



A Utilização de um Sistema MIMO para a Televisão Digital no Brasil

JOÃO PEDRO BORGES DA SILVA

Setembro de 2024

POLITÉCNICO DO PORTO
INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO

A Utilização de um Sistema MIMO para a Televisão Digital no Brasil

João Pedro Borges da Silva

Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores
Área de Especialização em Automação e Sistemas



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto

Setembro, 2024

Esta dissertação satisfaz, parcialmente, os requisitos que constam da Ficha de Unidade Curricular de Tese/Dissertação, do 2º ano, do Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores, Área de Especialização em Automação e Sistemas.

Candidato: João Pedro Borges da Silva, Nº 1230080, 1230080@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Paula Viana e

Cristiano Akamine, pmv@isep.ipp.pt\cristiano.akamine@mackenzie.br



DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELETROTÉCNICA
Instituto Superior de Engenharia do Porto
Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431, 4200-072 Porto

Setembro, 2024

Agradecimentos

Agradeço aos amigos que fizeram parte da jornada de dupla-titulação e a família pelo apoio

Resumo

A partir da introdução da TV digital, o Brasil viu melhorias significativas na qualidade de imagem e som, além de permitir maior interatividade e inclusão social por meio da tecnologia digital. No entanto, o espectro limitado se tornou um desafio crescente devido à alta demanda por serviços de comunicação, principalmente em áreas urbanas. Este trabalho examina a implementação da tecnologia *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) para melhorar a capacidade de transmissão da televisão digital no Brasil, especialmente em face da escassez de espectro disponível nas grandes cidades.

A abordagem proposta inclui o uso de sistemas MIMO para aumentar a eficiência espectral e a capacidade de transmissão. O trabalho detalha a modelagem de canal e algoritmos de processamento de sinal necessários para implementar a tecnologia MIMO, utilizando a tecnologia de pré-codificação e explorando bandas de frequência mais amplas para otimizar o uso do espectro. As simulações são realizadas com o suporte da biblioteca Sionna da Nvidia, facilitando a integração e avaliação do aprendizado de máquina em comunicações 6G.

O estudo destaca a necessidade de adaptações tecnológicas no setor de radiodifusão brasileiro e propõe soluções para problemas associados à falta de espectro. Os resultados indicam que a implementação do MIMO 2x2 melhora significativamente a qualidade do serviço e o desempenho do sistema com diferentes valores de correlação estabelecidos como decimais no código usado. O sistema apresenta o melhor desempenho quando o fator de correlação está próximo de 0,1 para ambas as antenas.

Palavras-Chave: MIMO, Televisão digital, Espectro eletromagnético, Comunicação sem fio, Eficiência espectral, Tecnologia de transmissão.

Abstract

Since the introduction of digital TV, Brazil has seen significant improvements in image and sound quality, as well as allowing for greater interactivity and social inclusion through digital technology. However, the limited spectrum has become a growing challenge due to the high demand for communication services, especially in urban areas. This work examines the implementation of MIMO technology to improve the transmission capacity of digital television in Brazil, especially in the face of the scarcity of available spectrum in large cities.

The proposed approach includes the use of MIMO systems to increase spectral efficiency and transmission capacity. The work details the channel modeling and signal processing algorithms required to implement MIMO technology, using precoding technology and exploring wider frequency bands to optimize spectrum use. Simulations are performed with the support of Nvidia's Sionna library, facilitating the integration and evaluation of machine learning in 6G communications.

The study highlights the need for technological adaptations in the Brazilian broadcasting sector and proposes solutions to problems associated with the lack of spectrum. The results indicate that the implementation of 2x2 MIMO significantly improves service quality and system performance with different correlation values set as decimals in the code used. The system performs best when the correlation factor is close to 0.1 for both antennas.

Keywords: MIMO, Digital television, Electromagnetic spectrum, Wireless communication, Spectral efficiency, Transmission technology. .

Índice

Lista de Figuras	vii
Lista de Tabelas	ix
Listagens	xi
Lista de Acrónimos	xiii
1 Introdução	1
1.1 Problema de Pesquisa	2
1.2 Objetivos	3
1.3 Estrutura da Tese	4
2 Estudo das Abordagens Atuais de Televisão Digital	5
2.1 Blocos principais de um sistema de TV	6
2.2 Padrões de TV Digital	8
2.3 Evolução dos padrões	10
2.4 Projeto da TV 3.0 no Brasil	12
2.4.1 Fases do Projeto	13
Fase 1	13
Fase 2	14
Fase 3	15
2.4.2 Pesquisas Relacionadas com o Projeto da TV 3.0	16
3 Tecnologias e Conceitos Para o Auxílio de Simulações	21
3.1 Modulações Digitais	22
3.1.1 QAM	22
3.1.2 OFDM	23
3.2 Sistemas de Comunicação com Múltiplas Antenas	25
3.2.1 SISO	25
3.2.2 SIMO	26
3.2.3 MISO	27
3.2.4 MIMO	28
3.2.5 Configurações de sistemas MIMO	30

	<i>Spacial Multiplexing</i>	30
	<i>Diversity</i>	31
	<i>Beamforming</i>	33
3.2.6	Desafios técnicos de sistemas MIMO	34
	<i>Cross-Polarization</i>	34
	Correlação Espacial	36
	Complexidade de Processamento de Sinal	37
	Desvanecimento de multi-percursos	37
3.3	Teoria e Aplicações em MIMO	38
3.3.1	Ferramenta de Simulação: Sionna	38
3.3.2	Modelo Kronecker	40
3.3.3	Canais	41
	<i>Flat Fading</i>	41
	<i>Clustered Delay Line (CDL)</i>	43
4	Metodologia e Resultados	45
4.1	Metodologia para a análise do fator de correlação	46
4.2	Resultados da análise do fator de correlação	47
4.3	Metodologia para a análise de um modelo CDL	54
4.4	Resultados da análise de um modelo CDL	55
5	Conclusão	61
	Referências	63

Lista de Figuras

1.1	Evolução da Televisão Digital Terrestre[3]	2
2.1	Diagrama de blocos de um sistema de transmissão de Televisão (TV) Digital.	6
3.2	Modulação OFDM	24
3.3	Representação de um sistema SISO, com uma única antena transmissora e uma única antena recetora [21].	25
3.4	Ilustração de um sistema SIMO, mostrando uma única antena transmissora e múltiplas antenas recetoras[21].	26
3.5	Sistema MISO com múltiplas antenas transmissoras e uma única antena recetora [21].	28
3.6	Sistema MIMO com múltiplas antenas transmissoras e recetoras [21].	29
3.7	Sistema de transmissão e recepção MIMO 2x2.	40
4.1	Diagrama de Blocos.	47
4.2	Comparação das diferentes modulações QAM.	48
4.3	Curva de BER para 4-QAM.	50
4.4	Curva de BER para 16-QAM.	51
4.5	Curva de BER para 256-QAM.	52
4.6	Curva de BER com diferentes fatores de correlação entre as antenas.	53
4.7	Diagrama de Blocos.	55
4.8	Curva de BER para 4-QAM em um canal CDL.	56
4.9	Curva de BER para 16-QAM em um canal CDL.	58
4.10	Curva de BER para 256-QAM em um canal CDL.	59

