíclica) foram selecionados como um dos esquemas de codificação de canal no padrão 5G NR (*New Radio* - Nova Rádio) pelo 3GPP (*Third Generation Partnership Project* - Projeto de Parceria de Terceira Geração). (Rowshan et al., 2024)

2.6 *Software Defined Radio* (SDR)

O Rádio Definido por *Software* é conceituado pelo Fórum SDR como um rádio no qual algumas ou todas as funções da camada física são definidas por *software*. Isto implica que a arquitetura é flexível para que o rádio possa ser configurado, ocasionalmente em tempo real, para se adaptar a vários padrões e formas de onda de ar, bandas de frequência, larguras de banda e modos de operação. Ou seja, o SDR é um rádio multifuncional, programável e fácil de atualizar que pode suportar uma variedade de serviços e padrões, ao mesmo tempo que oferece uma solução de baixo custo e eficiência energética. (Rouphael, 2008)

Capítulo 3

Metodologia

Esta seção detalha a abordagem experimental e comparativa, com o objetivo de analisar o impacto das condições reais da rede Wi-Fi ofertado para alunos do IFPB Campus Campina Grande na escolha de modulação e codificação em um sistema ponto-a-ponto SDR. A metodologia foi estruturada em etapas que abrangem desde a coleta de dados reais até a simulação e análise dos resultados.

3.1 Coleta de Dados da Rede Wi-Fi

1. Realização de medições em alguns dos laboratórios do campus, considerando diferentes horários e densidade de usuários;
2. Parâmetros a serem coletados: Latência, *Jitter*, Perda de pacotes, *Throughput*;
3. Utilização de ferramentas de análise de rede e *software* de monitoramento compatível com Wi-Fi.

3.2 Análise Comparativa e Identificação de Padrões

1. Organização dos dados coletados em planilhas para tratamento estatístico;
2. Identificação de padrões de desempenho;
3. Comparação dos parâmetros medidos com métricas de referência para redes Wi-Fi.

3.3 Simulação de Sistema SDR

1. Implementação de um sistema ponto-a-ponto em GNU Radio, considerando as condições reais da rede;
2. Teste de diferentes esquemas de modulação: BPSK, QPSK e 16-QAM;

3. Aplicação de técnicas de codificação de canal para verificar melhoria na confiabilidade e eficiência da comunicação.

3.4 Materiais e Métodos

Foram realizadas consultas bibliográficas com base em livros, artigos científicos, trabalhos acadêmicos e revistas especializadas nas áreas de Redes de Computadores, QoS (*Quality of Service* - Qualidade do Serviço), SDR (Software Defined Radio - Rádio Definido por Software), Modulação Digital e Simulações de Sistemas de Comunicação. Para a componente prática e o desenvolvimento dos fluxogramas, foram consultados repositórios de código-fonte no GitHub, especialmente para referências de código Python aplicável. Além disso, foram utilizados vídeos tutoriais disponíveis em plataformas como o YouTube, com enfoque prático no uso do GNU Radio. Todas essas fontes serviram de base teórica e técnica para fundamentar as análises, simulações e interpretações dos dados obtidos.

3.5 Ferramentas

- **Speedtest:** Usado para medir a latência da conexão em diferentes momentos e locais;
- **WiFi Analyzer:** utilizado para mapear a intensidade do sinal Wi-Fi, identificar canais sobrecarregados e analisar a qualidade geral do sinal nos laboratórios;
- **Planilha Google:** Organizar em tabelas os dados coletados;
- **Python (Pandas, Matplotlib, numpy e SciPy):** para análise dos dados e geração de gráficos comparativos;
- **Google Colab:** Para execução e documentação das análises computacionais;
- **GNU Radio:** Para implementação e simulação dos esquemas de modulação e codificação;
- **Visual Studio Code:** editor de código-fonte leve e altamente configurável, utilizado para o desenvolvimento e edição de *scripts* em Python empregados na programação e personalização de blocos no GNU Radio.

3.6 Avaliação e Comparação de Resultados

1. Comparação do desempenho das modulações em termos de *throughput*, taxa de erro de bits (BER) e robustez frente às condições reais da rede;
2. Identificação das melhores combinações de modulação e codificação para otimização da comunicação em ambientes Wi-Fi reais;
3. A partir dos resultados obtidos, serão propostas recomendações sobre a escolha de modulação e codificação em sistemas SDR para ambientes Wi-Fi similares ao do IFPB CG.

Capítulo 4

Pesquisa de Campo

A coleta de dados foi realizada nos laboratórios do IFPB – Campus Campina Grande. Dentre os diversos laboratórios existentes no campus, foram selecionados os 10 mais utilizados pelos estudantes dos cursos superiores de Tecnologia em Telemática e Engenharia da Computação nos turnos matutino e vespertino. As medições foram feitas na rede "IFPB-ALUNO", utilizando um *smartphone* Samsung Galaxy A53 como equipamento de teste. Os aplicativos empregados foram o *Speedtest* (para aferir *throughput* de transmissão e recepção, *Ping*, *Jitter* e Perda de Pacotes) e o WiFi Analyzer (para monitorar a intensidade do sinal em dBm e a frequência de operação). As medições ocorreram em diferentes dias e horários, com o objetivo de obter uma amostra representativa do desempenho da rede em distintas condições de uso.

Laboratórios selecionados:

- 1 Laboratório de Informática 1 (LAB INF 01)
- 2 Laboratório de Programação 1 (LABPROG 01)
- 3 Laboratório de Programação 2 (LABPROG 02)
- 4 Laboratório de Programação 3 (LABPROG 03)
- 5 Laboratório de Programação 4 (LABPROG 04)
- 6 Laboratório de Telecomunicações (LABTELECOM)
- 7 Laboratório de Sistemas Embarcados, Controle e Automação (LABSISECA)
- 8 Laboratório de Eletrônica Analógica (LAB ANALOG)
- 9 Laboratório de Eletrônica Digital (LAB DIG)
- 10 Laboratório de Hardware e Prototipagem (LABHARDPRO)

A coleta de dados foi estruturada em duas etapas distintas, planejadas para capturar o comportamento em dias de maior e menor fluxo de alunos do ensino superior no campus.

4.1 Primeira Etapa: Menor Fluxo

A primeira etapa de coleta ocorreu em uma sexta-feira, no dia 30 de maio de 2025, escolhida estrategicamente por ser o dia com menor fluxo de estudantes do ensino superior. Nesse dia, foram realizadas duas medições:

- Turno da Manhã: A medição estendeu-se das 08:05:35h até as 10:45:01h.
- Turno da Tarde: A segunda medição foi mais breve, ocorrendo das 14:00:29h até as 14:38:45h.

Tabela 4.1: Medições do dia 30 de Maio de 2025

Laboratório		Speed Test				WiFi Analyzer		
		Download	Upload	Ping	Jitter	Loss	Frequência	dBm
Nome	Horário	(Mbps)	(Mbps)	(Latência)	(ms)		(MHz)	
Info 1	08:35:28	-	-	-	-	-	-	≈ -90
Prog 1	08:38:45	3,35	6,14	276,7	108,28	0	2462	-72
Prog 2	08:48:51	3,77	5,92	39,52	1,56	0	2412	-72
Prog 3	08:54:20	-	-	-	-	-	-	≈ -90
Prog 4	08:51:42	2,72	7,79	40,3	1,54	0	2412	-70
Telecom	08:27:33	-	-	-	-	-	-	≈ -90
Labsiseca	08:05:35	-	-	-	-	-	-	≈ -90
Lab analog	08:42:05	-	-	-	-	-	-	≈ -90
lab dig	08:37:49	-	-	-	-	-	-	≈ -90
Labhardpro	10:45:01	3,35	5,93	259,67	13,38	0	2437	-61
Info 1	14:06:11	0,39	6,14	48,44	3,48	0	2462	-59
Prog 1	14:16:07	1,57	5,03	300,45	323,23	0	2412	-69
Prog 2	14:17:22	3,35	6,23	204,08	2,89	0	2412	-70
Prog 3	14:20:05	-	-	-	-	-	-	≈ -90
Prog 4	14:19:20	-	-	-	-	-	-	≈ -90
Telecom	14:38:45	0,07	5,67	77,33	29,61	0	2462	-37
Labsiseca	14:04:56	0,2	5,34	47,64	1,31	0	2462	-35
Lab analog	14:10:26	3,77	6,03	78,89	50,33	0	2462	-58
lab dig	14:08:06	3,34	5,29	252,34	44,53	0	2462	-58
Labhardpro	14:00:29	0,13	4,77	201,63	0,69	0	2462	-71

4.2 Segunda Etapa: Maior Fluxo

A segunda etapa ocorreu na segunda-feira, dia 02 de junho de 2025, caracterizado pelo maior fluxo de alunos. As duas medições neste dia foram concentradas no período vespertino:

- Primeira Medição Vespertina: Realizada das 14:09:14h até as 14:25:05h.
- Segunda Medição Vespertina: Ocorreu no final da tarde, das 17:31:06h até as 17:45:30h

Tabela 4.2: Medições do dia 2 de junho de 2025

Laboratório		Speed Test				WiFi Analyzer		
		Download	Upload	Ping	Jitter	Loss	Frequência	dBm
Nome	Horário	(Mbps)	(Mbps)	(ms)	(ms)		(MHz)	
Info 1	14:09:14	0,24	5,69	44,18	0,71	0	2412	-86
Prog 1	14:20:44	3,76	6,44	43,45	0,47	0	2412	-51
Prog 2	14:22:21	3,35	5,93	91,32	20,5	0	2412	-51
Prog 3	14:25:05	-	-	-	-	-	-	≈ -90
Prog 4	14:24:02	1,88	1,83	435,11	132,54	0	2412	-50
Telecom	14:11:06	0,61	5,83	43,44	0,53	0	2437	-48
Labsiseca	14:12:43	0,58	5,93	248,82	278,04	0	2437	-48
Lab analog	14:17:02	-	-	-	-	-	-	≈ -90
lab dig	14:15:54	0,37	5,72	203,67	11,23	0	2437	-43
Labhardpro	14:14:18	1,88	11,98	202,8	11,98	0	2437	-43
Info 1	17:31:06	0,82	5,4	135,24	84,66	0	2437	-51
Prog 1	17:42:47	3,78	5,93	45,63	2,7	0	2437	-73
Prog 2	17:44:11	3,35	6,86	241,98	35,01	0	2437	-72
Prog 3	17:46:43	1,46	1,63	259,93	65,2	0	2437	-85
Prog 4	17:45:30	3,77	3,75	44,46	1,47	0	2437	-72
Telecom	17:32:50	3,35	5,2	288,94	29,33	0	2437	-62
Labsiseca	17:34:08	2,73	5,1	301,6	40,26	0	2437	-85
Lab analog	17:40:05	-	-	-	-	-	-	≈ -90
lab dig	17:37:02	0,53	5,0	60,21	22,14	0	2437	-83
LabHardProg	17:35:30	3,34	5,3	272,66	23,64	0	2437	-80

O Técnico responsável pela rede, Átila de Souza Medeiros, foi consultado e indicou a localização aproximada dos Aps:



Figura 4.1: Laboratórios escolhidos e localização dos Pontos de Acesso.

Observa-se, que o único ponto de acesso próximo aos laboratórios selecionados está localizado na área de vivência. Isso ocorre porque o campus não disponibiliza um acesso estável à rede sem fio nos laboratórios, uma vez que todos eles contam com conexão via cabo.

Apesar dos estudantes do Ensino Superior necessitarem de uma conexão móvel estável considerando que muitos utilizam dispositivos para fins acadêmicos e profissionais, especialmente aqueles que também exercem atividades laborais, essa demanda não tem recebido a devida atenção. Isso se deve, em grande parte, ao fato de que a maioria dos estudantes do campus pertence ao Ensino Médio, público que, conforme a Lei nº 15.100/2025, é legalmente proibido de utilizar dispositivos eletrônicos em ambientes acadêmicos.

O AP (*Access Point* - Ponto de acesso) externo localizado na área de vivência é o modelo Huawei AP8130DN com padrão IEEE 802.11ac de alto desempenho, com proteção IP67 e alimentação PoE (*Power over Ethernet* - Alimentação via Ethernet) 802.3at. Equipado com tecnologia 3x3 MIMO (*Multiple Input, Multiple Output* - Múltiplas Entradas, Múltiplas Saídas), ele suporta até 256 usuários simultâneos e oferece taxa máxima de 1,75 Gbit/s, podendo alcançar até 2,6 Gbit/s em operação Dual-5G. Essa elevada performance é obtida principalmente pela utilização da modulação de alta ordem 256-QAM no rádio de 5 GHz, permitindo atingir taxas de até 1,3 Gbit/s. (Huawei Technologies Co., Ltd., 2016)

Apesar de o dispositivo operar através de uma gama de modulações diferentes dependendo da qualidade do sinal, este estudo prioriza a análise de modulações de ordem inferior, como BPSK, QPSK e 16-QAM, com o objetivo de avaliar o comportamento da QoS degradada no campus, mesmo diante da presença de um AP de qualidade. Tal abordagem possibilita investigar a confiabilidade e o alcance da comunicação em condições de sinal fraco, cenário comum em ambientes com obstáculos, interferências e maior distância do ponto de acesso.

O equipamento também implementa a Seleção Adaptativa de Taxa de Bits, que permite alternar entre BPSK (maior robustez), QPSK (equilíbrio entre taxa e estabilidade) e 16-QAM (taxa intermediária), o que pode assegurar a manutenção da conectividade em situações adversas. Além disso, apresenta elevada sensibilidade a sinais fracos (ex.: -95 dBm para BPSK).

4.3 Análise Comparativa

- Média do *Throughput* de *Download* (Mbps)

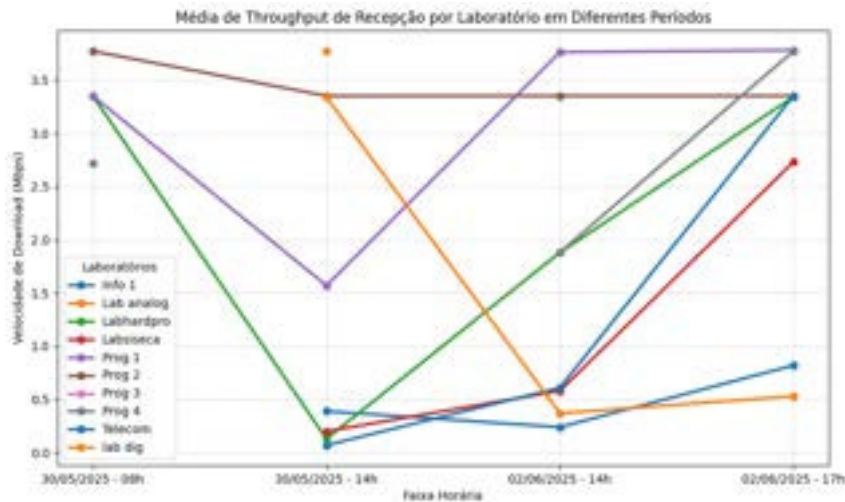


Figura 4.2: Média de *Throughput* de Recepção por Laboratório em Diferentes Períodos.

A análise do desempenho da rede revela uma estrutura capaz de atingir altas velocidades, mas marcada por instabilidade acentuada e variações extremas ao longo do período de observação. Observa-se picos de alta performance concentrados nos extremos (02/06 - 17:00) onde a maioria dos laboratórios registrou *throughputs* acima de 3,3 Mbps, demonstrando a capacidade máxima da rede em torno de 3,8 Mbps. No entanto, a principal característica de vulnerabilidade se manifesta na queda generalizada de 30/05 - 14:00. O ponto de medição de 30/05 - 08:00 deve ser interpretado com cautela: o fato de vários laboratórios estarem sem dados neste momento sugere que a rede estava com velocidades tão baixas que os aplicativos de monitoramento não conseguiram sequer registrar os valores, indicando uma falha de acesso ou lentidão extrema já no início do dia.

Apesar da instabilidade sistêmica, o desempenho individual dos laboratórios mostrou perfis distintos. O Laboratório de Programação 2 (Prog 2) destacou-se pela estabilidade e alta performance, mantendo-se consistentemente entre 3,3 e 3,8 Mbps em todos os horários, contrastando com o Laboratório de Eletrônica Digital (Lab dig), que exibiu a maior volatilidade, registrando o maior pico inicial (em 30/05 - 08:00, onde os dados foram capturados) seguido pela queda mais acentuada e uma recuperação parcial. Por sua vez, o Laboratório de Programação 3 (Prog 3) permaneceu em um *throughput* cronicamente baixo, consistentemente abaixo de 1 Mbps. Outros laboratórios, como o Prog 4, Labhardpro, Labsiseca, e Telecom, exibiram um padrão de colapso e recuperação progressiva, convergindo notavelmente para o pico máximo no último ponto de medição, indicando a liberação da capacidade total da rede.

De modo geral, a rede demonstra a capacidade inerente de entregar alta velocidade, especialmente em momentos de baixa demanda (17:00). Contudo, a inconsistência acen- tuada (Prog 2 estável, Lab dig volátil, Prog 3 baixo) e a vulnerabilidade à saturação observada em 30/05 - 14:00, além da falha de registro em 30/05 - 08:00, apontam para a necessidade de investigar fatores localizados e sistêmicos. As variações podem ser atri- buídas a elementos como a distância dos pontos de acesso, a configuração específica do equipamento de cada laboratório ou a quantidade de usuários ativos, enquanto a alta per- formance no final do expediente é um indicativo de que a menor quantidade de dispositivos conectados permite o acesso à capacidade total da infraestrutura.