Lista de Tabelas

2.1	Tabela comparativa de padrões de TV Digital	10
2.2	Tabela comparativa de novos padrões de TV Digital	12
2.3	Parâmetros de modulação da camada física que foram avaliadas . . .	17
2.4	Parâmetros do sistema <i>Advanced</i> ISDB-T	18

Listagens

4.1	Definição de uma classe de modelo com canal <i>Flat Fading</i>	48
4.2	Lógica para a elaboração dos gráficos.	49

Lista de Acrónimos

8-VSB	<i>8-Level Vestigial Sideband</i>
AAC	<i>Advanced Audio Coding</i>
AC	<i>Audio Coding</i>
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
AoA	<i>Angle of Arrival</i>
AoD	<i>Angle of Departure</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
ATSC	<i>Advanced Television Systems Committee</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BST-OFDM	<i>Band Segmented Transmission - Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
CDL	<i>Clustered Delay Line</i>
COFDM	<i>Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
DTMB	<i>Digital Terrestrial Multimedia Broadcast</i>
DVB-T	<i>Digital Video Broadcasting - Terrestrial</i>
DVB-T2	<i>DVB-T2 (Digital Video Broadcasting - Terrestrial Second Generation)</i>
EPG	<i>Electronic Program Guide</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
HbbTV	<i>Hybrid Broadcast Broadband TV</i>
HD	<i>High Definition</i>
HDR	<i>High Dynamic Range</i>

HDTV	<i>High Definition Television</i>
HEVC	<i>High Efficiency Video Coding</i>
HTML	<i>HyperText Markup Language</i>
IF	<i>Intermediate Frequency</i>
ISDB-T	<i>Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial</i>
LDPC	<i>Low Density Parity Check</i>
LMMSE	<i>Linear Minimum Mean Square Error</i>
LMS	<i>Least Mean Squares</i>
MER	<i>Modulation Error Ratio</i>
MHP	<i>Multimedia Home Platform</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MISO	<i>Multiple-Input Single-Output</i>
MMT	<i>MPEG Media Transport</i>
MPEG	<i>Moving Picture Experts Group</i>
MRC	Máxima Razão de Combinação
MRT	Máxima Razão de Transmissão
NTSC	<i>National Television System Committee</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
RF	<i>Radio Frequency</i>
RLS	<i>Recursive Least Squares</i>
SBTVD	Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre
SD	<i>Standard Definition</i>
SDMA	<i>Space-Division Multiple Access</i>
SIMO	<i>Single-Input Multiple-Output</i>
SISO	<i>Single-Input Single-Output</i>

SVD	<i>Singular Value Decomposition</i>
TEB	Taxa de Erro de Bit
TS	<i>Transport Stream</i>
TV	Televisão
UHD	<i>Ultra High Definition</i>
ZF	<i>Zero Forcing</i>

Capítulo 1

Introdução

A televisão é uma importante ferramenta de comunicação de massa no Brasil desde a sua chegada na década de 1950, sendo chamada de TV 1.0. Nesse período, a televisão era transmitida em formato analógico e em preto e branco. A programação era limitada e dominada por poucos canais, e a recepção dos sinais era captada por meio de antenas externas.

A TV 1.0 era caracterizada por uma audiência passiva, em que os espetadores apenas assistiam ao conteúdo transmitido, sem interação ou participação direta [1].

A Fase 1.5 da TV refere-se a uma etapa intermediária de transição entre a Fase 1 e a Fase 2, a qual foi caracterizada pela adoção da TV a cores. A introdução destas melhorias na fase 1.5 traz benefícios significativos em relação à qualidade de como é percebida a imagem.

Com a evolução da tecnologia, a implementação da TV 2.0 ocorreu em 2007. Com a adoção do sistema de transmissão digital, houve melhorias significativas na qualidade de imagem e som. A TV 2.0 permitiu a introdução da televisão em alta definição (*High Definition Television* (HDTV)), áudio em múltiplos canais (*surround sound*) e a possibilidade de interatividade por meio do Ginga, um *middleware* que permitia o desenvolvimento de aplicativos para a TV. Essa fase também viu a ampliação da oferta de canais e a inclusão de serviços de transmissão móvel, permitindo que os espetadores assistissem a conteúdo em seus dispositivos móveis, como *smartphones* e *tablets* [1].

A TV digital também permitiu maior inclusão social, oferecendo acesso à informação e entretenimento para populações que antes não tinham acesso à TV,

contribuindo para a formação de valores e construção de uma sociedade mais crítica e consciente.

Atualmente a TV brasileira oferece uma grande variedade de canais e programas, e a TV 3.0, caracterizada pela sua conectividade à Internet, permite aos espectadores acessarem uma ampla variedade de conteúdo online, incluindo serviços de *streaming*, plataformas de vídeo sob demanda e redes sociais. Além disso, essa nova geração de televisão oferece recursos interativos, proporcionando aos espectadores a oportunidade de participarem ativamente no conteúdo. Eles podem votar em programas ao vivo, ter acesso a informações adicionais relacionadas ao que está sendo exibido, interagir com aplicativos específicos da TV e até mesmo integrar seus dispositivos móveis nessa experiência, surgindo assim como uma nova tendência na televisão. A TV 3.0 promete revolucionar a forma como as pessoas consomem conteúdo televisivo, tornando a experiência do telespectador mais envolvente e realista [2].

No contexto da TV 3.0 no Brasil, o uso de um sistema de *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) pode contribuir para uma transmissão mais eficiente e estável, permitindo a transmissão de conteúdos em alta definição e com interatividade sem interrupções. A trajetória da TV digital no Brasil pode ser observada na Figura 1.1

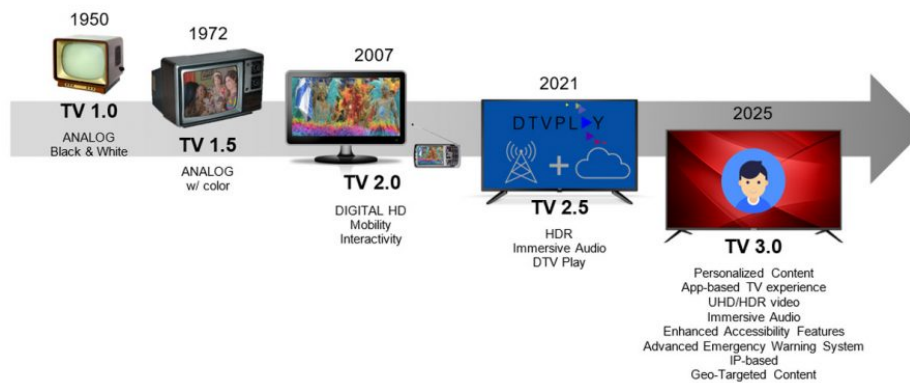


Figura 1.1: Evolução da Televisão Digital Terrestre[3]

1.1 Problema de Pesquisa

No Brasil, assim como em outros países, as principais cidades enfrentam o desafio da falta de espectro disponível para a TV digital. O espectro eletromagnético é uma faixa finita de frequências dividida e atribuída a diferentes serviços de comunicação, como a telefonia móvel, rádio, televisão e *internet*. Com o crescimento contínuo da demanda por serviços de comunicação, especialmente nas áreas urbanas, o espectro útil se torna um recurso limitado.

A escassez de espectro nas principais cidades brasileiras acarreta diversos problemas para alocação de frequência para TV digital. A falta de espectro disponível

dificulta a expansão e a implantação de novos serviços de comunicação, resultando em restrições na cobertura e qualidade do sinal [4]. A interferência entre sinais e a polarização cruzada são problemas significativos que afetam a qualidade da transmissão. A interferência pode ocorrer quando múltiplos sinais compartilham a mesma frequência ou frequências próximas, resultando em degradação do sinal. A polarização cruzada, que ocorre quando as polarizações dos sinais transmitidos e recebidos não são alinhadas corretamente, também pode levar a perdas de sinal e redução da eficiência da transmissão.

Neste enquadramento, encontrar soluções que permitam melhorar o serviço de TV digital é essencial para garantir a oferta de funcionalidades avançadas e melhorias da qualidade de experiência.

Uma possível solução para aumentar a capacidade de transmissão e mitigar os problemas decorrentes da falta de espectro é a utilização da tecnologia MIMO 2x2, que inclui duas antenas de transmissão e duas de recepção. O MIMO 2x2 permite a transmissão e recepção simultânea de múltiplos fluxos de dados utilizando múltiplas antenas com polarizações diferentes, resultando em um aumento da capacidade de transmissão e da eficiência espectral.

O objetivo do MIMO 2x2 para TV digital é aumentar a capacidade do canal de comunicação, podendo dobrar a taxa de transmissão de bits. Isso é possível devido à utilização de duas antenas de transmissão e recepção, que permitem o envio e recebimento simultâneo de múltiplos fluxos de dados [5].

A implementação do MIMO 2x2 na TV digital pode ajudar a melhorar a qualidade do sinal transmitido e recebido, aumentar a cobertura e oferecer uma experiência de visualização mais estável e satisfatória aos usuários. Essa tecnologia permite explorar melhor as capacidades do espectro disponível, maximizando a eficiência de transmissão em ambientes urbanos densos [2].

1.2 Objetivos

Para a resposta dos problemas identificados, vamos considerar a recepção com antena interna e a investigação da polarização cruzada, que foi simulada. O principal objetivo desta dissertação é realizar simulações de sistemas MIMO 2x2, com especial foco nos resultados gerados a partir da biblioteca Sionna, desenvolvida pela NVIDIA [6]. Busca-se obter dados que demonstrem a eficácia do MIMO 2x2 e investigar como esses resultados podem impactar positivamente a população das grandes cidades, que frequentemente enfrentam a escassez de espectro. As simulações serão conduzidas variando os fatores de correlação e utilizando diferentes técnicas de modulação para avaliar o desempenho do sistema. O critério de sucesso será a obtenção de uma Taxa de Erro de Bit (TEB), conhecida como *Bit Error Rate* (BER), com limiar de

10^{-6} , que demonstrem a viabilidade da implementação do MIMO 2x2 na TV digital brasileira.

1.3 Estrutura da Tese

Este documento encontra-se estruturado nas seguintes partes:

- Capítulo 1, denominado "Introdução", apresenta uma breve contextualização ao trabalho proposto, assim como os seus objetivos e a sua estrutura;
- Capítulo 2, denominado "Estudo das Abordagens Atuais de Televisão Digital", apresenta o estado da arte de sistemas de transmissão sem fio abordando os conceitos e técnicas associadas;
- Capítulo 3, denominado "Tecnologias e Conceitos Para o Auxílio de Simulações", abordam algumas ferramentas e parâmetros utilizados para realizar a simulação de um canal de transmissão;
- Capítulo 4, denominado "Metodologia e Resultados", abordam-se alguns algoritmos e técnicas que serão úteis para o processamento e pré-codificação do sinal e também são apresentados os resultados obtidos sendo feita uma análise desses valores obtidos;
- Capítulo 5, denominado "Conclusão", reúne as considerações finais do trabalho realizado e apresenta sugestões para trabalho futuro.

Capítulo 2

Estudo das Abordagens Atuais de Televisão Digital

Sistemas de comunicação são conjuntos de componentes e tecnologias integrados que trabalham juntos para transmitir, processar e receber informações. Esses sistemas são usados para a troca de dados em formas como voz, vídeo, dados digitais e sinais de controle.

Os principais componentes dos sistemas de comunicação incluem o transmissor, o meio de transmissão, o receptor, as antenas e os protocolos de comunicação. O transmissor converte a informação (dados, voz, vídeo) em um sinal que pode ser transmitido, utilizando moduladores, amplificadores e codificadores de sinal. O meio de transmissão é o caminho pelo qual o sinal viaja do transmissor ao receptor e pode ser um meio físico, como cabos de fibra ótica e cabos coaxiais, ou meios sem fio, como ondas de rádio e micro-ondas. O receptor recebe o sinal transmitido e o converte de volta na informação original, utilizando demoduladores, amplificadores e decodificadores de sinal. As antenas são dispositivos utilizados para transmitir e receber sinais em sistemas sem fio, desempenhando um papel crucial na eficiência e alcance do sistema de comunicação. Os protocolos de comunicação são um conjunto de regras e normas que garantem a integridade, sincronização e segurança na troca de dados entre os componentes do sistema.

2.1 Blocos principais de um sistema de TV

Um sistema de transmissão de TV Digital pode ser separado em blocos, blocos estes podem ser visualizados no diagrama da Figura 2.1.

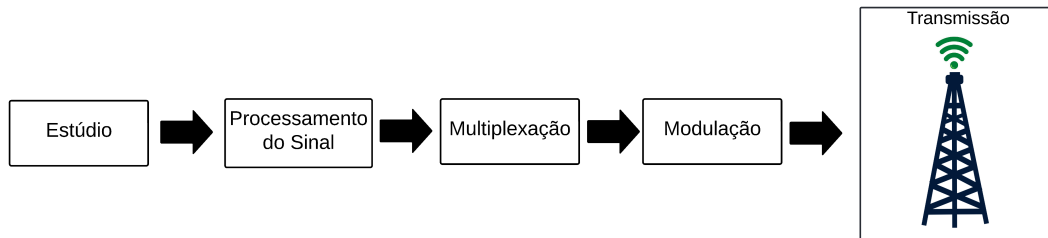


Figura 2.1: Diagrama de blocos de um sistema de transmissão de TV Digital.

O bloco estúdio caracteriza onde é realizada a captura do conteúdo, utilizando câmaras de vídeo para gravar imagens em movimento e microfones para captar o som. O estúdio também pode realizar a produção e edição do conteúdo para garantir qualidade e coerência, incluindo a adição de gráficos, efeitos especiais e outras pós-produções. Além disso, o estúdio gera metadados que fornecem informações adicionais sobre o conteúdo, como detalhes sobre programas e horários de transmissão, que são úteis para as etapas de multiplexação e modulação.