- Média do *Throughput* de *Upload* (Mbps)

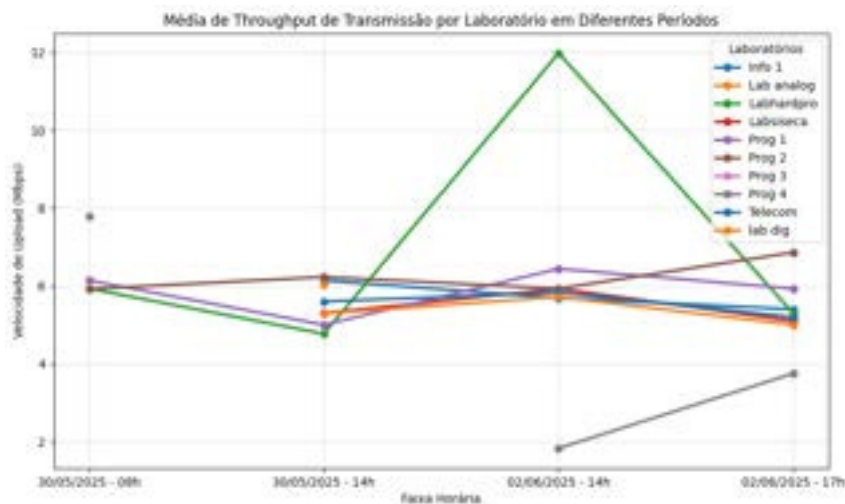


Figura 4.3: Média de *Throughput* de Transmissão por Laboratório em Diferentes Períodos.

O Laboratório Labhardpro é o grande destaque, e a principal anomalia. Após iniciar com um *throughput* moderado, ele exibe um pico extremo de 12 Mbps em 02/06 - 14:00, o valor máximo registrado na medição. Essa velocidade é quase o dobro da média dos outros laboratórios, sugerindo um comportamento atípico (talvez uma única transmissão de alta banda em andamento) ou uma configuração de rede otimizada naquele momento. Sua velocidade cai drasticamente para cerca de 5,2 Mbps no último ponto.

O Laboratório Prog 2 e o Prog 1 demonstram a maior estabilidade e consistência de *upload*. O Prog 2 manteve-se próximo ou acima de 6 Mbps em todos os pontos, terminando com o maior *upload* (6,8 Mbps) em 02/06 - 17:00. O Prog 1 (e o Prog 4 em 30/05 - 08:00) também se mantiveram na faixa de 5,5 Mbps a 6,5 Mbps por boa parte do período.

A maioria dos outros laboratórios, incluindo Labsiseca (Vermelho), Lab analog (Laranja), Info 1 (Azul Claro) e Telecom (Azul Escuro), agrupam-se em uma faixa mais estreita, flutuando entre 5 Mbps e 6 Mbps, mostrando pouca variação significativa ao longo dos horários.

O Laboratório de Programação 4 apresenta um comportamento de baixa performance nos pontos centrais (30/05 - 14:00 e 02/06 - 14:00), registrando um *throughput* de apenas 2 Mbps em 02/06 - 14:00, e só se recupera parcialmente para cerca de 3,8 Mbps no final, indicando uma restrição ou problema crônico de *upload*.

- Média do *Ping* (ms)

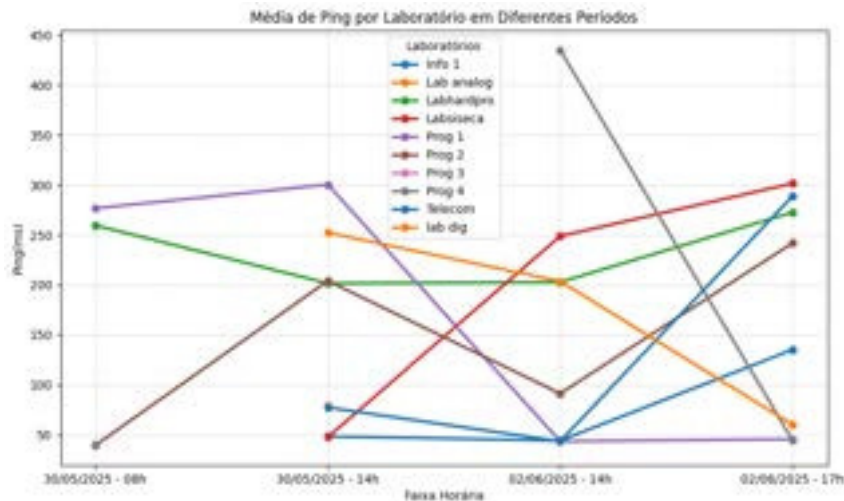


Figura 4.4: Média de *Ping* por Laboratório em Diferentes Períodos.

O gráfico de Média de *Ping* (ms) revela uma rede com latência não apenas alta, mas também extremamente volátil, um indicador de má qualidade de serviço. A latência média para a maioria dos laboratórios concentra-se perigosamente entre 50 ms e 300 ms, muito acima do ideal para uso interativo. O principal problema de instabilidade é exemplificado pelo Laboratório Prog 4, que salta de um valor baixo (cerca de 40 ms) para um pico alarmante de 430 ms em 02/06 - 14:00, sugerindo saturação severa ou congestionamento em seu ponto de conexão. O Labsiseca também demonstra uma clara tendência de piora, terminando no *ping* mais alto da última medição (300 ms). Além disso, a ausência de dados para vários laboratórios em 30/05 - 08:00 reforça a tese de uma falha de acesso ou lentidão extrema já no início do dia, pois o aplicativo de monitoramento não conseguiu registrar os valores, indicando um problema de base na conectividade.

Apesar da alta latência generalizada, alguns laboratórios demonstram potencial de melhoria. Info 1 e Prog 3 atingem o *ping* mínimo de toda a série (cerca de 40 ms) em 02/06 - 14:00, mostrando que a rede tem capacidade para fornecer latência baixa em condições ideais para esses pontos de acesso. No entanto, o período das 14:00 é de extremos, pois enquanto alguns atingem o mínimo, o Prog 4 atinge o máximo histórico, evidenciando uma separação crítica na qualidade do serviço em diferentes pontos. Em resumo, a alta latência média e a volatilidade acentuada são os principais problemas destacados, sugerindo que a rede está consistentemente sobrecarregada ou mal configurada em diversos segmentos, prejudicando severamente a experiência do usuário.

- Média do *Jitter* (ms)

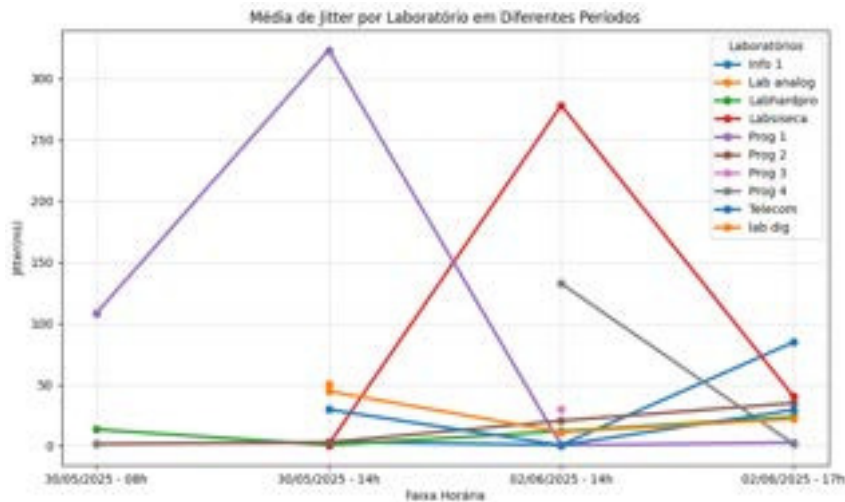


Figura 4.5: Média de *Jitter* por Laboratório em Diferentes Períodos.

O gráfico de Média de *Jitter* (ms), que indica a variação da latência e é crucial para a qualidade de aplicações de tempo real (como VoIP), revela um cenário de extrema instabilidade com picos isolados que comprometem severamente a Qualidade de Serviço (QoS). O problema de instabilidade é dramaticamente exemplificado pelo Laboratório Prog 1, que apresenta o pico de *jitter* mais alto de toda a medição, atingindo cerca de 320 ms em 30/05 - 14:00. Este comportamento sugere um problema de congestionamento massivo e temporário ou uma atividade de rede intensa naquele laboratório. De forma semelhante, o Laboratório Labsiseca registra um pico de 280 ms em 02/06 - 14:00, e o Prog 4 exibe um pico de 135 ms no mesmo horário. Esses picos momentâneos tornariam a comunicação interativa inviável. É importante notar que a ausência de dados para vários laboratórios em 30/05 - 08:00 sugere uma falha de acesso ou lentidão extrema da rede que impediu o registro dos valores de monitoramento.

No entanto, a rede demonstrou capacidade de controle de *jitter* em outros segmentos. Os laboratórios Labhardpro e Telecom se destacam por apresentar o melhor controle de *jitter*, mantendo-se consistentemente baixos (em sua maioria abaixo de 20 ms) ao longo dos pontos de medição. Isso indica que a infraestrutura é capaz de gerenciar o tráfego de forma mais eficaz e estável para esses laboratórios, servindo como referência de um bom controle de QoS. Os laboratórios Prog 3 e Lab dig também atingem valores de *jitter* baixos no final da medição, após picos moderados.

Em conclusão, a rede é marcada pela ocorrência de picos extremos e isolados de *jitter*, evidenciando uma falha na infraestrutura ou na gestão do tráfego que causa oscilações maciças no tempo de entrega dos pacotes em laboratórios como Prog 1, Labsiseca e Prog 4, principalmente por volta das 14:00. Esta instabilidade sugere que, embora a capacidade de transmissão possa existir, a qualidade da rede para serviços sensíveis ao

atraso é inadequada e imprevisível na maioria dos horários. As variações extremas são problemas localizados ou de gestão de tráfego, já que o desempenho estável de Labhardpro e Telecom prova que o controle de *jitter* é tecnicamente possível na rede.

- Média do dBm

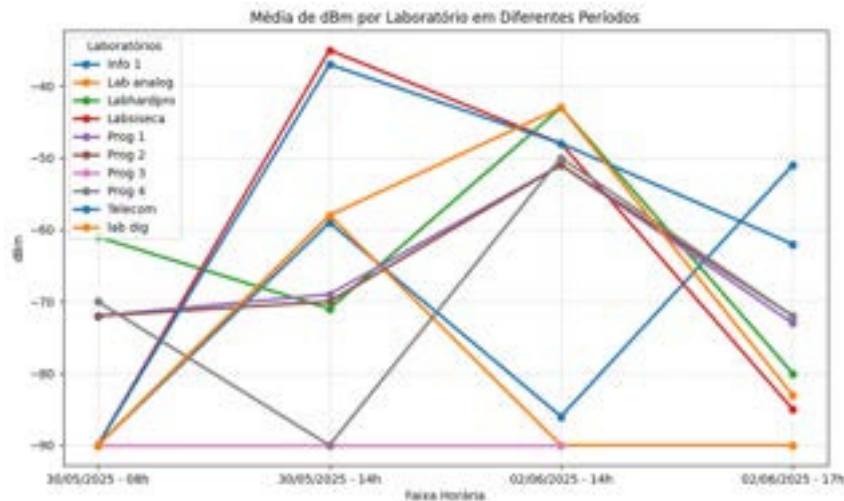


Figura 4.6: Média de dBm por Laboratório em Diferentes Períodos.

O gráfico de Média de dBm mede a intensidade do sinal sem fio, onde valores menos negativos (mais próximos de zero) indicam um sinal mais forte e de melhor qualidade. A análise revela uma grande volatilidade e disparidade na intensidade do sinal entre os laboratórios. Em 30/05 - 14:00, Labsiseca e Info 1 atingem o pico máximo de sinal, próximo a -38 dBm, um nível excelente. No entanto, o Laboratório Prog 3 mantém o pior e mais cronicamente fraco sinal em toda a medição, permanecendo consistentemente em -90 dBm. Este valor representa uma conexão extremamente fraca ou quase inexistente, que é o principal fator limitante para o baixo *throughput* e alta latência observados anteriormente para este laboratório.

A dinâmica do sinal é marcada por oscilações bruscas. A última medição em 02/06 - 17:00 é notável por uma queda generalizada na intensidade do sinal, com a maioria dos laboratórios caindo para a faixa de -70 dBm a -85 dBm (sinal fraco a muito fraco), exceto o Info 1. O Lab dig (Laranja) exemplifica essa flutuação drástica, caindo de -42 dBm para -85 dBm neste período. Essa volatilidade extrema, especialmente em laboratórios como Labsiseca e Info 1, sugere que os pontos de acesso (APs) podem estar passando por mudanças de potência, interferência externa, ou que o padrão de tráfego está afetando a qualidade de sinal percebida.

Em conclusão, a intensidade do sinal é altamente variável, indicando que os laboratórios estão em locais com diferentes distâncias ou obstruções em relação aos APs. A falha crônica do Prog 3 é diretamente atribuída à sua fraca intensidade de sinal. É paradoxal

notar que a queda generalizada de sinal em 02/06 - 17:00 coincide com os maiores picos de *throughput* de *download* e *upload*. Isso sugere que, embora o sinal estivesse tecnicamente mais fraco, a baixa demanda de usuários na rede neste horário permitiu que a largura de banda fosse totalmente utilizada, superando o impacto negativo da pior qualidade de sinal percebida.

Capítulo 5

Estratégia de Mapeamento dos Dados de Campo para o Simulador SDR

Para transpor os dados coletados na rede Wi-Fi real (Camada de Rede/Aplicação) para os parâmetros de rádio exigidos na simulação do sistema SDR ponto-a-ponto (Camada Física), é necessário estabelecer uma metodologia de mapeamento que defina o insumo do canal. Esta estratégia é dividida em dois passos cruciais: a estimativa da Relação Sinal-Ruído (SNR) e a validação do modelo de canal via Perda de Pacotes.

5.1 Mapeamento do Sinal: RSSI para SNR

A SNR (*Signal to Noise* - Relação Sinal-Ruído) é o parâmetro fundamental que determina a viabilidade de um dado esquema de MC (*Modulation and Coding* - Modulação e Codificação) e, conseqüentemente, a Taxa de BER (*Bit Error Rate* - Taxa de Erro de Bit). No GNU Radio, a SNR é utilizada para configurar o nível de AWGN (*Additive White Gaussian Noise* - Ruído Gaussiano Branco Aditivo) injetado no canal. A SNR é calculada, em decibéis (dB), pela diferença entre RSSI (*Received Signal Strength Indication* - Indicação da intensidade do sinal recebido) ou dBm e o *Noise Floor* (Piso de ruído) do ambiente:

$$\text{SNR (dB)} = \text{RSSI (dBm)} - \text{Noise Floor (dBm)}$$

Para aplicar essa fórmula, foram utilizados os valores médios de RSSI coletados em cada laboratório. Uma vez que a medição direta da potência de ruído é complexa em um ambiente de campus, foi assumido um *Noise Floor* conservador de -90 dBm, um valor que reflete a interferência e o ruído térmico típicos de um ambiente interno com alta densidade de dispositivos. O cálculo da SNR média para cada cenário de coleta se tornará, então, o parâmetro de entrada do modelo de canal nas simulações SDR.

5.2 Passo a Passo do Mapeamento

Em ambientes de rede Wi-Fi, *Noise Floor* é geralmente a soma do ruído térmico natural e da interferência de outras fontes (outros APs, dispositivos, etc.). Para um ambiente acadêmico com alta densidade de usuários e múltiplos APs (como o IFPB-CG), um valor de N_{floor} entre -90 dBm e -95 dBm é realista e conservador. Para fins de simulação, será adotado um $N_{floor} = -90$ dBm como o nível de ruído constante para todos os laboratórios.

Tabela 5.1: Cenários de Teste de Qualidade de Sinal Wi-Fi

Cenário	Descrição do Teste	RSSI	Noise Floor	SNR	Status
Sinal Forte	Telecom 30/05(Tarde)	-37	-90	$(-37) - (-90) = 53$	Ótimo
Sinal Médio	Prog 4 02/06(Tarde)	-50	-90	$(-50) - (-90) = 40$	Bom
Sinal Fraco	Prog 2 02/06(Tarde)	-72	-90	$(-72) - (-90) = 18$	Razoável
Sinal Muito Fraco	Info 1 02/06(Tarde)	-86	-90	$(-86) - (-90) = 4$	Crítico

Os valores de SNR calculados (53 dB, 40 dB, 18 dB, 4 dB) serão os parâmetros de entrada para configurar o bloco de Ruído Gaussiano Branco Aditivo (AWGN) no *flowgraph* do GNU Radio.

5.3 Validação do Canal: Perda de Pacotes para BER Mínima

A PER (*Packet Error Rate* - Taxa de Erro de Pacotes) coletada em campo é essencial para validar se o desempenho simulado na Camada Física (BER) é coerente com a experiência real da Camada de Rede. Embora Latência e *Jitter* sejam fortes indicadores da instabilidade do canal, a Perda de Pacotes, que é o resultado final de erros de bit não corrigidos, servirá como o limite superior prático para a Validação da Simulação. Nos cenários onde a Perda de Pacotes foi próxima de zero ($PER \approx 0\%$), espera-se que os esquemas de MC selecionados para a SNR dos laboratórios resultem em uma Taxa de Erro de Bit (BER) extremamente baixa (tipicamente menor que 10^{-5}) para validar a coerência do modelo. Decisão de Modulação: A Perda de Pacotes alta ($PER > 0\%$) indicará os limites de tolerância do canal real, orientando a escolha dos MC mais robustos (como BPSK ou QPSK com códigos de alta redundância) para cenários de baixa SNR.