O bloco de processamento de sinal caracteriza as funções de, conversão de formato analógico para digital através de conversores analógico para digital, a compressão reduz a quantidade de dados necessários para representar o conteúdo, utilizando *codecs* para vídeo e para áudio. O processamento do sinal pode incluir a aplicação de filtros e técnicas de equalização para melhorar a qualidade do sinal. Filtragem pode ser utilizada para remover ruídos indesejados, enquanto a equalização ajusta o equilíbrio das frequências de áudio e vídeo, garantindo uma reprodução fiel do conteúdo original. Este bloco também pode envolver a inserção de metadados, que são informações adicionais sobre o conteúdo, como descrições, legendas e informações sobre direitos do autor. Durante o processamento do sinal, é importante garantir que os dados estejam sincronizados. A sincronização de áudio e vídeo é fundamental para que ambos os tipos de media sejam reproduzidos em harmonia, proporcionando uma experiência de visualização coesa para o espectador.

O bloco de multiplexação combina diferentes fluxos de dados de vídeo, áudio e dados auxiliares em um único fluxo de transporte. Cada fluxo de dados representa uma parte diferente do conteúdo a ser transmitido, como múltiplos canais de áudio, várias câmaras de vídeo, ou dados adicionais como legendas e informações de programação. A camada de transporte organiza e gerencia os fluxos de dados combinados. Isso é feito utilizando um formato de contentor padrão. Durante a multiplexação,

são inseridas informações de controle e metadados que ajudam os recetores a descodificar corretamente os fluxos de dados. Esses metadados podem incluir informações sobre a estrutura do fluxo de transporte, identificadores de programa, informações de serviço e detalhes sobre os *codecs* utilizados. O multiplexador gerencia a alocação de largura de banda entre os diferentes fluxos de dados. A largura de banda é um recurso limitado, e a multiplexação eficiente garante que ela seja utilizada da melhor forma possível, evitando congestionamento. A multiplexação também pode incluir técnicas de correção de erros para proteger os dados durante a transmissão. Isso é feito através da inserção de redundância adicional nos pacotes de dados, permitindo que erros que ocorram durante a transmissão possam ser detetados e corrigidos no recetor. O bloco de modulação é responsável por converter o sinal digital em um formato que pode ser transmitido eficientemente através de um meio de transmissão, como cabo, satélite ou ondas terrestres. A modulação adapta o sinal digital às características do meio de transmissão, garantindo que ele possa ser transmitido com a máxima eficiência e recuperado com alta qualidade no recetor, diferentes sistemas de TV digital utilizam diferentes técnicas de modulação, dependendo das características do meio de transmissão e dos requisitos de desempenho.

O bloco da transmissão tem a função de entregar o sinal modulado ao público-alvo. Este bloco garante que o sinal seja transmitido com a potência necessária e a qualidade adequada para ser captado pelos recetores dos espetadores. O processo começa com o sinal de entrada digital modulado, que é amplificado para níveis de potência elevados por meio de um amplificador de potência. O amplificador deve ser linear para evitar distorções no sinal, e o ganho é ajustado para que o sinal esteja na potência correta para a transmissão, evitando sobrecarga. Após a amplificação, o sinal passa por um filtro de banda passante, que garante que ele esteja dentro da faixa de frequência designada, removendo qualquer interferência fora da banda. Isso é necessário para evitar interferências com outros canais e serviços de comunicação. Em seguida, o sinal amplificado pode ser combinado com outros sinais modulares, se múltiplas estações ou canais estiverem sendo transmitidos simultaneamente, por meio de um combinador. O sinal combinado é então dividido entre várias antenas transmissoras, se necessário, para melhorar a cobertura e reduzir sombras de sinal. A antena de transmissão converte o sinal elétrico amplificado em ondas de rádio. A escolha da antena é importante, pois ela deve transmitir o sinal na frequência correta com a potência necessária. As antenas são montadas em torres altas para maximizar a cobertura, minimizando obstáculos físicos como edifícios e terrenos irregulares. Dependendo do planeamento da rede de transmissão, as antenas podem ser polarizadas vertical ou horizontalmente para melhorar a receção e minimizar interferências [7].

2.2 Padrões de TV Digital

Ao redor do mundo, existem diferentes padrões de TV Digital, cada um utilizando tecnologias específicas, sendo:

- *Advanced Television Systems Committee (ATSC)*
- *Digital Video Broadcasting - Terrestrial (DVB-T)*
- *Integrated Services Digital Broadcasting - Terrestrial (ISDB-T)*
- *Digital Terrestrial Multimedia Broadcast (DTMB)*

O ATSC é um padrão de TV digital utilizado principalmente nos Estados Unidos, Canadá, México e Coreia do Sul. Foi desenvolvido para substituir o sistema analógico *National Television System Committee (NTSC)*. Utiliza a modulação *8-Level Vestigial Sideband (8-VSB)*, que mapeia grupos de três bits em oito níveis distintos de amplitude, resultando em uma modulação de oito níveis. A técnica de banda lateral vestigial retém uma porção da banda lateral inferior e a totalidade da banda lateral superior da onda portadora modulada, tornando o espectro de transmissão mais eficiente em termos de largura de banda. Para compressão de vídeo, o ATSC utiliza o formato *Moving Picture Experts Group (MPEG)-2*, que reduz a quantidade de dados necessários para transmitir vídeo de alta definição. A compressão de áudio é realizada com o formato *Audio Coding (AC)-3*, Dolby Digital, que suporta áudio multicanal. O ATSC suporta resoluções de vídeo que vão desde definição padrão, *Standard Definition (SD)*, até alta definição, *High Definition (HD)*, com resoluções típicas de 480i para SD e 720p e 1080i para HD. A multiplexação combina múltiplos fluxos de dados em um único sinal de transmissão, utilizando o formato de contentor *MPEG-2 Transport Stream (TS)*. A camada de transporte do ATSC é o *MPEG-2 TS*, que organiza os dados em pacotes, permitindo a fácil separação e decodificação no receptor. O ATSC inclui funcionalidades de interatividade, principalmente através do *Electronic Program Guide (EPG)*, que fornece uma interface para os espectadores acessarem informações sobre os programas de TV [8].

O DVB-T é um padrão de TV digital utilizado principalmente na Europa e Oceânia. Utiliza a modulação *Coded Orthogonal Frequency Division Multiplexing (COFDM)*, que divide o sinal em múltiplas subportadoras ortogonais, cada uma modulada individualmente. Essa técnica distribui a informação ao longo de uma ampla faixa de frequências, melhorando a resistência contra interferências e multipercursos. O DVB-T suporta compressão de vídeo em formatos *MPEG-2* e *H.264*. O *MPEG-2* é utilizado para transmissões SD, enquanto o *H.264* é utilizado para compressão mais eficiente em transmissões HD. Para compressão de áudio, o DVB-T utiliza *MPEG Layer II* e *Dolby Digital*, permitindo áudio multicanal. As resoluções de vídeo suportadas pelo DVB-T variam de SD a HD, com resoluções típicas de 576i

para SD e 720p e 1080i para HD. A multiplexação no DVB-T combina múltiplos fluxos de dados em um único sinal de transmissão, utilizando o formato de contentor MPEG-2 TS. A camada de transporte é o MPEG-2 TS. O DVB-T utiliza o *middleware Multimedia Home Platform* (MHP) para serviços interativos, permitindo a criação de aplicativos interativos para os espetadores [8, 9].

O ISDB-T é um padrão de TV digital utilizado no Japão, Brasil e outros países da América Latina. Utiliza a modulação *Band Segmented Transmission - Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (BST-OFDM), que permite a transmissão em múltiplos segmentos de banda. Cada segmento pode ser modulado independentemente, permitindo flexibilidade na alocação de largura de banda para diferentes serviços. Para compressão de vídeo, o ISDB-T suporta os formatos MPEG-2 e H.264. Assim como o DVB-T o MPEG-2 é utilizado para transmissões SD, enquanto o H.264 é utilizado para transmissões de HD. A compressão de áudio é realizada com o formato *Advanced Audio Coding* (AAC), que suporta áudio multicanal. O ISDB-T suporta resoluções de vídeo de SD a HD, com resoluções típicas de 480i para SD e 720p e 1080i para HD. A multiplexação no ISDB-T combina múltiplos fluxos de dados em um único sinal de transmissão, utilizando o formato de contentor MPEG-2 TS. O ISDB-T utiliza o *middleware* Ginga para serviços interativos, permitindo a criação de aplicativos interativos para os espetadores [8, 9].

O DTMB é um padrão de TV digital utilizado na China, Hong Kong e Macau. Utiliza uma combinação de modulações *Quadrature Amplitude Modulation* (QAM) e *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). A modulação QAM é utilizada para transmitir dados com alta eficiência espectral, enquanto a OFDM distribui os dados em múltiplas subportadoras ortogonais, aumentando a robustez contra interferências e multipercursos. Para compressão de vídeo, o DTMB utiliza o formato H.264, que reduz a quantidade de dados necessários para transmitir vídeo de alta definição. A compressão de áudio é realizada com os formatos MPEG-1 Layer II, AAC e AC-3. O DTMB suporta resoluções de vídeo de SD a HD, com resoluções típicas de 480i para SD e 720p e 1080i para HD. A multiplexação no DTMB combina múltiplos fluxos de dados em um único sinal de transmissão, utilizando o formato de contentor GB20600-2006. Este formato organiza os dados em pacotes, permitindo a fácil separação e descodificação no recetor. A camada de transporte utilizada no DTMB é o GB20600-2006, que organiza e gerencia os dados para transmissão eficiente [10].

A Tabela 2.1 mostra de maneira resumida o que cada padrão utiliza como modulação, compressão de vídeo e áudio e interatividade.

Tabela 2.1: Tabela comparativa de padrões de TV Digital

Padrão	Modulação	Compressão de Vídeo	Compressão de Áudio	Camada de Transporte	Interatividade
ATSC	8-VSB	MPEG-2	AC-3	MPEG-2 TS	EPG
DVB-T	COFDM	MPEG-2, H.264	MPEG Layer II, Dolby Digital	MPEG-2 TS	MHP
ISDB-T	BST-OFDM	MPEG-2, H.264	MPEG-2 AAC	MPEG-2 TS	Ginga
DTMB	QAM, OFDM	H.264	MPEG-1 Layer II, AAC, AC-3	B20600-2006	

2.3 Evolução dos padrões

Com o passar dos anos novas tecnologias foram criadas o que aprimoraram o que a TV digital pode oferecer, TV 3.0 refere-se ao conjunto de tecnologias e padrões que elevam a experiência televisiva a um nível altamente interativo e personalizado. A ideia central é que a televisão possa não apenas oferecer conteúdo em alta definição, mas também permitir uma interação direta e multifuncional com esse conteúdo. Isso inclui funcionalidades como escolhas de ângulo de câmera, interações em tempo real durante transmissões ao vivo, e conteúdo adaptativo baseado nas preferências do usuário.

Os padrões citados na sessão anterior passaram por novas atualizações para atender a TV 3.0.

O ATSC 3.0 é uma versão avançada do padrão ATSC. Este padrão foi desenvolvido para melhorar a eficiência de transmissão e introduzir novos recursos. Utiliza a modulação OFDM. Para compressão de vídeo, o ATSC 3.0 suporta o formato *High Efficiency Video Coding* (HEVC) permitindo a transmissão de vídeo de alta definição e ultra alta definição com menor largura de banda. A compressão de áudio é realizada com formatos como AC-4 e MPEG-H, que suportam áudio multicanal e imersivo. As resoluções de vídeo suportadas vão do SD a ultra alta definição, *Ultra High Definition* (UHD), incluindo 480i para SD, 720p e 1080i para HD, e 2160p para UHD. A multiplexação combina múltiplos fluxos de dados em um único sinal de transmissão, utilizando o formato de conteúdo ROUTE/DASH. Este formato organiza os dados em pacotes, permitindo a fácil separação e decodificação no receptor. O ATSC 3.0 inclui funcionalidades de interatividade avançadas, suportando aplicativos baseados em *HyperText Markup Language* (HTML) e *Application Programming Interface* (API) web, o que possibilita a criação de serviços interativos como guias eletrônicos de programação, jogos e vídeos sob demanda. A camada de transporte utilizada é o ROUTE/DASH [11].

O *DVB-T2* (*Digital Video Broadcasting - Terrestrial Second Generation* (DVB-T2)) é uma versão avançada do padrão DVB-T, utilizado principalmente na Europa, Austrália. Este padrão foi desenvolvido para melhorar a eficiência de transmissão e introduzir novos recursos. Permanece utilizando a modulação COFDM. Para compressão de vídeo, o DVB-T2 suporta os formatos HEVC e H.264, permitindo a transmissão de vídeo de alta definição e ultra alta definição com menor largura

de banda. A compressão de áudio é realizada com formatos como MPEG Layer II, Dolby Digital e AAC, que suportam áudio multicanal e imersivo. As resoluções de vídeo suportadas vão de SD a UHD, incluindo 576i para SD, 720p e 1080i para HD, e 2160p para UHD. A multiplexação combina múltiplos fluxos de dados em um único sinal de transmissão, utilizando o formato de contentor MPEG-2 TS. A camada de transporte utilizada é o MPEG-2 TS. O DVB-T2 utiliza o *middleware Hybrid Broadcast Broadband TV* (HbbTV) para serviços interativos, permitindo a criação de aplicativos interativos para os espetadores.