Apesar do $Loss = 0$ na maioria dos casos, o *Ping* e o *Jitter* são altíssimos no Prog 4. Isso indica que, embora os pacotes perdidos sejam zero, o canal está sofrendo de congestão ou forte interferência

Capítulo 6

Simulações SDR

6.1 4 cenários de SNR mapeados dos laboratórios

Foram escolhidos estrategicamente quatro laboratórios para o cenário de simulação, de forma a representar diferentes condições de sinal na rede. O primeiro laboratório foi o de Telecomunicações (Lab Telecom), durante a tarde do dia 30 de maio, onde o sinal medido foi forte, com RSSI de 37 dBm. Considerando o *Noise Floor* de 90 dBm, a SNR resultante foi de 53 dB, classificada como ótima e de alta eficiência. Já o Laboratório de Programação 4 (Prog 4), em 02/06 à tarde, apresentou sinal médio, com RSSI de 50 dBm e *Noise Floor* de 90 dBm, fornecendo uma SNR de 40 dB e desempenho considerado bom, indicando um sinal robusto. No Laboratório de Programação 2 (Prog 2), também em 02/06 à tarde, o sinal foi fraco, com RSSI de 72 dBm e *Noise Floor* de 90 dBm, resultando em SNR de 18 dB, desempenho razoável e exigindo manutenção e cuidados mais rigorosos. Por fim, o Laboratório de Informática 1 (Info 1), em 02/06 à tarde, apresentou sinal muito fraco, com RSSI de 86 dBm e *Noise Floor* de 90 dBm, gerando SNR de apenas 4 dB, classificada como crítica, situação em que apenas modulações mais resistentes, como BPSK, seriam viáveis. Esses quatro cenários fornecem uma visão abrangente das condições de sinal na rede, permitindo avaliar o desempenho de diferentes modulações e estratégias de codificação sob situações reais de campo, desde sinais ótimos até críticos.

As simulações de BPSK, QPSK e 16QAM foram geradas a partir do seguinte *Flowgraph* (Figura 6.1):

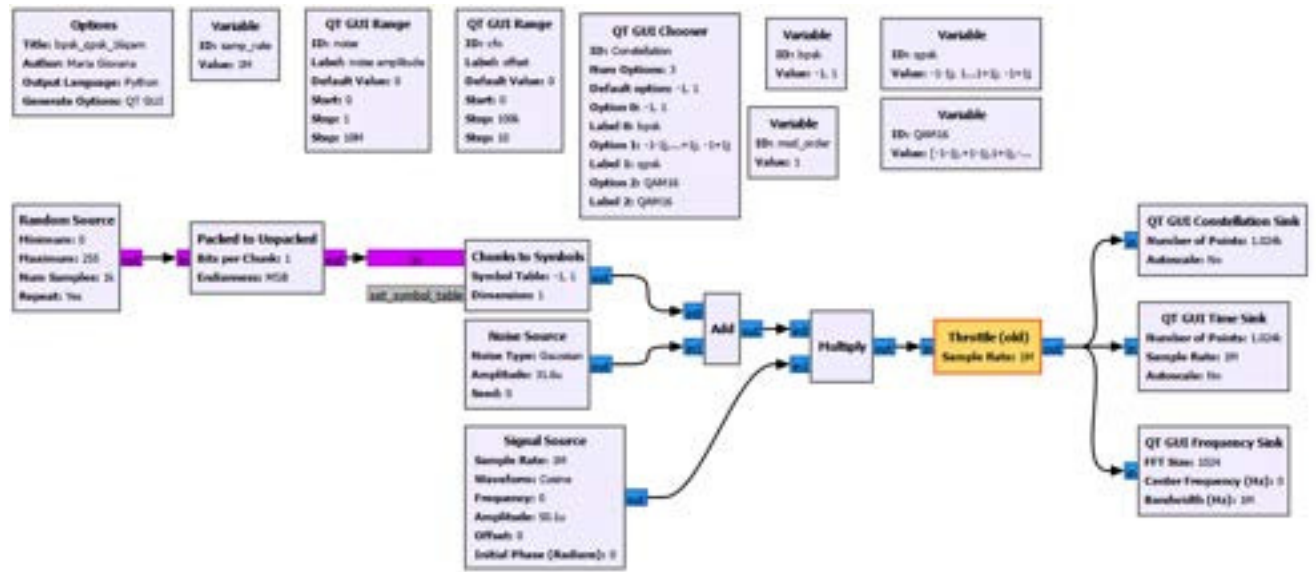


Figura 6.1: *GNU Radio Flowgraph* das modulações(BPSK, QPSK, 16QAM).

Este fluxograma do GNU Radio implementa um sistema de comunicação digital projetado para simular cenários de modulação BPSK, QPSK e 16QAM. Seu objetivo principal é varrer diferentes níveis de Relação Sinal-Ruído (SNR), medir a Taxa de Erro de Bit (BER) e salvar os dados para análise externa. O sistema é estruturado em três seções lógicas: Transmissor, Canal e Receptor.

O Transmissor é composto pelo *Random Source* (Fonte aleatória) que gera o fluxo de bits de dados e pelo *Packed to Unpacked* (De Empacotado para Desempacotado) que os prepara para a modulação. O bloco chave é o *Chunks to Symbols* (Conversão de blocos em símbolos), que realiza a modulação, convertendo os bits de entrada em símbolos complexos (I/Q). A modulação específica (BPSK, QPSK ou 16QAM) é selecionada por meio do bloco *QT GUI Chooser*, que ajusta a ordem de modulação (mod_order de 1, 2 ou 4 bits por símbolo) e a tabela de constelação correspondente (bpsk, qpsk, QAM16). O sinal modulado é então limitado em sua taxa de fluxo pelo bloco *Throttle (old)* (Regulador de Taxa).

O Canal simula os efeitos de transmissão no mundo real. O sinal de banda-base gerado no transmissor é corrompido pela injeção de Ruído Branco Gaussiano Aditivo (AWGN), gerado pelo bloco *Noise Source*(Fonte de ruído). O ruído é somado ao sinal modulado usando o bloco *Add*, simulando a degradação do sinal durante a propagação. Há também a adição de um *Signal Source*(Fonte de sinal), que, embora não seja o bloco padrão de modelo de canal, pode servir como um sinal de referência ou portadora na simulação, sendo processado pelo bloco *Multiply*(Multiplicar) antes da limitação de taxa.

O Receptor no fluxograma é representado pelos *Sinks* (Destino) de análise. Os blocos *QT GUI Sink*(*Constellation*, *Time* e *Frequency*) recebem o sinal corrompido e o visualizam para análise em diferentes domínios. O *QT GUI Constellation Sink* (Visualizador de Constelação) é crucial, pois exibe o Diagrama de Constelação, permitindo a avaliação visual da distorção de fase e amplitude causada pelo ruído. A função implícita do receptor (recuperação de *timing* e demodulação) e o cálculo final da BER são realizados externamente por um *script* Python auxiliar, utilizando os dados gerados e coletados por estes "*sinks*".

Apesar do fluxograma contar com simulações da modulação 16QAM, foi utilizado outro *Flowgraph* mais específico (Figura 6.2), para melhor visualização dos pontos dispersos no diagrama de constelação, além de incorporar os blocos necessários para a medição da Taxa de Erro de Bit (BER). Este fluxograma mais detalhado simula a cadeia completa de comunicação: o Transmissor inicia com uma *Random Source* (Fonte aleatória) e utiliza um *Constellation Modulator* (Modulador de Constelação) para converter os bits em símbolos 16-QAM com Codificação Diferencial. O sinal modulado é limitado em taxa (*Throttle*) é então passado pelo Modelo de canal, que adiciona Ruído Gaussiano e simula imperfeições de sincronização.

O Receptor e o sistema de medição são mais complexos e precisos, o sinal corrompido primeiro passa pelo *Polyphase Clock Sink* (Sincronizador de Relógio Polifásico), que realiza a crucial Recuperação de Relógio para sincronizar as amostras. Em seguida, o *Constellation Decoder* (Decodificador de Constelações) decodifica os símbolos recebidos. Finalmente, a BER é calculada em tempo real, comparando os bits originais (resgatados via *Virtual Source*) e os bits decodificados (após *Differential Decoder* e *Unpack K Bits*) usando uma operação *XOR*. A contagem de erros é então integrada e normalizada pelo *Integrate* (Integrar) e *Multiply Const* (Multiplicação por Constante) para ser exibida no *QT GUI Number Sink*, fornecendo a métrica de desempenho do sistema.

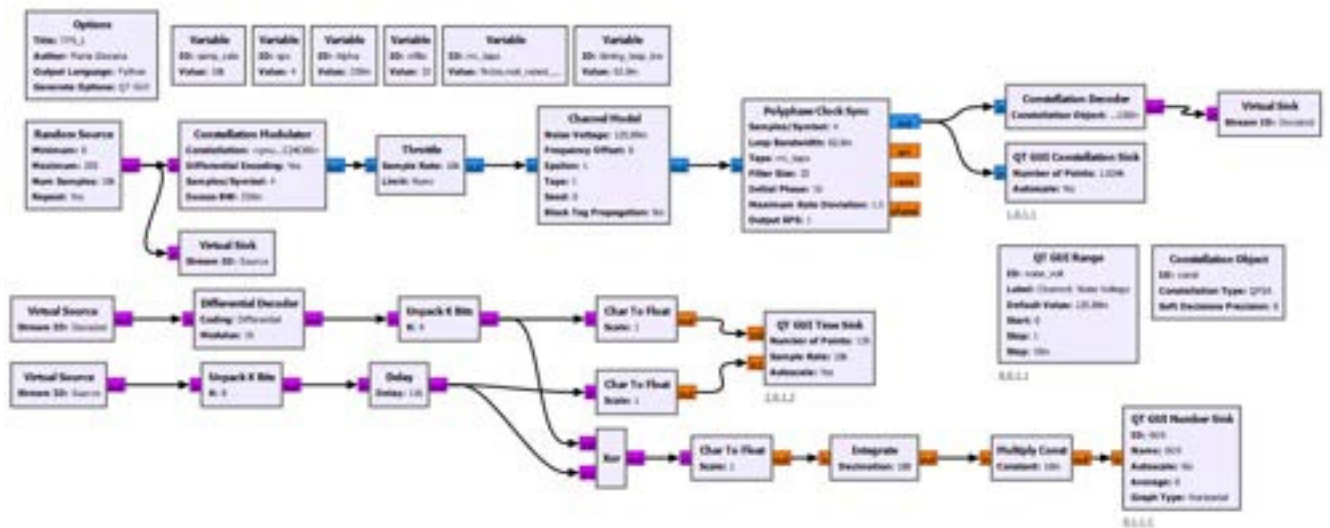


Figura 6.2: GNU Radio Flowgraph 16QAM.

6.1.1 Laboratório de Telecomunicações (30 de maio de 2025 - Tarde):

- BPSK
- A Forma de Onda BPSK no Domínio do Tempo é ilustrada na Figura 6.3.

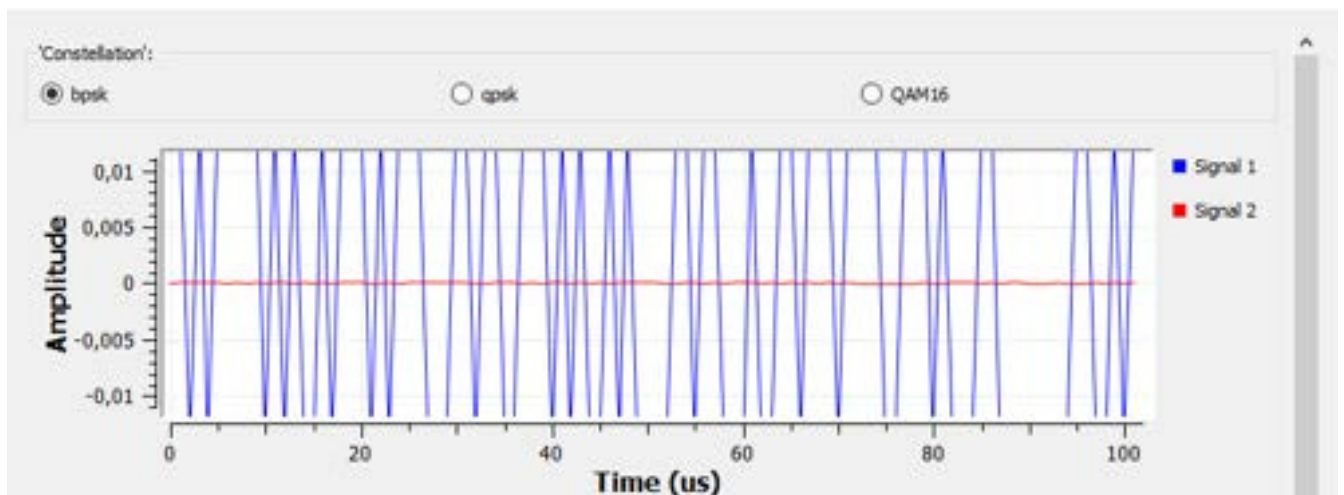


Figura 6.3: Forma de Onda BPSK no Domínio do Tempo - Laboratório de Telecomunicações.

O sinal está representado no domínio do tempo, com a Amplitude (eixo y) variando entre aproximadamente +0.01 e -0.01 no eixo vertical. O sinal em azul (Signal 1) representa a onda modulada, que é uma portadora alternando sua fase em 180° para transmitir bits

0 e 1, característico do BPSK.

- Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) BPSK é ilustrado na Figura 6.4:

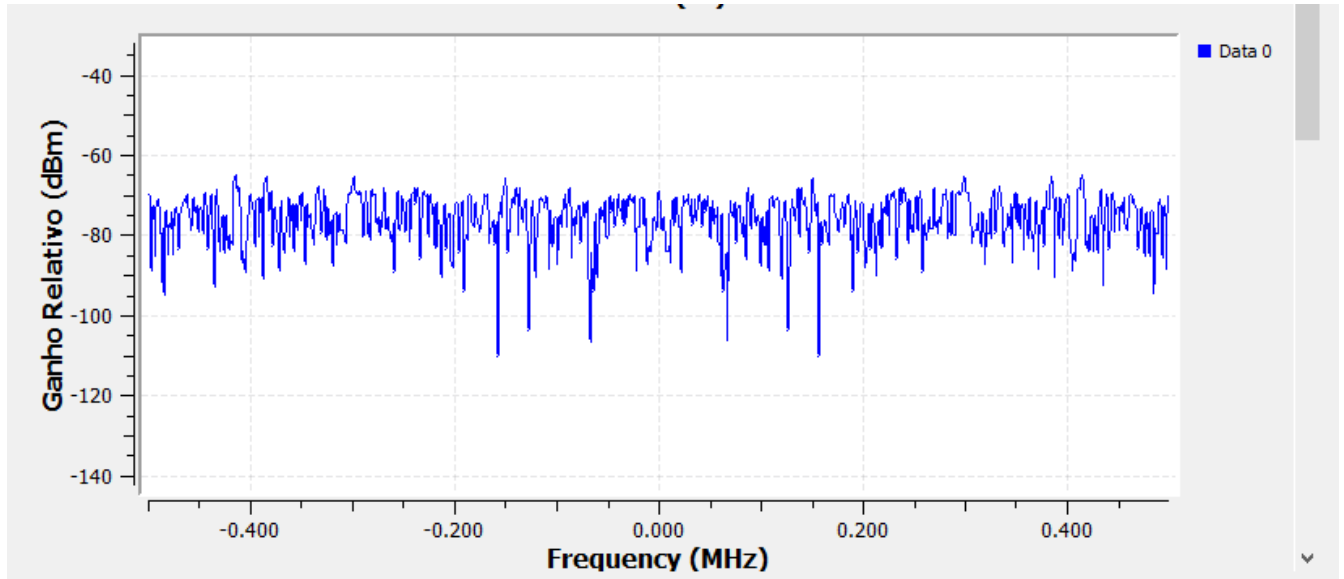


Figura 6.4: Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) BPSK - Laboratório de Telecomunicações.

O gráfico exibe o sinal no domínio da frequência. O eixo horizontal mostra a frequência em MHz, variando de -0.400 a $+0.400$ MHz, e o eixo vertical exibe o Ganho Relativo (dBm), com níveis de potência variando de aproximadamente -60 dBm a -140 dBm. Este gráfico mostra a distribuição da potência do sinal na frequência, onde se observa que a maior parte da energia está concentrada próximo a 0.000 MHz (frequência central).

- A Figura 6.5 ilustra o Diagrama de Constelação do BPSK:

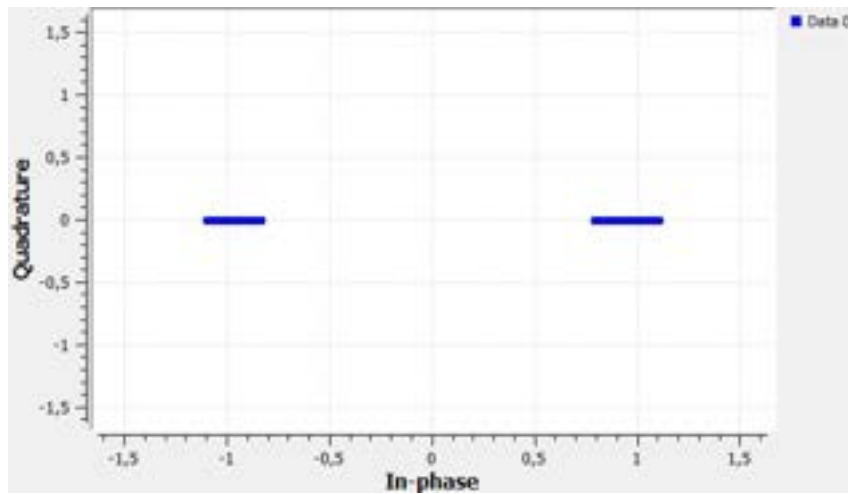


Figura 6.5: Diagrama de Constelação BPSK - Laboratório de Telecomunicações.