O *Advanced ISDB-T* é uma versão aprimorada do padrão ISDB-T. Este padrão foi desenvolvido para melhorar a eficiência de transmissão e introduzir novos recursos. Permanece utilizando a modulação BST-OFDM, permitindo a transmissão em múltiplos segmentos de banda e melhorando a robustez contra interferências e multipercursos. Para compressão de vídeo, o *Advanced ISDB-T* suporta o formato HEVC, permitindo a transmissão de vídeo de alta definição e ultra alta definição com menor largura de banda. A compressão de áudio é realizada com o formato MPEG-H, que suporta áudio multicanal e imersivo. As resoluções de vídeo suportadas vão de definição SD a UHD, incluindo 480i para SD, 720p e 1080i para HD, e 2160p para UHD. A multiplexação combina múltiplos fluxos de dados em um único sinal de transmissão, utilizando o formato de contentor MMT. A camada de transporte utilizada é o *MPEG Media Transport* (MMT). O MMT foi projetado para ser utilizado em diversas plataformas de transmissão, incluindo redes de transmissão terrestre, redes IP e redes móveis. O *Advanced ISDB-T* utiliza o *middleware* Ginga-FSD para serviços interativos, permitindo a criação de aplicativos interativos para os espetadores.

O DTMB-A é uma versão avançada do padrão DTMB. Este padrão foi desenvolvido para melhorar a eficiência de transmissão e introduzir novos recursos. Continua utilizando uma combinação de modulações QAM e OFDM. Para compressão de vídeo, o DTMB-A suporta o formato HEVC, permitindo a transmissão de vídeo de alta definição e ultra alta definição com menor largura de banda. A compressão de áudio é realizada com os formatos MPEG-1 Layer II, AAC e AC-3. As resoluções de vídeo suportadas vão de SD a UHD, incluindo 480i para SD, 720p e 1080i para HD, e 2160p para UHD. A multiplexação combina múltiplos fluxos de dados em um único sinal de transmissão, utilizando o formato de contentor GB20600-2006. A camada de transporte utilizada é o GB20600-2006. O DTMB-A permite funcionalidades interativas através de soluções adicionais, não possuindo um *middleware* específico como os outros padrões.

Uma das novas adições nos padrões de transmissão de TV digital é a utilização de antenas MIMO.

A Tabela 2.2 mostra de maneira resumida o que cada padrão utiliza como modulação, compressão de vídeo e áudio e interatividade.

Tabela 2.2: Tabela comparativa de novos padrões de TV Digital

Padrão	Modulação	Compressão de Vídeo	Compressão de Áudio	Camada de Transporte
ATSC 3.0	OFDM	HEVC	AC-4 e MPEG-H	ROUTE/DASH
DVB-T2	COFDM	HEVC, H.264	MPEG Layer II, Dolby Digital e AAC	MPEG-2 TS
Advanced ISDB-T	BST-OFDM	HEVC	MPEG-H	MMT
DTMB-A	QAM, OFDM	HEVC	MPEG-1 Layer II, AAC, AC-3	B20600-2006

2.4 Projeto da TV 3.0 no Brasil

No Brasil, atualmente está ocorrendo uma transição tecnológica no que se refere à televisão terrestre. O país está atualizando o padrão de transmissão de TV do antigo sistema 2.5 para o mais avançado 3.0.

O desenvolvimento do projeto da TV 3.0 foi estrategicamente organizado, pelo Fórum do Sistema Brasileiro de Televisão Digital Terrestre (SBTVD) em três etapas distintas, cada uma com objetivos específicos. A primeira fase do projeto consistiu na convocação de propostas, um processo para selecionar as ideias mais inovadoras e viáveis tecnicamente. Em seguida, a segunda fase foi dedicada a uma série de testes e avaliações, visando assegurar a funcionalidade e eficácia das tecnologias propostas. Por fim, a terceira fase abrangeu testes complementares, aprofundando a pesquisa e o desenvolvimento. Esta etapa também incluiu a demonstração de padronização, essencial para garantir que as novas tecnologias possam ser consistentemente implementadas e integradas aos padrões existentes. Este planejamento visa otimizar os resultados do projeto TV 3.0, assegurando sua relevância e adaptabilidade no futuro da transmissão televisiva [12].

O Fórum [13], que é responsável pela administração do projeto, foi criado por meio do Decreto Presidencial no. 5.820/2006, é uma organização aberta, sem fins lucrativos. Possui atualmente mais de 80 membros de cinco setores:

- Fabricantes de televisores
- Fabricantes de transmissores
- Radiodifusão
- Software
- Universidades e centros de pesquisa e desenvolvimento

Possui a função de assessoria técnica para o governo brasileiro na implantação do serviço de TV digital no país, o que inclui, entre outras atividades:

- Elaboração das normas técnicas para transmissão, recepção, interatividade e acessibilidade do serviço de TV Digital Aberta
- Revisão constante das normas técnicas para TV Digital Aberta, acompanhando o avanço tecnológico dos setores envolvidos.

- Promoção do serviço de TV digital terrestre.
- Estudos para a melhoria do padrão atual de TV Digital Aberta e desenvolvimento de uma nova plataforma.

2.4.1 Fases do Projeto

Para otimizar a organização, o projeto foi dividido em três fases distintas, cada uma com objetivos e responsabilidades bem definidos.

Fase 1

A arquitetura proposta para a TV 3.0 inclui componentes principais como a camada física, que envolve modulação/desmodulação e correção de erros na transmissão de sinais; a camada de transporte, responsável pela multiplexação e transporte de vídeo, áudio, legendas e aplicativos, a codificação de vídeo e áudio, e a codificação de aplicativos, que inclui funções de interatividade e integração *broadcast*-banda larga, gerenciando a apresentação de todo o conteúdo audiovisual.

Os requisitos técnicos e funcionais são divididos em subcategorias. Os requisitos gerais incluem especificações técnicas, a necessidade de associação ao Fórum SBTVD para organizações com fins lucrativos e a adesão a termos justos e de licenciamento. A camada física *over-the-air* deve permitir a operação simultânea com sistemas ISDB-T existentes, garantir a eficiência espectral, suportar recepção interna e móvel, e incluir capacidade de sinalização de emergência. A camada de transporte deve garantir a sincronização precisa de áudio, vídeo e dados em múltiplas plataformas, suportar a entrega de conteúdo via internet com criptografia e ser extensível para novos formatos. A codificação de vídeo deve suportar *High Dynamic Range* (HDR) e UHD, e deve garantir eficiência de codificação, baixa latência e suportar serviços de vídeo imersivo. A codificação de áudio deve suportar áudio 3D, interatividade do usuário, eficiência de codificação e entrega de descrições de áudio para acessibilidade. As legendas devem permitir sincronização precisa com vídeo, controle de estilo de texto, suporte a imagens para informações não textuais e entrega de legendas de emergência. A codificação de aplicativos deve assegurar reutilização e interoperabilidade com o perfil de receptor Ginga FSD, suporte às novas tecnologias do projeto TV 3.0.

A tecnologia MIMO 2x2 e a agregação de canais são necessárias para compensar a capacidade limitada de canal em um canal *Rayleigh* com a relação sinal-ruído, *Carrier-to-Noise Ratio*, $C/N \leq 0$ dB, permitindo que receptores simples recebam um canal e receptores sofisticados recebam dois canais agregados para melhor resolução de vídeo

Fase 2

O objetivo principal desta fase é realizar testes de laboratório da camada física *over-the-air*, camada de transporte, camada de base de vídeo, aprimorando de vídeo, HDR, sistema de alerta de emergência, codificação de áudio, legendas e codificação de aplicativos. Como o intuito desta tese é explorar o MIMO 2x2, será melhor detalhado os testes de laboratório de camada física.

Os testes de laboratório foram realizados em uma gaiola de *Faraday* para evitar interferências externas e sob condições controladas conforme especificado pela ABNT NBR 15604. Antes dos testes, os dispositivos foram verificados para garantir que não houvesse interferência significativa com os canais de TV existentes. As tecnologias candidatas avaliadas foram *Advanced ISDB-T*, *ATSC 3.0*, *5G Broadcast* e *DTMB-A*. Cada tecnologia passou por uma série de testes específicos para avaliar sua adequação e desempenho. Os testes incluíram precisão de frequência de rádio *Radio Frequency* (RF), ruído de fase dos osciladores locais, potência do sinal que é a relação entre a frequência de rádio e a frequência intermediária RF/*Intermediate Frequency* (IF), emissões fora da banda que é a razão entre os componentes que estão em fase sobre os componentes em quadratura (I/Q) e análise para constelação e a relação de erro de modulação, conhecido como *Modulation Error Ratio* (MER) [14].

Para a tecnologia *Advanced ISDB-T*, os testes mostraram boa precisão de frequência RF e desempenho de ruído de fase. A medição da precisão da frequência RF garantiu que o sinal estivesse dentro das tolerâncias especificadas, e a avaliação do ruído de fase dos osciladores locais indicou estabilidade na frequência [14].

Para a tecnologia *ATSC 3.0*, os testes demonstraram conformidade com as máscaras de emissão especificadas, mas identificaram problemas com emissões espúrias. A verificação da conformidade com as máscaras de emissão foi realizada para evitar interferências em canais adjacentes, e as emissões fora da banda foram medidas para garantir que estavam dentro dos limites aceitáveis.

A tecnologia *5G Broadcast*, mas enfrentou problemas operacionais durante os testes, limitando sua avaliação completa [14].

A tecnologia *DTMB-A* apresentou limitações nas capacidades de modulação e codificação exigidas para a TV 3.0, com o equipamento não estando totalmente em conformidade com as especificações necessárias [14].

A implementação de MIMO 2x2 é necessária para compensar a capacidade limitada do canal em um canal de *Rayleigh*, melhorando a eficiência espectral e a robustez da transmissão. A agregação de canais facilita a codificação de vídeo escalável, permitindo que recetores simples lidem com a camada base, enquanto recetores sofisticados podem agregar canais para maior resolução. A sinalização de "wake-up" foi implementada para ativar recetores em *standby* durante emergências, garantindo

que possam receber alertas de emergência. A camada física foi projetada para suportar futuras extensões e novos esquemas de modulação, assegurando a longevidade e adaptabilidade da tecnologia TV 3.0 [14].

Os resultados dos testes forneceram informações cruciais para a seleção das tecnologias mais adequadas para a TV 3.0. As recomendações feitas pelo Fórum SBTVD serão utilizadas pelo Ministério das Comunicações do Brasil para tomar decisões informadas sobre os padrões de transmissão a serem adotados. Essas decisões visam garantir uma transição tecnológica eficiente e a melhoria contínua das capacidades de transmissão de televisão digital no Brasil. A análise apresentada neste trabalho ilustra a abrangência dos testes e a profundidade da avaliação necessária para selecionar as tecnologias para a próxima geração de televisão digital terrestre no Brasil [14].

Fase 3

A Fase 3 do Projeto TV 3.0 abrangeu uma série de testes laboratoriais e de campo, com o objetivo de avaliar e comparar tecnologias candidatas para a camada física de transmissão *over-the-air*. Esses testes foram conduzidos para identificar a tecnologia mais adequada para ser implementada no sistema de televisão digital terrestre de próxima geração no Brasil. Os testes de laboratório foram realizados pela Universidade Presbiteriana Mackenzie entre abril e setembro de 2023. Foram avaliadas as tecnologias *Advanced ISDB-T*, *ATSC 3.0* e *5G Broadcast*. Os testes de laboratório incluíram verificação de dispositivos e testes de desempenho. Na verificação de dispositivos, foram avaliados a precisão de RF, o ruído de fase dos osciladores locais, a potência do sinal RF/IF, as emissões fora da banda e a linearidade, bem como a análise de I/Q, constelação e MER. Esses testes garantiram que os dispositivos estavam operando dentro das especificações técnicas esperadas [15].

Os testes de desempenho focaram na avaliação do C/N em canais *Rayleigh* e *Additive White Gaussian Noise* (AWGN), interferência co-canal e adjacente com sistemas próprios e ISDB-T, interferência de ruído impulsivo, eco estático de multipercurso e capacidade de "*channel bonding*". O "*channel bonding*" combina informações em mais de um canal para aumentar a fiabilidade e a taxa de dados, sendo testado em várias configurações de camada única e dupla. Os resultados desses testes foram considerados pelo Fórum SBTVD para selecionar as tecnologias que seriam submetidas aos testes de campo [15].

Os testes de campo foram conduzidos pela Universidade Federal Fluminense, começando em dezembro de 2023 e programados para terminar em maio de 2024. Esses testes tiveram dois principais objetivos: comparar as tecnologias candidatas e medir a exigência de C/N recomendada para o planejamento de frequências pela Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL). As tecnologias *Advanced ISDB-T* e *ATSC 3.0* foram selecionadas para os testes de campo, pois demonstraram

melhor adequação aos requisitos específicos do Projeto TV 3.0 durante os testes de laboratório. As configurações testadas incluíram o uso de MIMO 2x2 com uma *Fast Fourier Transform* (FFT) de 16K e intervalo de guarda superior a 100 μ s. Essa configuração visa otimizar a eficiência espectral e a recepção tanto fixa quanto móvel. Os testes de campo buscaram determinar a capacidade mínima de 30 Mbps em um único , o que seria suficiente para transmitir um serviço de programa em 8K HDR, dois serviços de programa em 4K HDR, ou três serviços de programa em 1080p HDR, com qualidade audiovisual superior ao sistema de transmissão digital brasileiro de primeira geração [15].

Além dos testes de laboratório e de campo, foi realizada uma avaliação subjetiva da qualidade do vídeo codificado em tempo real. Essa avaliação comparou a qualidade máxima alcançável com o sistema sistema de transmissão digital brasileiro de primeira geração (usando H.264 *High profile*) com a qualidade das tecnologias selecionadas para o TV 3.0 em diferentes configurações e taxas de bits. Os resultados dessa avaliação foram considerados para determinar a taxa de bits mínima da configuração da camada física *over-the-air* a ser testada em campo [15].