O Diagrama de Constelação mostra as coordenadas que são *In-phase* e *Quadrature*, e o BPSK é representado por dois pontos (ou aglomerados) no eixo *In-phase* (I), um em torno de +1 e outro em torno de -1 no eixo horizontal (e 0 no eixo *Quadrature* (Q)). A concentração dos pontos nessas duas posições, que formam uma linha reta horizontal.

• QPSK

- A Forma de Onda QPSK no Domínio do Tempo é ilustrada na Figura 6.6:

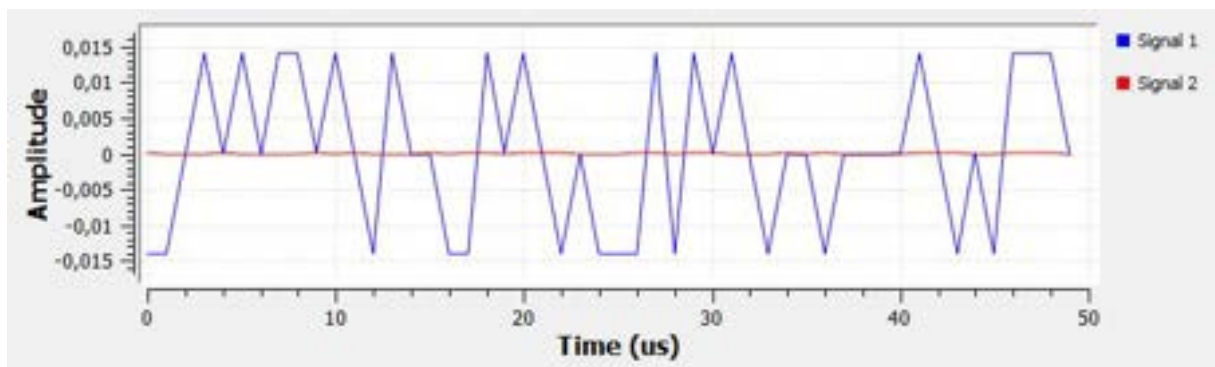


Figura 6.6: Forma de Onda QPSK no Domínio do Tempo - Laboratório de Telecomunicações.

O sinal está representado no domínio do tempo, com a Amplitude (eixo y) variando entre aproximadamente +0.015 e -0.015. A forma de onda (Signal 1, em azul) apresenta transições que correspondem às mudanças de fase, que neste caso (QPSK) são de 90° , 180° ou 270° , permitindo transmitir 2 bits por símbolo.

- Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) QPSK é ilustrado na Figura 6.7:

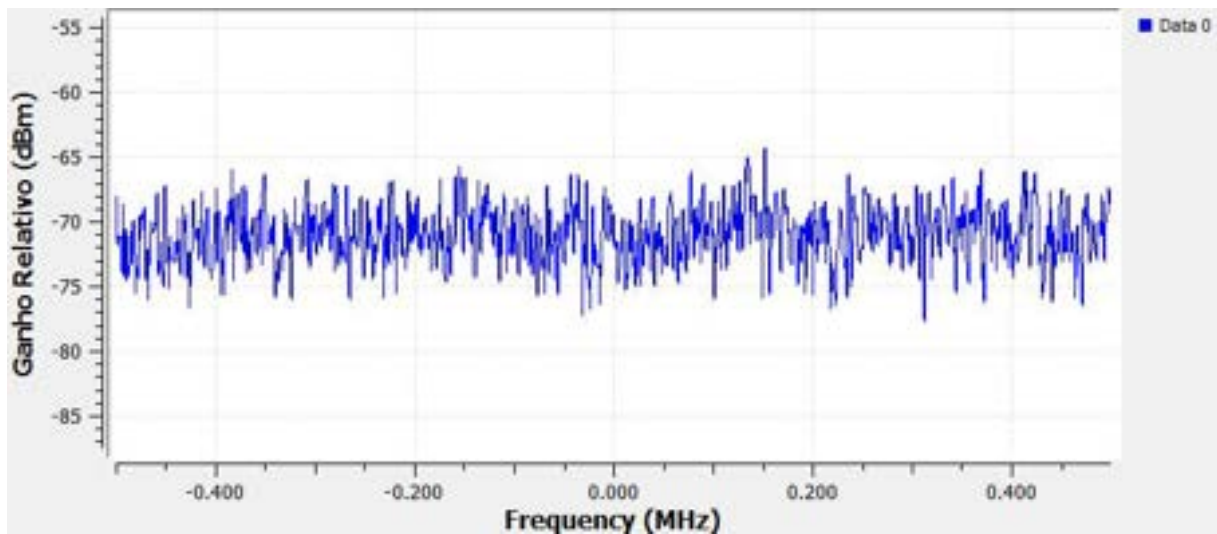


Figura 6.7: Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) QPSK - Laboratório de Telecomunicações.

O Espectro de Potência no domínio da frequência, o eixo horizontal exibe a Frequência em MHz (de 0.400 a +0.400 MHz) e o eixo vertical o Ganho Relativo (dBm), com a potência do sinal concentrada principalmente entre 65 dBm e 75 dBm. A forma do espectro é relativamente plana ao longo da banda de 800 kHz, o que é característico de uma modulação de banda base pseudo-aleatória.

- A Figura 6.8 ilustra o Diagrama de Constelação do QPSK:

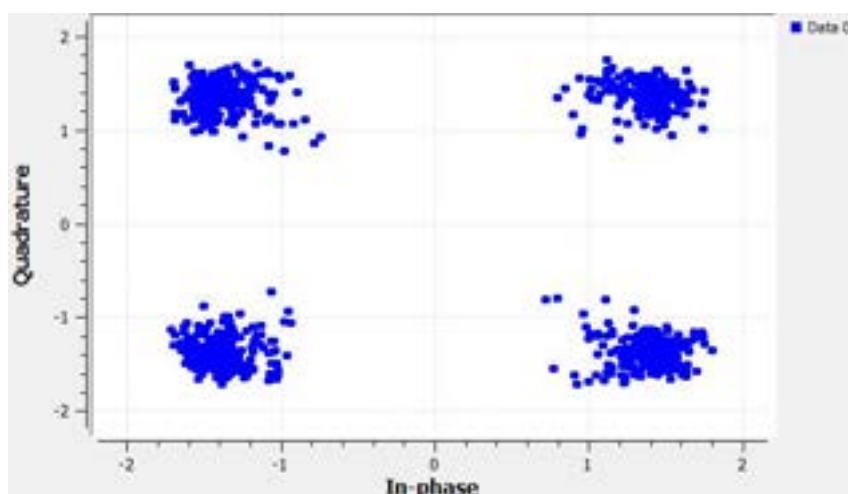


Figura 6.8: Diagrama de Constelação QPSK - Laboratório de Telecomunicações.

o Diagrama de Constelação, que é o mais importante para confirmar a modulação. Ele apresenta 4 aglomerados de pontos bem definidos e espaçados nos 4 quadrantes do plano I/Q, com coordenadas (*In-phase*, *Quadrature*) próximas de (1, 1), confirmando a modulação QPSK.

A qualidade geral do sinal QPSK medida no Laboratório de Telecomunicações é excepcional, conforme os dados numéricos fornecidos. O sinal de RF foi medido com um RSSI de 37 dBm, que é considerado forte. Considerando que o *Noise Floor* foi de 90 dBm, a SNR resultante da diferença entre o sinal e o ruído ($37dBm(90dBm)$) é de 53 dB. Uma SNR de 53 dB é classificada como ótima e de alta eficiência, o que é visível pelo Diagrama de Constelação. Nele, os 4 aglomerados de pontos são extremamente compactos, indicando que a dispersão causada pelo ruído é mínima. Essa alta SNR garante uma margem de erro muito grande e uma taxa de erro de bit (BER) muito baixa, o que é ideal para comunicações digitais.

- **16QAM**

- A Figura 6.9 ilustra a Forma de Onda no Domínio do Tempo da modulação 16QAM:

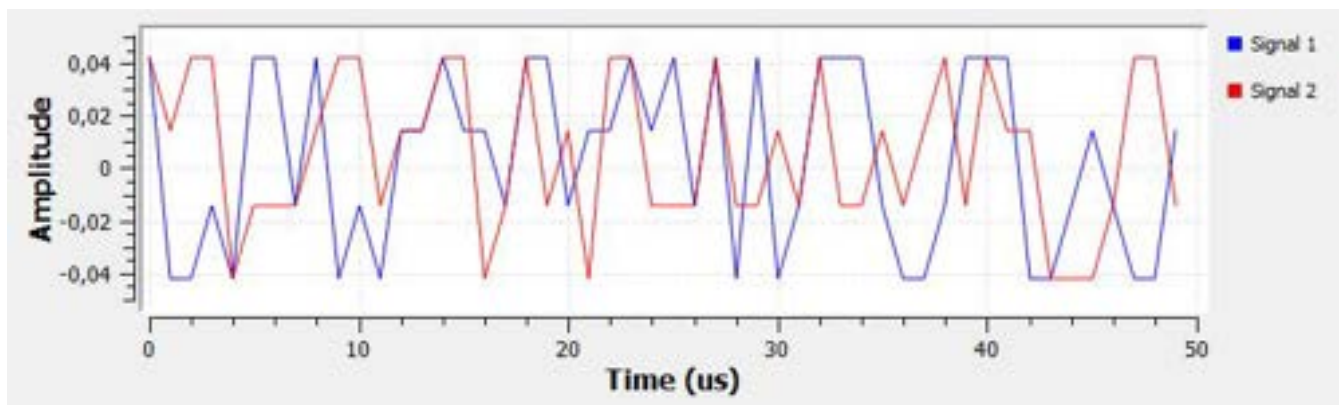


Figura 6.9: Forma de Onda 16-QAM no Domínio do Tempo - Laboratório de Telecomunicações.

O sinal está representado no domínio do tempo (eixo x em μs). Neste domínio, os componentes de quadratura variam de forma independente. As amplitudes de ambos os componentes (eixo y) alcançam cerca de +0.04 e -0.04, o que reflete os diferentes níveis de amplitude e fase que o 16-QAM utiliza para codificar 4 bits por símbolo.

- Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) 16QAM é ilustrado na Figura 6.10:

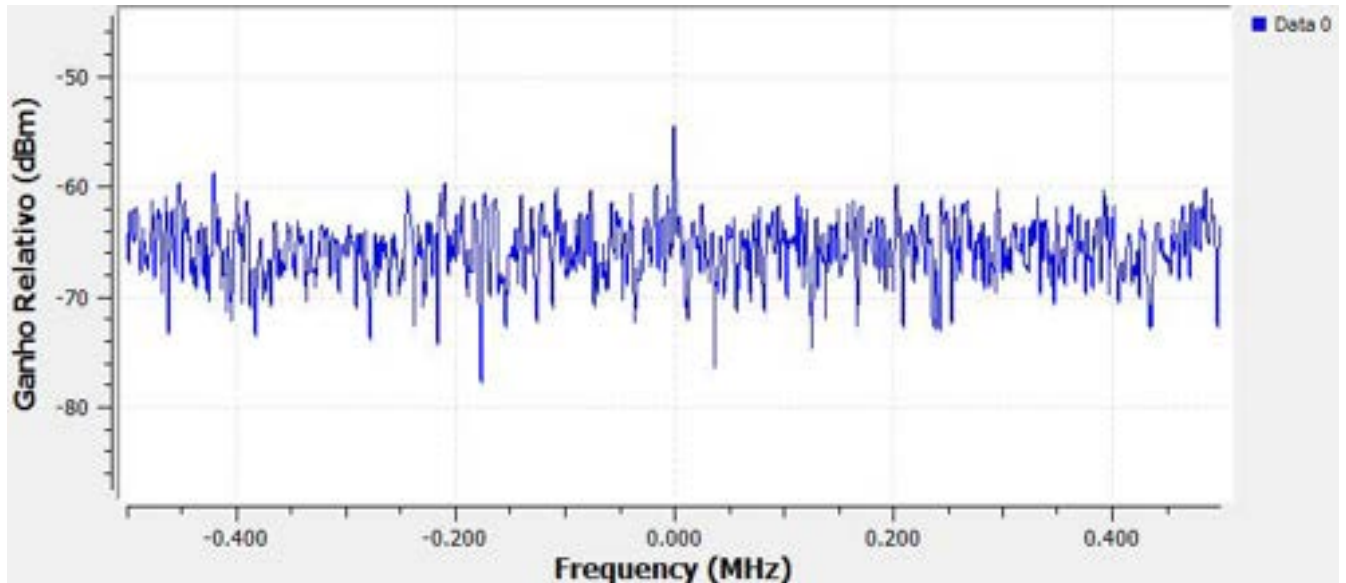


Figura 6.10: Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) 16QAM - Laboratório de Telecomunicações.

O eixo horizontal mostra a Frequência em MHz (de -0.400 a $+0.400$ MHz) e o eixo vertical o Ganho Relativo (dBm), com a potência do sinal concentrada principalmente entre -60 dBm e -70 dBm (com um pico notável próximo de 0.000 MHz). A largura de banda total analisada é de **800 kHz**.

- A Figura 6.11 ilustra o Diagrama de Constelação do 16QAM:

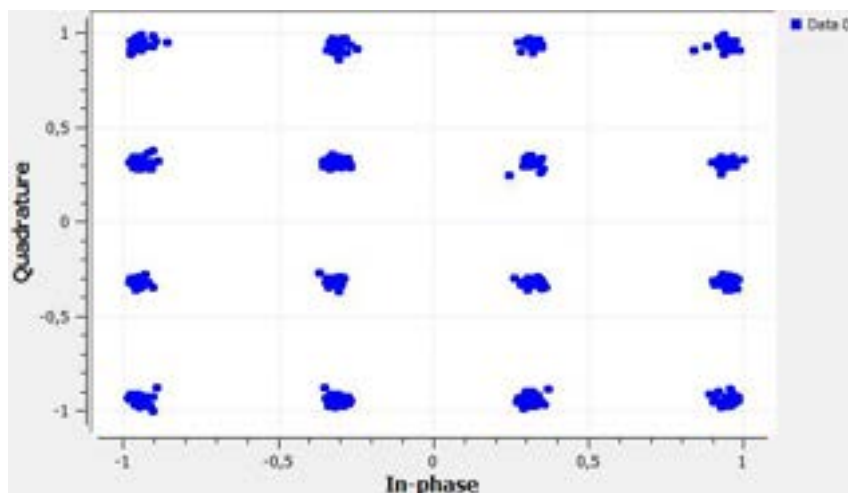


Figura 6.11: Diagrama de Constelação 16QAM - Laboratório de Telecomunicações.

O Diagrama de Constelação mostra os **16** aglomerados de pontos distintos, dispostos em uma grade 4×4 no plano I/Q. Esse arranjo confirma que **4** bits estão sendo transmitidos por símbolo. A análise de qualidade do sinal, baseada nos dados do laboratório, é excepcional, mesmo para uma modulação de ordem superior. O RSSI é de **-37** dBm, e com um *Noise Floor* de **-90** dBm, a SNR resultante é de **53** dB. Essa SNR é classificada como ótima e de alta eficiência. No Diagrama de Constelação, a extrema compactação dos **16** pontos apesar do espaçamento reduzido entre eles inerente ao 16-QAM, demonstra que a alta SNR está mitigando o ruído de forma eficaz. A separação clara entre os **16** símbolos garante uma probabilidade muito baixa de erros (BER), aproveitando a alta eficiência espectral do 16-QAM.

6.1.2 Laboratório de Programação 4 (02 de junho de 2025 - Tarde)

- BPSK
- A Figura 6.12 ilustra a Forma de Onda no Domínio do Tempo da modulação BPSK:

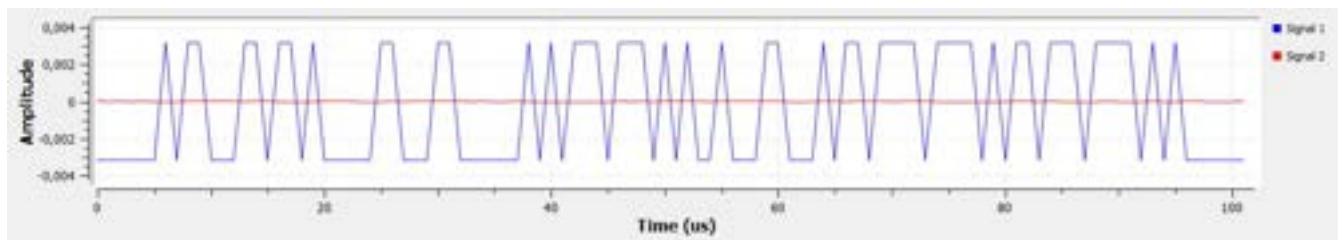


Figura 6.12: Forma de Onda BPSK no Domínio do Tempo - Laboratório de Programação 4.

A Amplitude (eixo y) varia entre aproximadamente $+0.003$ e -0.003 . O formato de onda (Signal 1) apresenta transições discretas que representam a alternância de fase (180°) para a transmissão de bits.

- Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) BPSK é ilustrado na Figura 6.13:

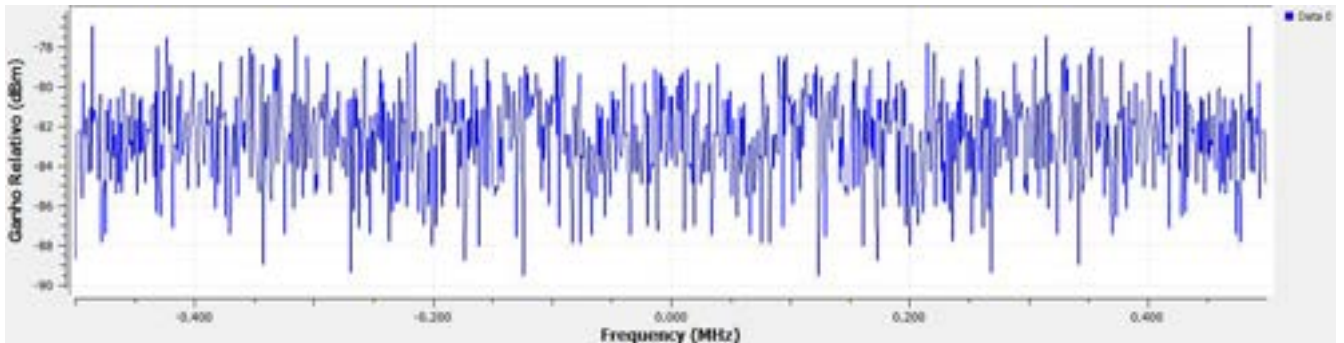


Figura 6.13: Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) BPSK - Laboratório de Programação 4.

A Frequência em MHz (varia de -0.400 a $+0.400$ MHz) e o eixo vertical é o Ganho Relativo (dBm), com a potência do sinal concentrada na faixa entre -78 dBm e -90 dBm. Nota-se que o formato do espectro está mais próximo do piso de ruído se comparado a outras medições, mas ainda mantém o sinal identificável na largura de banda de 800 kHz.

- A Figura 6.14 ilustra o Diagrama de Constelação do BPSK:

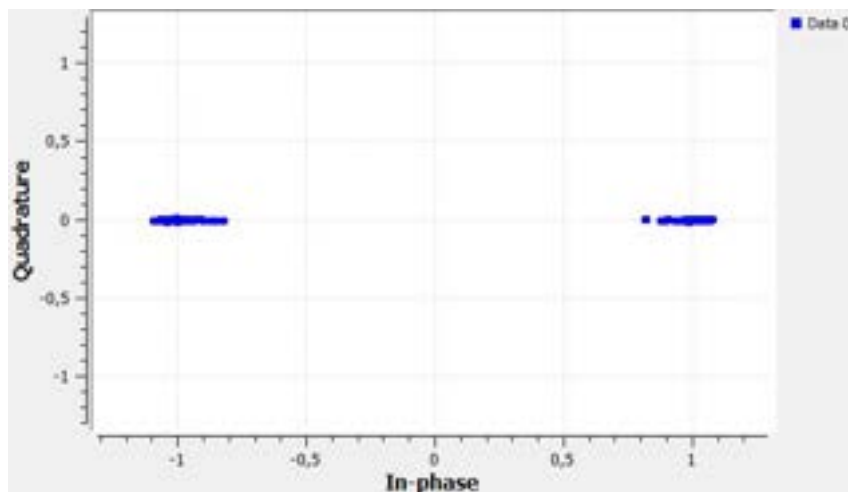


Figura 6.14: Diagrama de Constelação BPSK - Laboratório de Programação 4.

A qualidade do sinal medida no Laboratório de Programação 4, em 02 de maio, é classificada como boa e robusta, conforme os dados numéricos. O sinal de RF foi medido com um RSSI (Received Signal Strength Indicator) de -50 dBm, que é um nível de sinal médio, mas ainda forte o suficiente. Com um Noise Floor (piso de ruído) de -90 dBm, a SNR (Signal-to-Noise Ratio) resultante é calculada como -50 dBm $-$ (-90 dBm) $= 40$ dB. Embora esta SNR de 40 dB seja menor do que a observada em outros laboratórios (como

a anterior de 53 dB), ela ainda é considerada um excelente valor para sistemas de comunicação. No Diagrama de Constelação, os dois aglomerados de pontos estão ligeiramente mais dispersos do que no caso de 53 dB de SNR, mas permanecem claramente separados e distintos, garantindo uma baixa taxa de erro de bit (BER) e um desempenho robusto.

- **QPSK**

- A Figura 6.15 ilustra a Forma de Onda no Domínio do Tempo da modulação QPSK:

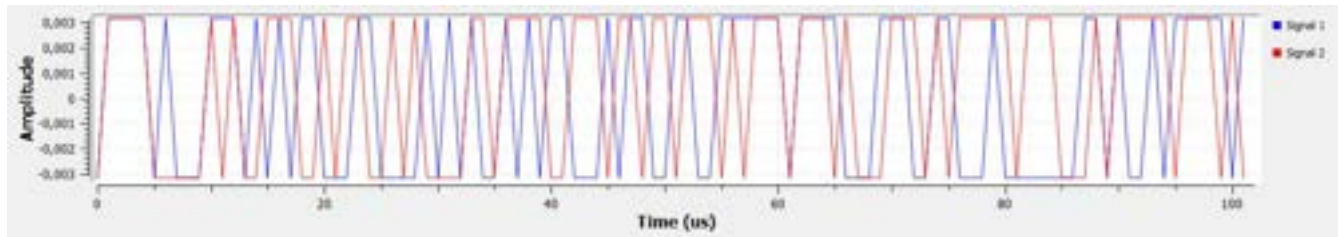


Figura 6.15: Forma de Onda QPSK no Domínio do Tempo - Laboratório de Programação 4.

A amplitude (eixo y) dos componentes variam entre aproximadamente $+0.003$ e -0.003 . A combinação dessas duas componentes em diferentes níveis de amplitude e fase permite ao QPSK codificar **2** bits por símbolo.

- Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) QPSK é ilustrado na Figura 6.16:

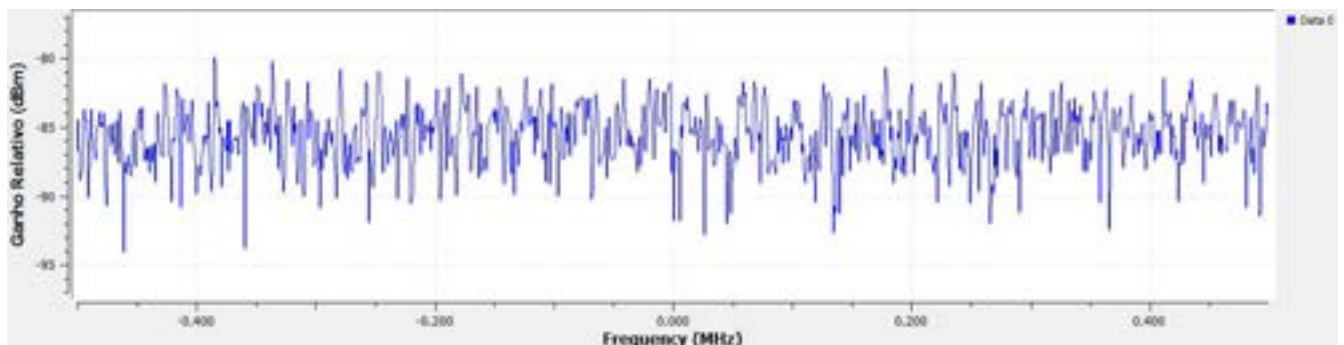


Figura 6.16: Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) QPSK - Laboratório de Programação 4.

O eixo horizontal (Frequência em MHz) cobre uma largura de banda de **800 kHz** (de -0.400 a $+0.400$ MHz) e o eixo vertical (Ganho Relativo em dBm) mostra a potência

do sinal concentrada principalmente entre -85 dBm e -90 dBm, indicando que o nível de potência está muito próximo do piso de ruído.

- A Figura 6.17 ilustra o Diagrama de Constelação do QPSK:

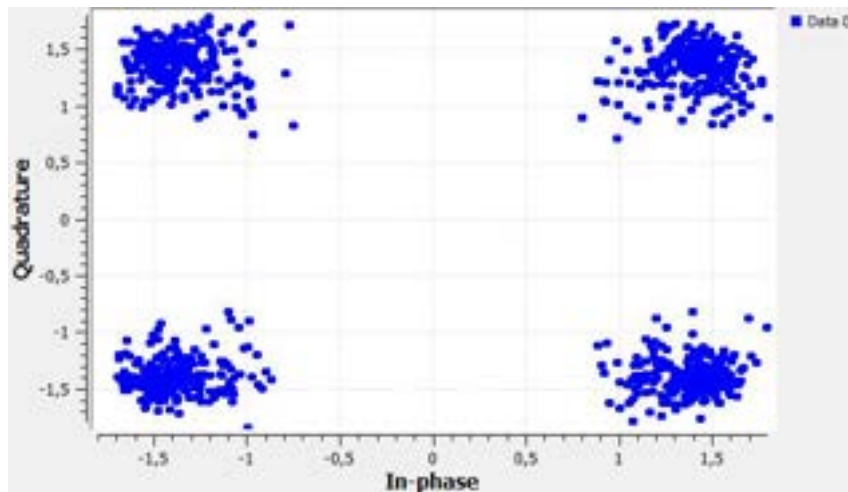


Figura 6.17: Diagrama de Constelação QPSK - Laboratório de Programação 4.

O Diagrama de Constelação, exibe claramente 4 aglomerados de pontos bem definidos nos 4 quadrantes do plano I/Q, confirmando a modulação QPSK. A qualidade do sinal medida neste experimento no Laboratório de Programação 4 resultou em um desempenho bom e robusto. O RSSI foi medido como -50 dBm (sinal médio), e o *Noise Floor* foi de -90 dBm. A SNR calculada é de 40 dB (-50 dBm $- (-90$ dBm)). Uma SNR de 40 dB é excelente para a maioria das aplicações, mas, como o QPSK é mais sensível ao ruído do que o BPSK, a dispersão nos aglomerados de pontos é visível. Os 4 aglomerados estão claramente separados, mas apresentam uma dispersão notável quando comparados a sinais QPSK com SNR mais alta (como a de 53 dB vista anteriormente). No entanto, o espaçamento angular entre os símbolos QPSK ainda é grande o suficiente para que a taxa de erro de bit (BER) permaneça baixa, garantindo a robustez do sinal.

- **16QAM**

- A Figura 6.18 ilustra a Forma de Onda no Domínio do Tempo da modulação 16QAM:

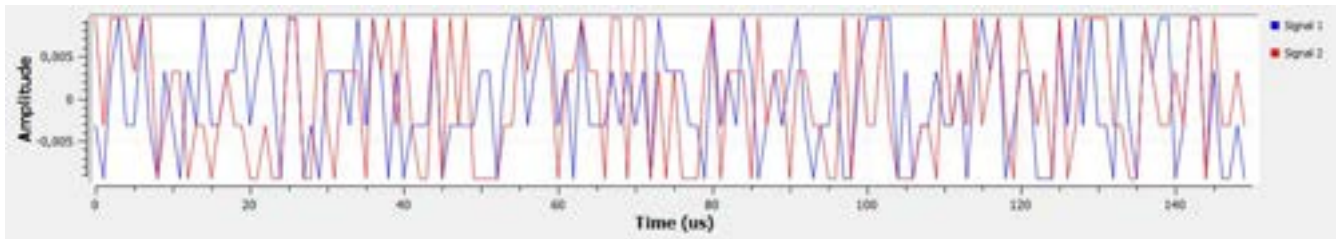


Figura 6.18: Forma de Onda 16QAM no Domínio do Tempo 16QAM - Laboratório de Programação 4.

Os componentes *In-phase* (*Signal 1*) e *Quadrature* (*Signal 2*) têm amplitudes no eixo y variando entre aproximadamente $+0.007$ e -0.007 . O 16-QAM usa 4 níveis de amplitude e 4 fases para codificar 4 bits por símbolo, resultando em um padrão de onda mais complexo do que BPSK ou QPSK.

- Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) 16QAM é ilustrado na Figura 6.19:

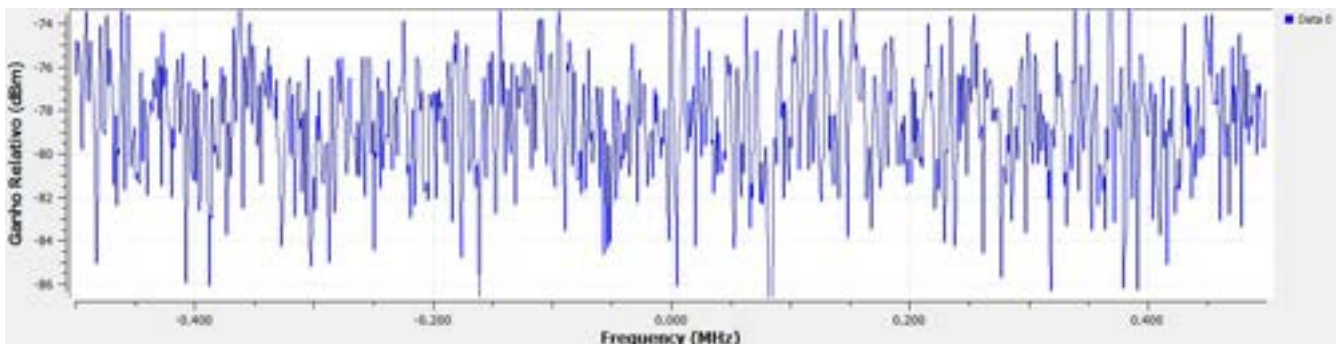


Figura 6.19: Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) 16QAM - Laboratório de Programação 4.

O eixo horizontal (Frequência em MHz) cobre uma largura de banda de 800 kHz (de -0.400 a $+0.400$ MHz). O eixo vertical (Ganho Relativo em dBm) mostra o sinal concentrado na faixa entre -74 dBm e -86 dBm, indicando um nível de potência relativamente baixo em relação aos picos de ruído.

- A Figura 6.20 ilustra o Diagrama de Constelação do 16QAM:

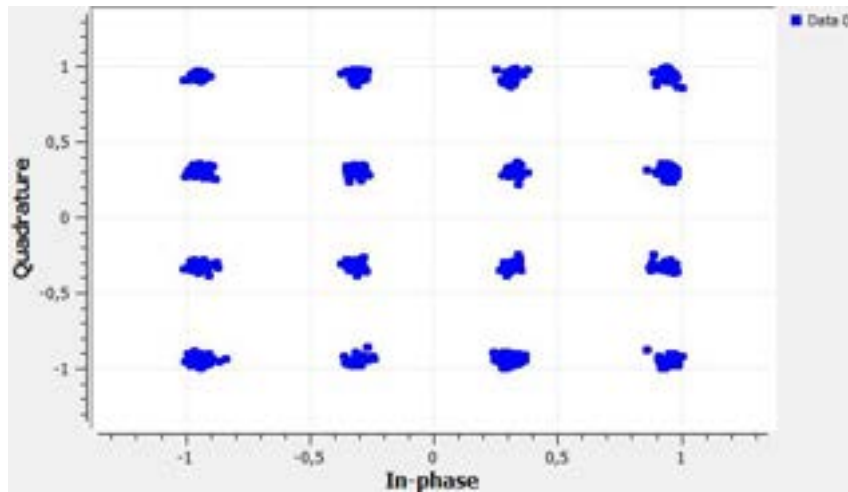


Figura 6.20: Diagrama de Constelação 16QAM - Laboratório de Programação 4.

O Diagrama de Constelação mostra claramente **16** aglomerados de pontos em uma grade 4×4 , confirmando a modulação 16-QAM. A qualidade foi classificada como boa e robusta com base nos dados numéricos. O RSSI foi de -50 dBm, e o *Noise Floor* de -90 dBm, resultando em uma SNR de 40 dB (-50 dBm $- (-90$ dBm)). No entanto, para 16-QAM, que possui um espaçamento entre símbolos muito menor do que QPSK ou BPSK, a dispersão causada pelo ruído com uma SNR de 40 dB é significativa. Os aglomerados de pontos no diagrama de constelação, embora ainda identificáveis, estão visivelmente mais largos e mais próximos do que em um cenário de 53 dB de SNR. Isso indica que, embora o sinal seja robusto o suficiente para uma taxa de erro aceitável, ele é o mais suscetível a erros das três modulações analisadas, devido à sua maior eficiência espectral (transmite $4\times$ mais bits que o BPSK pela mesma largura de banda).

6.1.3 Laboratório de Programação 2 (02 de junho de 2025 - Tarde)

- BPSK
- A Figura 6.21 ilustra a Forma de Onda no Domínio do Tempo da modulação BPSK:

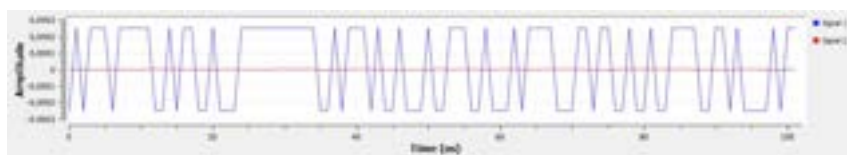


Figura 6.21: Forma de Onda BPSK no Domínio do Tempo - Laboratório de Programação 2.

O gráfico mostra o sinal no domínio do tempo, com a Amplitude (eixo y) variando entre **+0.0025** e **-0.0025**. O sinal azul (Signal 1) exibe a alternância de fase (180°) característica do BPSK.

- Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) BPSK é ilustrado na Figura 6.22:

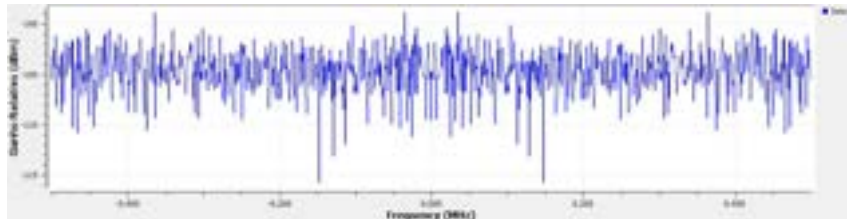


Figura 6.22: Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) BPSK - Laboratório de Programação 2.

O gráfico mostra que o eixo horizontal (Frequência em MHz) cobre uma largura de banda de **800 kHz** (de **-0.400** a **+0.400** MHz). O eixo vertical (Ganho Relativo em dBm) mostra a potência do sinal concentrada na faixa de **-100 dBm** a **-105 dBm**. Este nível é extremamente baixo, flutuando muito próximo ao nível do ruído, o que sugere dificuldades na recepção.

- A Figura 6.23 ilustra o Diagrama de Constelação do BPSK:

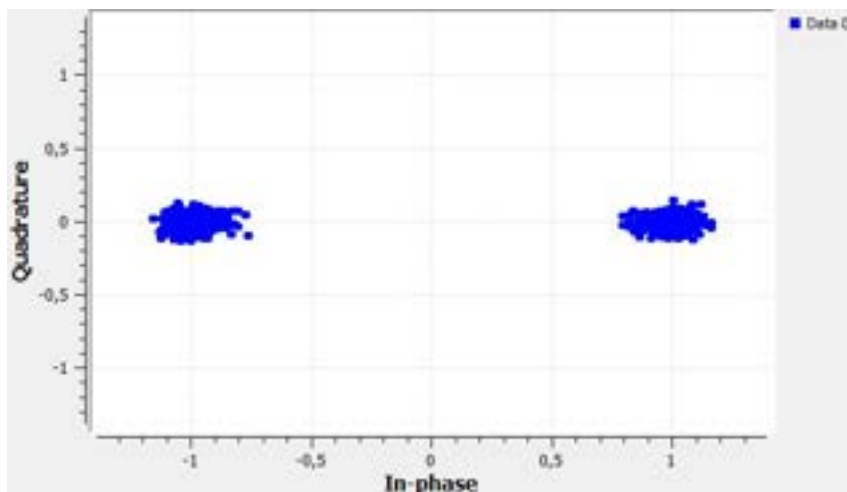


Figura 6.23: Diagrama de Constelação BPSK - Laboratório de Programação 2.

Com base no Diagrama de Constelação observa-se que o desempenho é razoável e à necessidade de atenção. O RSSI medido foi de **-72 dBm**, classificado como fraco. Com um *Noise Floor* de **-90 dBm**, a SNR resultante é de **18 dB** ($-72 \text{ dBm} - (-90 \text{ dBm})$). Uma SNR de **18 dB** é significativamente menor que os SNRs de **40 dB** e **53 dB** vistos em

outros laboratórios. Essa SNR baixa se reflete claramente no Diagrama de Constelação, onde os dois aglomerados de pontos, embora ainda separados, apresentam uma dispersão radial notavelmente maior. Apesar da baixa SNR, o BPSK (por sua simplicidade e grande espaçamento entre símbolos) consegue manter um desempenho razoável. No entanto, os resultados indicam que o laboratório exige manutenção e cuidados mais rigorosos devido à proximidade do sinal de ruído, o que poderia levar a uma Taxa de Erro de Bit (BER) marginalmente aceitável.

- **QPSK**

- A Figura 6.24 ilustra a Forma de Onda no Domínio do Tempo da modulação QPSK:

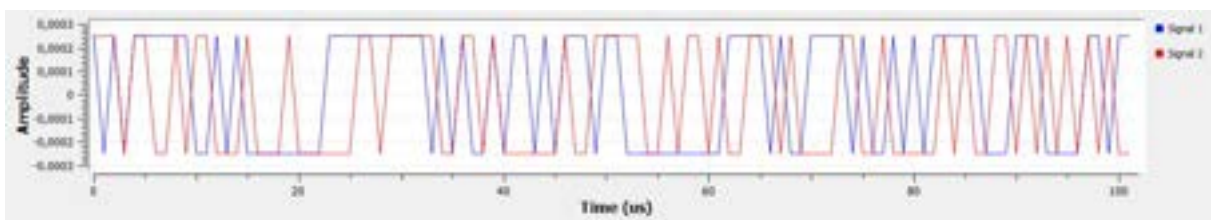


Figura 6.24: Forma de Onda QPSK no Domínio do Tempo - Laboratório de Programação 2.

Os componentes In-phase e Quadrature (Signal 1 e Signal 2) têm amplitudes no eixo y variando entre $+0.0025$ e -0.0025 . O formato de onda discreto mostra as transições de fase que codificam **2** bits por símbolo.

- Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) QPSK é ilustrado na Figura 6.25:

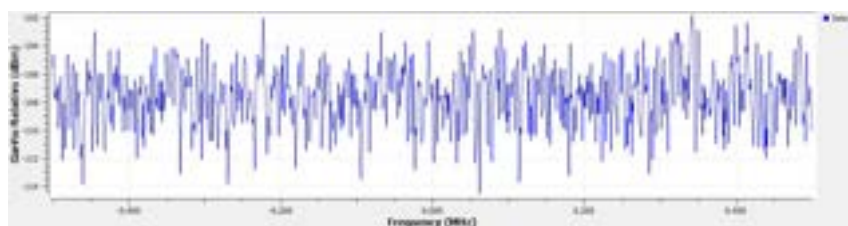


Figura 6.25: Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) QPSK - Laboratório de Programação 2.

O eixo horizontal (Frequência em MHz) cobre uma largura de banda de **800 kHz**. O eixo vertical (Ganho Relativo em dBm) mostra a potência do sinal concentrada na faixa de -104 dBm a -112 dBm, indicando um nível de sinal muito baixo e próximo ao piso de ruído.

- A Figura 6.26 ilustra o Diagrama de Constelação do QPSK:

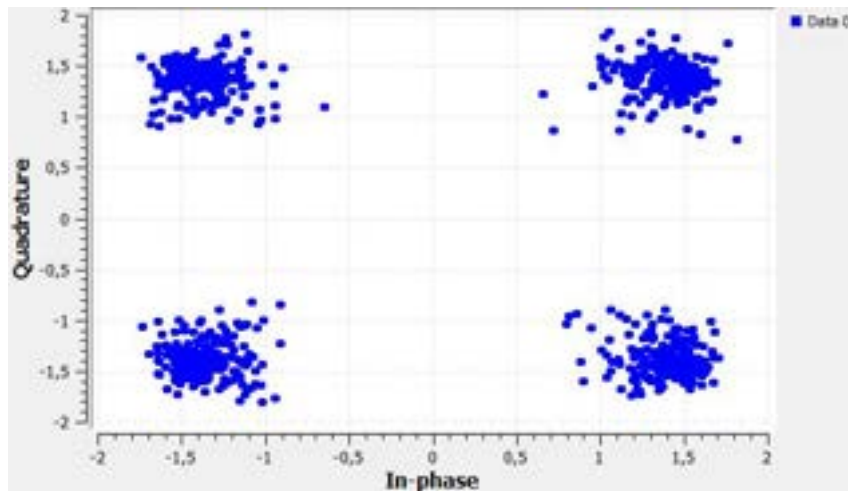


Figura 6.26: Diagrama de Constelação QPSK - Laboratório de Programação 2.

A análise de qualidade do sinal baseada nos dados numéricos reflete um desempenho razoável sob condições adversas, conforme observado no Laboratório de Programação 2. O RSSI medido foi de -72 dBm (sinal fraco), e o *Noise Floor* de -90 dBm, o que resulta em uma SNR muito baixa de 18 dB (-72 dBm $- (-90$ dBm)). Essa SNR de 18 dB causa uma dispersão de pontos severa no Diagrama de Constelação. Embora os 4 aglomerados ainda sejam visivelmente separados, sua extensão radial e sua proximidade em relação aos vizinhos são muito maiores do que em cenários de alta SNR. Para o QPSK, que já é mais sensível ao ruído que o BPSK, essa SNR de 18 dB é crítica, pois aumenta significativamente o risco de o ruído empurrar um ponto para a região de decisão de um símbolo vizinho, resultando em uma Taxa de Erro de Bit (BER) marginal que justifica a recomendação de manutenção e cuidados mais rigorosos.

- **16QAM**

- A Figura 6.27 ilustra a Forma de Onda no Domínio do Tempo da modulação 16QAM:

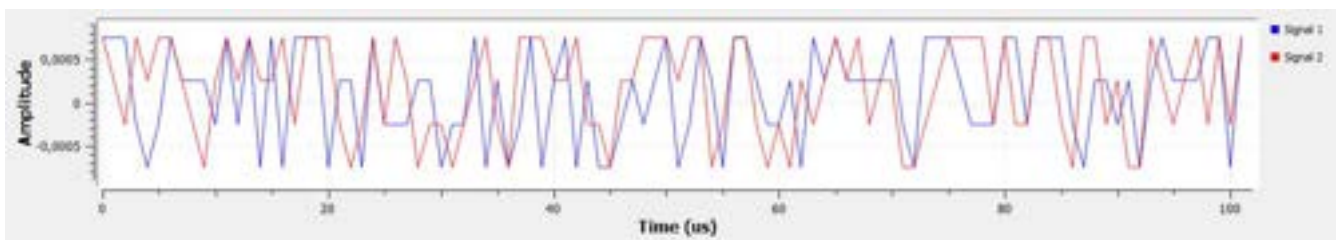


Figura 6.27: Forma de Onda 16QAM no Domínio do Tempo - Laboratório de Programação 2.

O sinal está representado no domínio do tempo (eixo x em μs). Neste domínio, as componentes In-phase (Signal 1) e Quadrature (Signal 2) variam em amplitude entre $+0.002$ e -0.002 (eixo y). Essa variação complexa reflete os **16** estados diferentes que o esquema 16-QAM utiliza para codificar **4** bits por símbolo.

- Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) 16QAM é ilustrado na Figura 6.28:

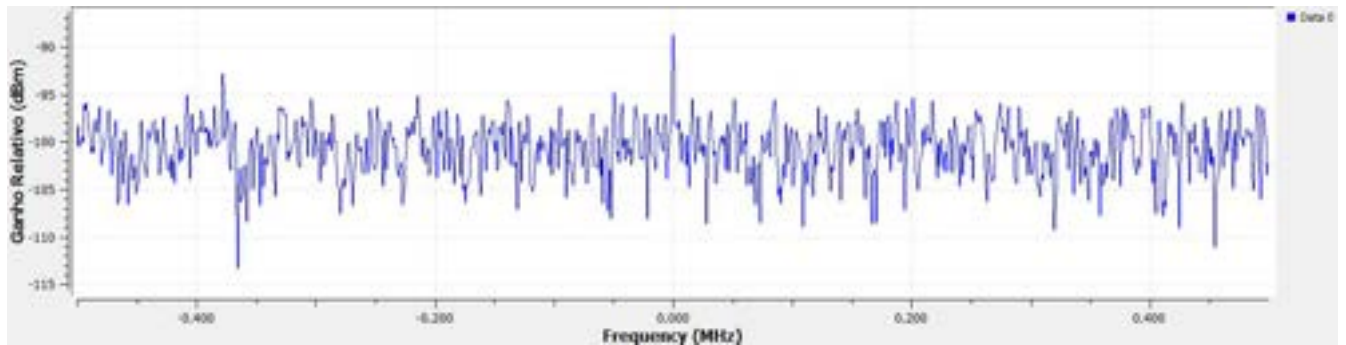


Figura 6.28: Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) 16QAM - Laboratório de Programação 2.

O eixo horizontal (Frequência em MHz) cobre uma largura de banda de **800 kHz**. O eixo vertical (Ganho Relativo em dBm) mostra a potência do sinal concentrada principalmente na faixa de -95 dBm a -105 dBm, com picos próximos de -90 dBm na frequência central. Este nível de potência é baixo e está muito próximo ao piso de ruído.

- A Figura 6.29 ilustra o Diagrama de Constelação do 16QAM:

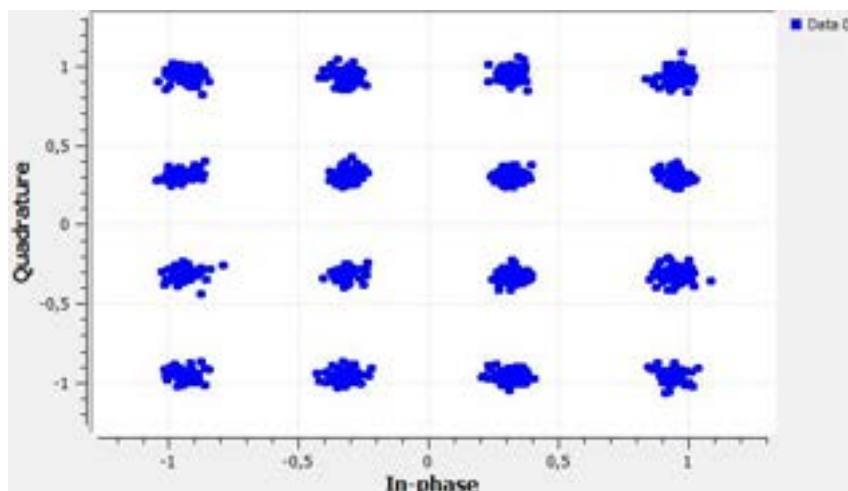


Figura 6.29: Diagrama de Constelação 16QAM - Laboratório de Programação 2.

O Diagrama de Constelação, que exibe os **16** aglomerados de pontos em uma grade 4×4 , confirmando o 16-QAM. A análise de qualidade do sinal com os dados numéricos do Laboratório de Programação 2 mostra que este 16-QAM opera em condições muito críticas. O RSSI foi medido como -72 dBm (sinal fraco), e o Noise Floor foi de -90 dBm, resultando em uma SNR de apenas **18** dB (-72 dBm $- (-90$ dBm)). Para a modulação 16-QAM, que exige um espaçamento mínimo entre seus **16** símbolos (o menor de todas as modulações analisadas), uma SNR de **18** dB é extremamente baixa e representa um desempenho limítrofe. No Diagrama de Constelação, a dispersão dos aglomerados é muito acentuada, e o espaçamento entre as regiões de decisão é mínimo. Essa condição aumenta drasticamente a probabilidade de que o ruído faça com que um ponto seja interpretado como um símbolo adjacente, resultando em uma Taxa de Erro de Bit (BER) alta. O fato de o desempenho ser classificado apenas como razoável e exigir manutenção e cuidados rigorosos sublinha a grande vulnerabilidade do 16-QAM a baixas SNRs em comparação com BPSK e QPSK.

6.1.4 Laboratório de Informática 1 (02 de junho de 2025 - Tarde)

- Apenas BPSK viável
- A Figura 6.30 ilustra a Forma de Onda no Domínio do Tempo da modulação BPSK:

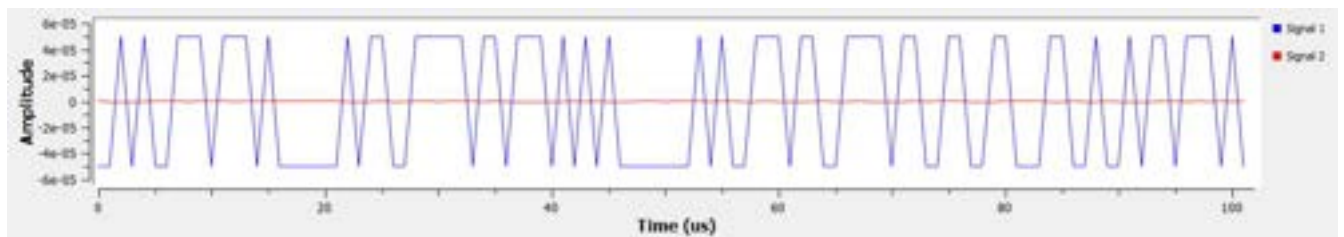


Figura 6.30: Forma de Onda BPSK no Domínio do Tempo - Laboratório de Informática 1.

O gráfico no domínio do tempo confirma o BPSK através da variação da Amplitude (eixo y) do *Signal 1* (azul) entre valores positivos e negativos, representando a inversão de fase (180°).

- Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) BPSK é ilustrado na Figura 6.31:

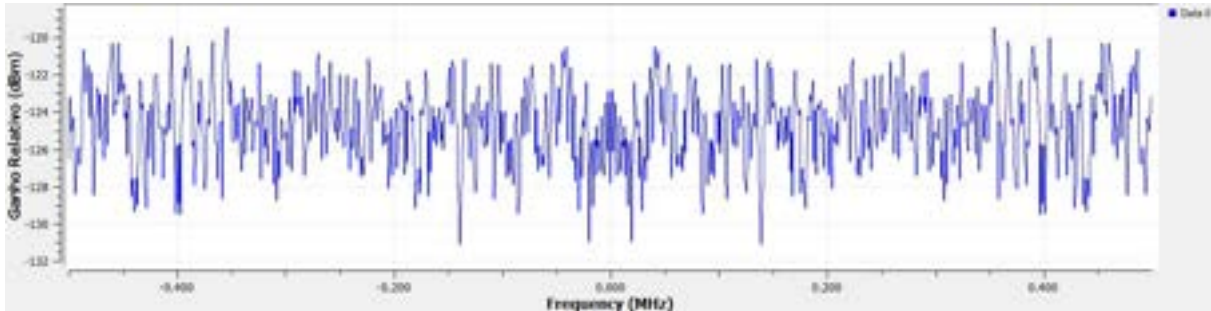


Figura 6.31: Gráfico de Ganho Relativo (dBm) por Frequência (MHz) BPSK - Laboratório de Informática 1.

O eixo vertical (Ganho Relativo em dBm) mostra que a potência do sinal está concentrada entre 120 dBm e 132 dBm, um nível extremamente baixo e difícil de distinguir do ruído.

- A Figura 6.32 ilustra o Diagrama de Constelação do BPSK:

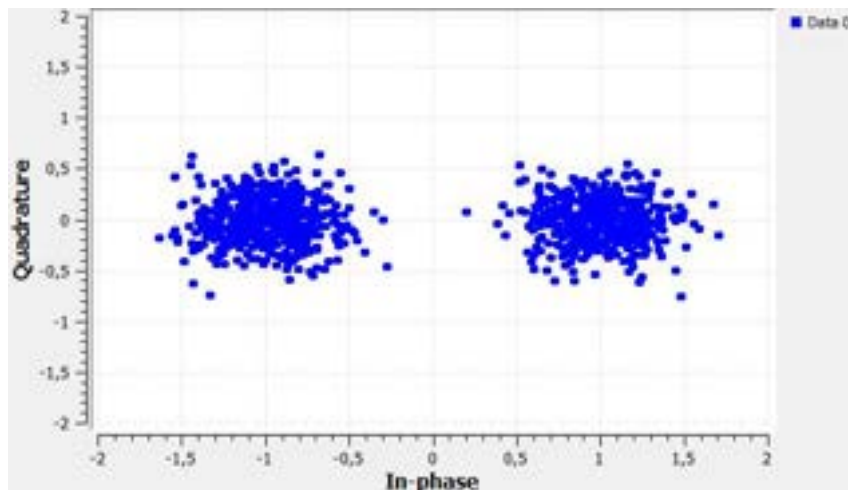


Figura 6.32: Diagrama de Constelação BPSK - Laboratório de Informática 1.

A análise de qualidade do sinal, baseada nos dados numéricos, confirma a situação crítica da transmissão. O RSSI medido foi de 86 dBm (sinal muito fraco), e o Noise Floor de -90 dBm. A SNR resultante é de apenas 4 dB ($86dBm(90dBm)$). Esta SNR de 4 dB é classificada como crítica, pois está muito próxima do limite de detecção. No Diagrama de Constelação, essa baixa SNR causa uma dispersão massiva dos pontos: os aglomerados

estão muito largos e há uma grande nebulosidade, com os pontos se estendendo quase até a região de decisão oposta. No entanto, o texto ressalta que é exatamente nessas condições críticas que o BPSK é a única modulação viável, pois seu grande espaçamento entre símbolos (distância mínima entre os 2 pontos) oferece a máxima resistência ao ruído, permitindo que o sistema ainda funcione, mesmo com essa SNR baixíssima de 4 dB.

6.2 Curva de Referência: BER X SNR

6.2.1 BER X SNR - BPSK

A primeira etapa consiste na transmissão do sinal BPSK. Geramos um fluxo de bits e o modulamos em uma constelação complexa. Para isso, utilizamos o bloco Modulador de Constelação, que usa um Objeto de Constelação e outras configurações para controlar o sinal transmitido.

- A Figura 6.33 mostra a Curva completa sem codificação e Curva completa com Codificação $R=1/2$



Figura 6.33: Curva BER x SNR Comparação Completa e Mapeamento de Campo.

- A Figura 6.34 ilustra a simulação sem codificação:

```
Rodando simulação SEM CODIFICAÇÃO...
SNR: -2.0 dB | BER Simulado: 4.33e-01
SNR: -1.5 dB | BER Simulado: 4.16e-01
SNR: -1.0 dB | BER Simulado: 5.01e-01
SNR: -0.5 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 0.0 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 0.5 dB | BER Simulado: 5.01e-01
SNR: 1.0 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 1.5 dB | BER Simulado: 5.00e-01
SNR: 2.0 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 2.5 dB | BER Simulado: 5.01e-01
SNR: 3.0 dB | BER Simulado: 4.96e-01
SNR: 3.5 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 4.0 dB | BER Simulado: 5.01e-01
SNR: 4.5 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 5.0 dB | BER Simulado: 4.99e-01
```

Figura 6.34: Simulação sem Codificação - BPSK.

- A Figura 6.35 ilustra a simulação com codificação:

```
Rodando simulação CODIFICADA...
SNR: -2.0 dB | BER Simulado: 3.17e-01
SNR: -1.5 dB | BER Simulado: 2.83e-01
SNR: -1.0 dB | BER Simulado: 2.99e-01
SNR: -0.5 dB | BER Simulado: 2.98e-01
SNR: 0.0 dB | BER Simulado: 2.98e-01
SNR: 0.5 dB | BER Simulado: 2.98e-01
SNR: 1.0 dB | BER Simulado: 2.99e-01
SNR: 1.5 dB | BER Simulado: 2.82e-01
SNR: 2.0 dB | BER Simulado: 3.48e-01
SNR: 2.5 dB | BER Simulado: 3.82e-01
SNR: 3.0 dB | BER Simulado: 3.84e-01
SNR: 3.5 dB | BER Simulado: 3.82e-01
SNR: 4.0 dB | BER Simulado: 3.82e-01
SNR: 4.5 dB | BER Simulado: 3.82e-01
SNR: 5.0 dB | BER Simulado: 3.82e-01
```

Figura 6.35: Simulação Codificada - BPSK.

O gráfico $\text{BER} \times \text{SNR}$ apresenta quatro curvas e dois conjuntos de pontos de campo, possibilitando uma análise abrangente do desempenho da camada física. As curvas teóricas representam o comportamento ideal do sistema e servem como base de validação, especialmente diante da falha de sincronização observada na simulação. A curva teórica do BPSK sem codificação (linha azul tracejada) indica o desempenho máximo no canal AWGN, funcionando como piso de erro na ausência de FEC, com $\text{BER} \approx 10^{-2}$ para $\text{SNR} = 4, \text{dB}$. Já a curva teórica do BPSK codificado ($R = 1/2, K = 7$) (linha preta ponto-traço) evidencia o ganho de codificação, proporcionando desempenho superior ao custo de duplicar a taxa de bits, atingindo nesse mesmo ponto um $\text{BER} \approx 2 \times 10^{-5}$, valor considerado como referência para o sistema. Em contraste, as curvas simuladas revelam uma falha técnica típica em simulações SDR de loop aberto. Tanto o BPSK simulado sem codificação (linha vermelha), com $\text{BER} \approx 0,5$, quanto o BPSK simulado com codificação (linha verde), com $\text{BER} \approx 0,4$, permanecem em níveis equivalentes ao erro aleatório. Esse comportamento indica que o atraso introduzido pelo canal e pelo decodificador Viterbi não foi devidamente compensado, resultando em perda de sincronismo de bits.

As curvas teóricas, que refletem com maior fidelidade o desempenho esperado do sistema. O ponto crítico de campo em $\text{SNR} = 4, \text{dB}$, representado pela estrela magenta, coincide com a curva teórica codificada, prevendo um $\text{BER} = 2 \times 10^{-5}$, o que demonstra que mesmo no pior cenário de sinal a codificação convolucional assegura excelente qualidade de *link*, com impacto mínimo na PER. Já os pontos de campo ideais, correspondentes a $\text{SNR} = 53, \text{dB}$, $\text{SNR} = 40, \text{dB}$ e $\text{SNR} = 18, \text{dB}$, situam-se na região de desempenho ótimo, com $\text{BER} \approx 10^{-6}$, evidenciando a robustez do canal. Dessa forma, o gráfico final valida a eficiência da camada física e comprova que o mapeamento $\text{RSSI} \rightarrow \text{SNR}$ garante operação confiável mesmo em condições adversas, justificando a baixa perda de pacotes observada e consolidando a coerência entre a simulação de BER e as medições práticas de PER.

6.2.2 BER X SNR - QPSK

- A Figura 6.36 ilustra a Curva de Codificação completa sem codificação e Curva com Codificação $R=1/2$

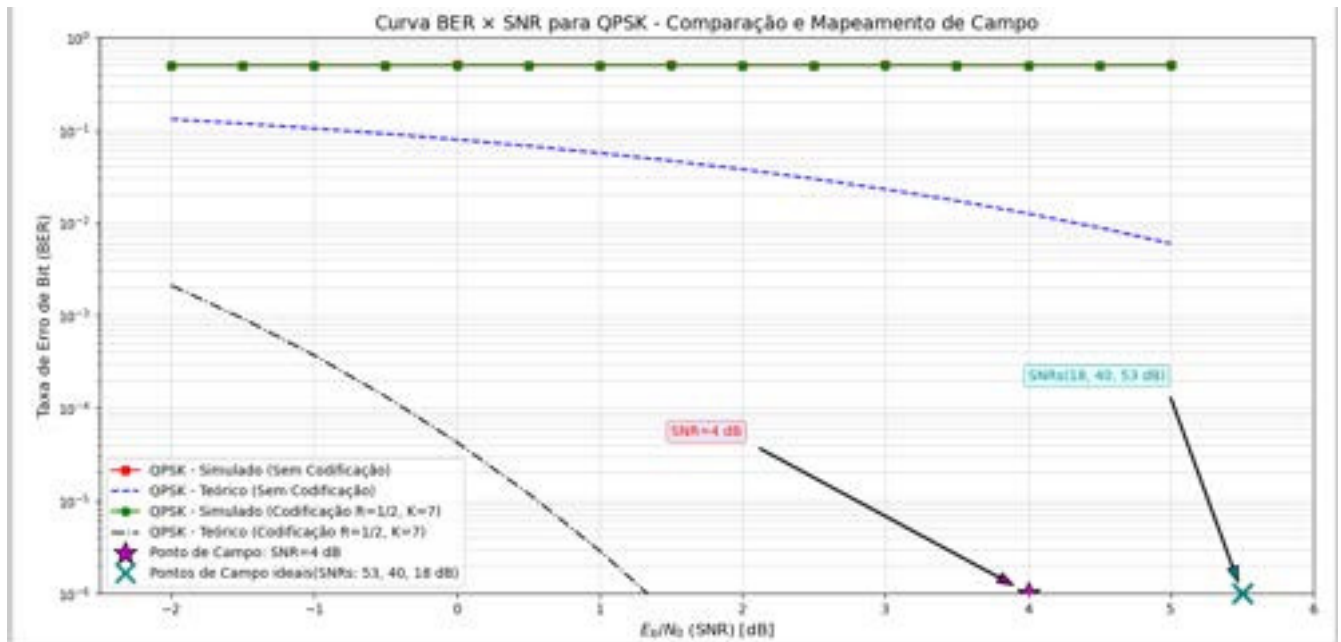


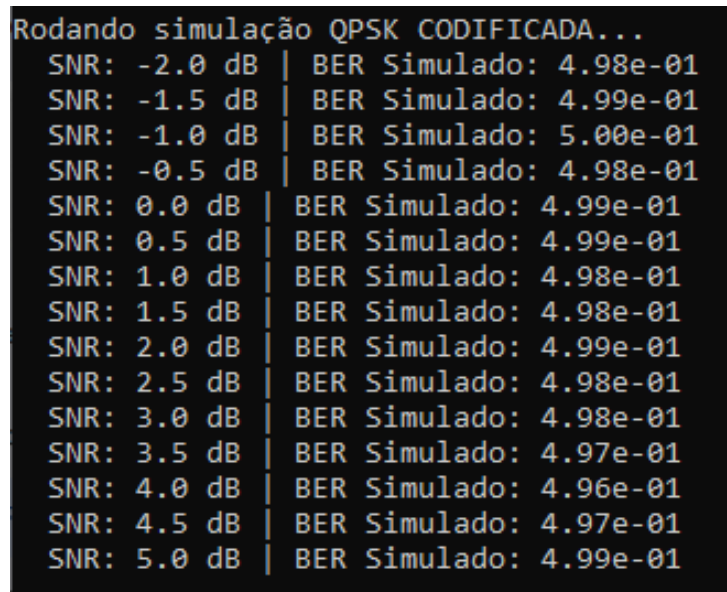
Figura 6.36: Curva Ber x SNR para QPSK - Comparação Completa e Mapeamento de Campo.

- A Figura 6.37 ilustra a simulação sem codificação:

```
Rodando simulação QPSK SEM CODIFICAÇÃO...
SNR: -2.0 dB | BER Simulado: 5.00e-01
SNR: -1.5 dB | BER Simulado: 5.00e-01
SNR: -1.0 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: -0.5 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 0.0 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 0.5 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 1.0 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 1.5 dB | BER Simulado: 5.01e-01
SNR: 2.0 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 2.5 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 3.0 dB | BER Simulado: 5.00e-01
SNR: 3.5 dB | BER Simulado: 5.00e-01
SNR: 4.0 dB | BER Simulado: 5.02e-01
SNR: 4.5 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 5.0 dB | BER Simulado: 4.98e-01
```

Figura 6.37: Simulação sem Codificação - QPSK.

- A Figura 6.38 ilustra a simulação Com codificação:



```
Rodando simulação QPSK CODIFICADA...
SNR: -2.0 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: -1.5 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: -1.0 dB | BER Simulado: 5.00e-01
SNR: -0.5 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 0.0 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 0.5 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 1.0 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 1.5 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 2.0 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 2.5 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 3.0 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 3.5 dB | BER Simulado: 4.97e-01
SNR: 4.0 dB | BER Simulado: 4.96e-01
SNR: 4.5 dB | BER Simulado: 4.97e-01
SNR: 5.0 dB | BER Simulado: 4.99e-01
```

Figura 6.38: Simulação Codificada - QPSK.

A linha da Curva Teórica (preta ponto-traço) não se estende até o final do gráfico porque a função matemática utilizada para calculá-la, baseada na fórmula do Union Bound para codificação convolucional, perde precisão em valores de BER extremamente baixos, tipicamente abaixo de 10^{-6} , que é o limite inferior do eixo Y do gráfico. Essa curva é uma aproximação da taxa de erro de bit (BER) para canais com codificação, considerando apenas os termos mais significativos da série infinita da fórmula. No caso do código utilizado, o cálculo foca no termo dominante, que é a menor distância de *Hamming livre* (d_{free}), resultando em uma aproximação que utiliza a função *erfc* (*Complementary Error Function* - Função Erro Complementar). Essa simplificação fornece resultados muito precisos para valores de BER altos e intermediários, correspondentes à região de inclinação da curva (*waterfall region*). Entretanto, à medida que a SNR aumenta, a BER entra na região de piso de erro (*error floor*), onde a contribuição dos termos de maior distância na série se torna relevante. Nessa região, a curva teórica completa seria quase horizontal, enquanto a aproximação de primeiro termo subestima a BER real, tendendo rapidamente a zero. No gráfico, o código calcula a BER ponto a ponto e, a partir de certo valor de SNR, a aproximação resulta em valores de BER menores que 10^{-6} , que é o limite inferior da escala logarítmica. Por isso, a linha da curva parece "cortada" e não atinge o final do gráfico. Esse corte não é um erro, mas sim uma confirmação de que o código está funcionando corretamente: a região de interesse usada para validar o ponto de campo crítico (SNR = 4 dB) ainda está dentro da faixa válida da curva, enquanto para SNR acima de 5 dB o sistema codificado atinge o piso de erro, com BER praticamente zero, como indicado pelos Pontos de Campo Ideais.

6.2.3 BER X SNR - 16-QAM

- A Figura 6.39 ilustra a Curva de Codificação completa sem codificação e Curva com com Codificação $R=1/2$

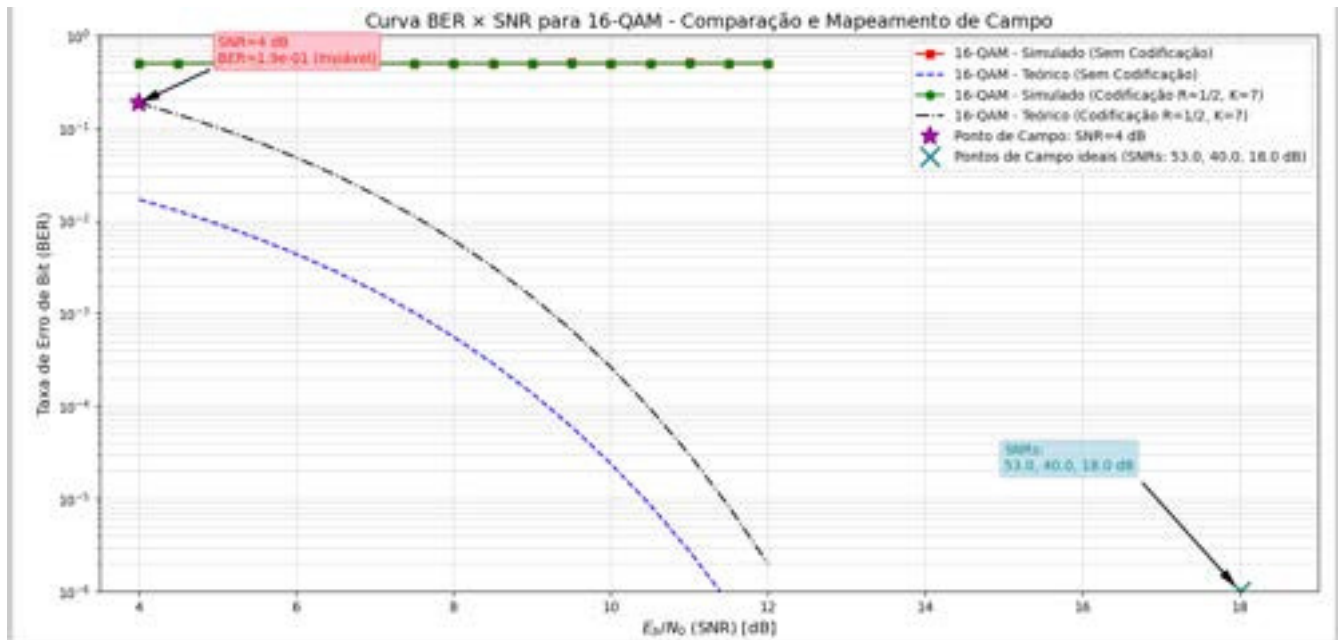


Figura 6.39: Curva 16-QAM - Comparação Completa e Mapeamento de Campo.

- A Figura 6.40 ilustra a simulação sem codificação:

```
Rodando simulação 16-QAM SEM CODIFICAÇÃO...
SNR: 4.0 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 4.5 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 5.0 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 5.5 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 6.0 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 6.5 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 7.0 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 7.5 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 8.0 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 8.5 dB | BER Simulado: 5.00e-01
SNR: 9.0 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 9.5 dB | BER Simulado: 4.97e-01
SNR: 10.0 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 10.5 dB | BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 11.0 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 11.5 dB | BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 12.0 dB | BER Simulado: 5.01e-01
```

Figura 6.40: Simulação sem Codificação - 16QAM.

- A Figura 6.41 ilustra a simulação Com codificação:

Rodando simulação 16-QAM CODIFICADA...	
SNR: 4.0 dB	BER Simulado: 4.97e-01
SNR: 4.5 dB	BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 5.0 dB	BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 5.5 dB	BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 6.0 dB	BER Simulado: 4.97e-01
SNR: 6.5 dB	BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 7.0 dB	BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 7.5 dB	BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 8.0 dB	BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 8.5 dB	BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 9.0 dB	BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 9.5 dB	BER Simulado: 4.97e-01
SNR: 10.0 dB	BER Simulado: 4.99e-01
SNR: 10.5 dB	BER Simulado: 4.97e-01
SNR: 11.0 dB	BER Simulado: 4.97e-01
SNR: 11.5 dB	BER Simulado: 4.98e-01
SNR: 12.0 dB	BER Simulado: 4.98e-01

Figura 6.41: Simulação Codificada - 16QAM.

A análise de desempenho da modulação de alta ordem demonstra que a 16-QAM não é adequada para as piores condições de sinal observadas na rede. Diferentemente do BPSK e do QPSK, a 16-QAM apresenta menor eficiência energética, exigindo SNRs mais altas para atingir o mesmo BER, embora ofereça maior eficiência espectral. As curvas teóricas sem codificação (linha azul tracejada) estão deslocadas para a direita, indicando que para alcançar um BER de 10^{-4} é necessária uma SNR de aproximadamente 10,5 dB. Com codificação $R = 1/2$ (linha preta ponto-traço), o ganho é perceptível, mas ainda insuficiente, exigindo cerca de 8,5 dB para o mesmo BER. As curvas simuladas (vermelho/verde) permanecem planas em valores altos de BER, refletindo problemas de sincronização em *loop* aberto no fluxograma GNU Radio, mais críticos em modulações de ordem superior. O mapeamento dos dados de campo reforça a inviabilidade da 16-QAM nas condições reais da rede. O ponto crítico de SNR = 4 dB, representado pela estrela magenta, apresenta BER teórico codificado de aproximadamente 19%, valor totalmente inviável, que impediria a sincronização e resultaria em perda total de pacotes. Em comparação, BPSK e QPSK codificados alcançam BER da ordem de 2×10^{-5} já com 4 dB, demonstrando a superioridade dessas modulações em sinais fracos. O desempenho robusto da 16-QAM só ocorre com SNR significativamente maior, acima de 12 dB, mostrando que para que esta modulação fosse utilizável, todos os sinais da rede precisariam superar 8,5 dB, o que não é garantido no pior caso. Com base nos três conjuntos de gráficos, a conclusão é clara: BPSK e QPSK codificados ($R = 1/2$) são a escolha ideal, garantindo $\text{BER} \approx 10^{-5}$ mesmo no pior cenário de SNR = 4 dB, enquanto a 16-QAM não é viável para a topologia da rede.

estudada, exceto se a cobertura pudesse ser sacrificada em favor de uma taxa de dados mais alta. Esses resultados fundamentam a decisão de priorizar a robustez do sistema por meio da escolha adequada de modulação e codificação, sendo o fator determinante para a confiabilidade da solução proposta.

Capítulo 7

Resultados e Discussões

Nesta seção, serão apresentados os resultados das simulações de esquemas de modulação conduzidas no GNU Radio. Em seguida, será realizada a análise e a discussão crítica dessas intervenções, visando avaliar e propor melhorias para o desempenho da Rede IFPB-ALUNO no IFPB Campus Campina Grande.

7.1 Análise dos Resultados

A análise conjunta dos parâmetros de desempenho da rede (*Download*, *Upload*, *Ping*, *Jitter* e dBm) e dos cenários de modulação mostra um contraste significativo entre o potencial técnico do *Access Point* Huawei AP8130DN e o desempenho real entregue aos usuários. Embora o AP suporte taxas teóricas de até 1,75 Gbit/s (ou 2,6 Gbit/s em modo Dual-5G), tecnologia 3×3 MIMO, múltiplos fluxos espaciais e potência de transmissão elevada (28 dBm em 2,4 GHz e 26 dBm em 5 GHz), o comportamento da rede estudada revela que tais capacidades não se traduzem em qualidade estável de serviço.

O colapso registrado em 30 de maio, com queda brusca de *throughput* e *Jitter* alcançando 320 ms, evidencia que a infraestrutura (apesar de robusta no *datasheet*) sofre com saturação em horários de pico, indicando ausência de controle eficiente de QoS ou limitações no *backbone* ou controladora. Assim, mesmo que o AP seja capaz de atender até 256 usuários simultâneos, na prática o sistema não sustentou a carga, resultando em perda severa de qualidade de conexão.

A instabilidade também é agravada por problemas na camada física, especialmente nos ambientes onde o sinal apresentou SNR extremamente baixo. Apesar de o AP8130DN operar com antenas externas e possuir alta potência de transmissão, pontos como Prog 3, Prog 2 e Info 1, com SNR variando entre 18 dB e 4 dB, não fornecem condições para modulações de alta ordem. Nessas regiões, a rede fica limitada ao uso de esquemas mais robustos, como BPSK, sacrificando a eficiência espectral. Mesmo em locais com sinal excelente, como o Lab Telecom, onde o equipamento poderia operar confortavelmente com 256-QAM (a modulação empregada no APS) o alto *Ping* e o *Jitter* instável impedem

que se aproveite todo o potencial do AP.

É importante destacar que o AP8130DN possui funcionalidades avançadas, como detecção de interferência, *Dual-5G Radio Technology*, suporte a Fat/Fit AP, e capacidade de ponte *wireless*. Nada disso, porém, consegue compensar problemas estruturais da rede, como falhas de cobertura, interferências persistentes não mitigadas, ou congestionamento na infraestrutura central, que comprometem o desempenho mesmo de um equipamento projetado para cenários de alta concorrência.

Assim, a rede apresenta um alto potencial teórico fornecido pelo AP8130DN, mas baixa qualidade real de serviço, a degradação decorre tanto de limitações da camada física, como baixa SNR e cobertura inconsistente, quanto de falta de gerenciamento de tráfego e saturação da infraestrutura.

7.2 Intervenções Propostas

A síntese apresentada integra as necessidades de infraestrutura com a otimização dos recursos avançados do Huawei AP8130DN, estabelecendo a base para recomendações que visam maximizar o desempenho da rede. Para aproximar o desempenho real do valor teórico de até 2,6 Gbit/s, é essencial adotar uma abordagem que combine o reforço do *backbone* e da controladora (AC) com a configuração estratégica dos recursos nativos do AP, garantindo suporte ao tráfego de alta densidade e mitigando problemas de *Jitter*, *throughput* e latência. A ativação e ajuste das políticas de Wi-Fi Multimedia (WMM), aliadas ao gerenciamento adaptativo de largura de banda, permitem priorizar serviços críticos como VoIP e plataformas educacionais, além de evitar a monopolização de recursos por poucos usuários, promovendo estabilidade do *throughput*.

No nível da camada física e de rádio, a baixa SNR observada nas simulações limita o uso de modulações de alta eficiência (MCS), reduzindo a taxa de transmissão. Para contornar isso, recomenda-se o uso da Calibração Automática de Rádio do AP, que ajusta dinamicamente potência e canal, minimizando interferências e melhorando a relação sinal-ruído, permitindo o uso de MCS mais avançados, como 256-QAM. A priorização da banda de 5 GHz, menos sujeita a interferências e capaz de suportar canais mais largos, aliada ao balanceamento de carga entre APs, contribui para uma distribuição uniforme de usuários e a otimização do *throughput* em toda a cobertura.

Além disso, em áreas críticas com sinal fraco ou onde a instalação de cabeamento não é viável, o *Wireless Bridging* permite estender a cobertura de forma eficiente, funcionando como um *relay* entre APs. Combinando o fortalecimento da infraestrutura central e a configuração granular das funcionalidades do AP8130DN, a rede consegue mitigar os problemas identificados, explorando plenamente o potencial do equipamento, garantindo maior eficiência, qualidade de serviço e aproveitamento do *hardware* existente.

7.3 Considerações finais

Os objetivos inicialmente propostos foram plenamente atingidos, uma vez que o trabalho realizou com sucesso as medições de QoS nos laboratórios do campus, mapeou os dados reais para parâmetros de rádio, simulou diferentes esquemas de modulação e codificação no GNU Radio e, por fim, estabeleceu recomendações fundamentadas sobre a escolha adequada de modulações para os cenários observados. Os resultados demonstraram a inviabilidade da 16-QAM nas condições típicas da rede do IFPB e confirmaram que BPSK e QPSK codificados são as opções mais robustas em ambientes de baixa SNR, atendendo diretamente ao objetivo geral da pesquisa.

O presente estudo, aliado às simulações realizadas, demonstrou que, apesar da existência de um *hardware* de alta capacidade como o Huawei AP8130DN, apenas o equipamento em si não garante uma Qualidade de Serviço (QoS) estável em ambientes de alta densidade, como os laboratórios analisados. A degradação do serviço, evidenciada pelo elevado *Jitter*, pela latência e pela instabilidade do *throughput* em horários de pico, revelou que os principais gargalos da rede estão tanto na infraestrutura central quanto no planejamento insuficiente da camada física de rádio.

Conclui-se que transformar o potencial teórico do AP em desempenho real requer uma estratégia de otimização coordenada e inteligente, envolvendo tanto o uso eficiente do *hardware* quanto a configuração estratégica das funcionalidades nativas do AP8130DN. Dessa forma, o ponto de acesso deixa de ser um simples equipamento de conexão, tornando-se um elemento ativo na maximização da eficiência e da estabilidade da rede.

7.4 Trabalhos Futuros

Como desdobramento natural deste estudo, diversos caminhos promissores podem ser explorados para aprofundar e ampliar os resultados obtidos. Um dos principais consiste na implementação prática do sistema SDR em *hardware*, de modo a validar experimentalmente as conclusões derivadas das simulações. Nesse contexto, recomenda-se a utilização de dispositivos acessíveis como o RTL-SDR Blog V3, permitindo observar com maior fidelidade o comportamento do sistema em condições reais. Aliado a isso, torna-se relevante o desenvolvimento de um esquema de Modulação e Codificação Adaptativa (MCS) em tempo real, capaz de ajustar dinamicamente a modulação de acordo com as condições instantâneas do canal, possibilitando ganhos substanciais em eficiência espectral e confiabilidade.

Outro eixo importante de expansão envolve o aprofundamento da camada física e dos mecanismos de proteção do enlace, incluindo a implementação de técnicas de Codificação de Canal (FEC), fundamentais para reduzir a Taxa de Erro de Bits (BER) sem incremento da potência de transmissão. Além disso, estudos com modulações de ordem superior, como

64-QAM e 256-QAM, permitirão avaliar o comportamento do sistema sob esquemas de maior capacidade, embora mais sensíveis ao ruído. Igualmente relevante é a realização de simulações em canais mais complexos, incorporando efeitos de multipercurso, assim como testes envolvendo mobilidade dos dispositivos, buscando aproximar ainda mais os resultados de ambientes reais de operação.

Em termos de ferramentas e metodologias, trabalhos futuros podem explorar soluções mais específicas e amplamente utilizadas na análise de redes, como o Wireshark, aprimorando a avaliação de tráfego, pacotes e métricas de QoS e QoE. Também se destaca a necessidade de expandir a análise para novas bandas de operação, incluindo 5 GHz e 6 GHz (Wi-Fi 6/6E), considerando que estas apresentam menor congestão e oferecem oportunidades de otimização ainda não exploradas neste estudo. Complementarmente, novas pesquisas podem focar na otimização da infraestrutura de *Access Points* no campus, alinhando o desempenho físico do canal às demandas reais dos usuários.

Por fim, um desdobramento de grande potencial consiste no desenvolvimento de um protótipo automatizado, totalmente integrado ao sistema SDR, capaz de monitorar continuamente as condições da rede e ajustar parâmetros como modulação, codificação e largura de banda de forma autônoma. Essa abordagem não apenas ampliaria o impacto prático deste trabalho, como também abriria caminho para soluções inteligentes aplicáveis a redes educacionais, corporativas e industriais.

Referências Bibliográficas

- comdiguis.older. Ber tool in gnu radio demonstration, 2021. URL <https://youtu.be/i0l24r0qk6Q?si=ukKGy1ThKzZf4M4r>. Vídeo do YouTube.
- comdiguis.older. Ber tool and ser (symbol error ration) tool for gnu radio to obtain ber curves and ser curves, 2022. URL <https://youtu.be/Tsb3ouTwNFA?si=0Wb0-EX0W7d1jzRJ>. Vídeo do YouTube.
- Hugo A. O. Cruz, Allan S. Braga, Jasmine P. L. De Araújo, Simone G. C. Fraiha, and Gervásio P. S. Cavalcante. Predição qoe baseado em qos utilizando neuro-fuzzy em transmissão de vídeo em redes wi-fi. Technical report, 2025. Technical report.
- GNU Radio Community. github: The free and open-source toolkit for software defined radio. <https://github.com/gnuradio/gnuradio>, 2024. Repositório GitHub.
- GNU Radio Community. Página inicial (index). <https://wiki.gnuradio.org/index.php>, 2025.
- Angela Hernandez-Solana, Paloma Garcia-Ducar, Antonio Valdovinos, Juan Ernesto Garcia, Jesus De Mingo, and Pedro Luis Carro. Experimental evaluation of transmitted signal distortion caused by power allocation in inter-cell interference coordination techniques for lte/lte-a and 5g systems. *IEEE Access*, 10:47854–47868, 2022. ISSN 21693536. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3170910.
- Huawei Technologies Co., Ltd. *AP8030DN & AP8130DN Access Points Datasheet*. Huawei, Shenzhen, China, 2016. Especificações Técnicas (Data Sheet).
- James F. Kurose and Keith W. Ross. *Redes de Computadores e a Internet*. Pearson, São Paulo, 7 edition, 2021.
- Warley Murici and Valente Junior. Arcabouço para provisionamento de qos e qoe em redes sem fio heterogêneas wimax/wi-fi com garantia de equidade entre vazões. Technical report, Universidade Federal do Pará, Instituto Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, 2025. Technical report.

- Muhammed Mustaqim. Gnuradio tutorial | digital modulation bpsk, qpsk, & 16 qam | adaptive modulation and coding for 5g, 2024. URL https://youtu.be/fKg82UIKhGY?si=sFnVwo_BBqSu-ePh. Vídeo do YouTube.
- Amin Radbord and Jalil S. Harsini. Slow and fast adaptive modulation and coding for uplink massive mimo systems with packet retransmission. *IET Communications*, 16: 915–928, 6 2022. ISSN 17518636. doi: 10.1049/cmu2.12389.
- Tony J. Roupheal. Rf and digital signal processing for software-defined radio: A multi-standard multi-mode approach. Technical report, 2008. Technical report.
- Mohammad Rowshan, Min Qiu, Yixuan Xie, Xinyi Gu, and Jinhong Yuan. Channel coding toward 6g: Technical overview and outlook. *IEEE Open Journal of the Communications Society*, 5:2585–2685, 2024. ISSN 2644125X. doi: 10.1109/OJCOMS.2024.3390000.
- Akbar Kurnia Saleh, Hapsari Peni Agustin Tjahyaningtijias, and Lusia Rakhmawati. Quality of service (qos) comparative analysis of wireless network. Technical report, 2022. Technical report.
- William Stallings. *Wireless Communications & Networks*. Pearson, 2 edition, 2020.

	INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
	Campus Campina Grande - Código INEP: 25137409
	R. Tranquilino Coelho Lemos, 671, Dinamérica, CEP 58432-300, Campina Grande (PB)
	CNPJ: 10.783.898/0003-37 - Telefone: (83) 2102.6200

Documento Digitalizado Restrito

Trabalho de conclusão de curso

Assunto:	Trabalho de conclusão de curso
Assinado por:	Maria Giovana
Tipo do Documento:	Anexo
Situação:	Finalizado
Nível de Acesso:	Restrito
Hipótese Legal:	Informação Pessoal (Art. 31 da Lei no 12.527/2011)
Tipo do Conferência:	Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- **Maria Giovana Serafim de Almeida, DISCENTE (202211210012) DE TECNOLOGIA EM TELEMÁTICA - CAMPINA GRANDE**, em 13/01/2026 22:22:30.

Este documento foi armazenado no SUAP em 13/01/2026. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 1729149
Código de Autenticação: 4c9924396d