Os testes e avaliações da Fase 3 forneceram informações cruciais para a seleção da tecnologia de camada física a ser adotada no Projeto TV 3.0. Em junho de 2024, com base nos resultados desses testes e em todas as outras informações coletadas desde a Fase 1 do projeto em 2020, o Fórum SBTVD recomendará ao governo brasileiro a tecnologia mais adequada para a TV 3.0. A decisão final será anunciada posteriormente pelo governo brasileiro, com o objetivo de garantir uma transição tecnológica eficiente e a melhoria contínua das capacidades de transmissão de televisão digital no Brasil. Este trabalho destaca a importância dos testes de laboratório e de campo na avaliação de tecnologias candidatas, e a necessidade de garantir que a próxima geração de televisão digital terrestre no Brasil atenda aos mais altos padrões de qualidade audiovisual e eficiência espectral.

2.4.2 Pesquisas Relacionadas com o Projeto da TV 3.0

À medida que o projeto TV 3.0 avançava pelas suas fases, foram realizadas pesquisas paralelas sobre as tecnologias candidatas, aprofundando a nossa compreensão acerca das suas capacidades e limitações. Estas pesquisas, enquadradas no contexto da TV 3.0, fornecem um valioso referencial para interpretar e validar os resultados das simulações realizadas neste trabalho, permitindo-nos antecipar o desempenho esperado das tecnologias em cenários reais e fundamentar as decisões futuras sobre a implementação da nova geração de televisão digital no Brasil.

Um dos objetivos do projeto da TV 3.0 é realizar testes para as camadas físicas, o trabalho realizado por Omi [2], realizou a análise de desempenho dos protocolos, considerando novas exigências como reuso de frequência, agregação de canais, uso de antenas MIMO, relações sinal-ruído negativas em canais de *Rayleigh* e recepção via

antenas internas. Esses requisitos foram estabelecidos devido à escassez de espectro eletromagnético e à possibilidade de integração de antenas internas nos dispositivos de recepção, facilitando a implantação rápida da TV 3.0. As configurações incluem modulações de baixa ordem combinadas com códigos de canal. Foram avaliadas quatro tecnologias candidatas para a camada física da TV 3.0 em ambiente de transmissão terrestre, (*Advanced ISDBT*, ATSC 3.0, DTMB-A e 5G *Broadcast* 3GPP Rel. 14). A Tabela 2.3 indica com detalhes as tecnologias que foram analisadas.

Tabela 2.3: Parâmetros de modulação da camada física que foram avaliadas

Padrão	Advanced ISDB-T	ATSC 3.0	DTMB-A	Broadcast 5G
Largura de Banda	6 MHz	6 MHz	6 MHz	6 MHz
Modulação	QPSK	QPSK	QPSK	QPSK
Constelação	UC	UC	UC	UC
Correção de Erro	LDPC (3/16) 69120 + BCH	LDPC (2/15) 64800 + BCH	LDPC (1/3) 61440 BCH opcional	Turbo Coding com taxa de código 0.672 no receptor
Tamanho do iFFT	16K	16K	4K	512, separação de subportadora de 1.25 kHz
Razão GI	800/16384 (126.56 μ s)	4_768 (11 μ s)	PN256	Prefixo Cíclico Estendido (200 μ s)
Padrão de Piloto	Dx = 6 e Dy=2	SP8_2	PNMC sequência inserida como GI e piloto	Modulação e Esquema de Codificação (MCS) 9
Entrelaçador de Tempo	I=3	98	480 quadros de sinal	Não disponível
Camada	Camada A 35 segmentos	Camada Principal	-	-
Carga Útil	SISO 1.8 Mbps MIMO 3.6 Mbps	Não disponível	SISO 1.68 Mbps MIMO 3.6 Mbps	SISO 3.886 Mbps
Quase Livre de Erros (QEF)	Taxa de Erro de Pacote (PER) de 104 antes do BCH	Limite de Visibilidade (ToV)	Taxa de Erro de Bit (BER) de 3×10^6	Limite de Visibilidade (ToV)

Os testes revelaram que nenhuma das tecnologias avaliadas atende completamente aos requisitos da camada física da TV 3.0. Isso indica a necessidade de ajustes ou desenvolvimentos adicionais nas tecnologias propostas para que possam atender integralmente às especificações e desafios propostos pelo novo padrão de TV digital no Brasil.

Uma das soluções é a utilização de antenas MIMO. Gonsioroski et al [16], analisa a performance do sistema de TV digital de próxima geração, a tecnologia é o *Advanced ISDB-T* em testes de campo realizados no Brasil. O estudo conduziu medições em 20 locais externos para avaliar variáveis como potência do sinal recebido, relação portadora-ruído (C/N), e a qualidade de recepção usando MIMO 2x2 através de um canal Rayleigh. Os resultados mostram que o sistema *Advanced ISDB-T* demodulou eficientemente os sinais MIMO recebidos, mesmo sob condições menos favoráveis, onde o limiar de C/N era inferior a zero, demonstrando uma condição numérica adequada para a transmissão MIMO em quase todos os locais de medição. Esses achados sugerem que o *Advanced ISDB-T* pode ser uma implementação viável para atender às demandas futuras de transmissão de TV digital no Brasil, proporcionando

um melhor desempenho em termos de qualidade de áudio e vídeo, acessibilidade e interatividade em dispositivos fixos e móveis.

No contexto de testes sobre o *Advanced* ISDB-T, Santos et al [17] apresenta os resultados preliminares de testes de campo para avaliação da cobertura interna do sistema *Advanced* ISDB-T em ambientes internos no Brasil. A Tabela 2.4 mostra os parâmetros utilizados para a elaboração dos testes.

Tabela 2.4: Parâmetros do sistema *Advanced* ISDB-T

Parâmetro	Valor
Largura de banda	6 MHz
Largura de banda ocupada	5.83 MHz (modo normal)
Sistema de transmissão	MIMO 2x2
Esquema de multiplexação	TLV (IP)
Modulação	QPSK
Constelação	Constelação Uniforme
Correção de erro	LDPC (3/16) + BCH (comprimento de código 69120)
Tamanho do FFT	16K (16384)
Razão GI	800/16384 (126.56 μ s)
Padrão SP	$D_x = 6$ e $D_y = 2$
Entrelaçamento de tempo	$I = 3$
Camada	Camada A, 35 segmentos
Programa	2K (1080p), 1.8 Mbps SISO e 3.6 Mbps MIMO
QEF	PER de 10^{-4} antes do BCH

Os testes focaram em medir a potência do canal recebido e os limiares de recepção sem erro em quatro locais diferentes, usando cinco diferentes antenas MIMO com polarização horizontal e vertical, duplamente polarizadas para avaliar a performance do sistema com antenas de diferentes fabricantes. Os resultados indicam que o sistema *Advanced* ISDB-T demonstra robustez considerável contra perdas de penetração interna e quando submetido ao uso de diferentes antenas. O artigo resalta a importância de um sistema de televisão robusto que ofereça qualidade de experiência com antenas integradas às televisões, proporcionando uma experiência mais prática ao usuário. O trabalho conclui que o sistema testado é capaz de entregar conteúdo transmitido sem erros em todos os ambientes internos e com todas as antenas testadas, destacando sua viabilidade para implementação em cenários diversos dentro do padrão de transmissão brasileiro.

Sobre a elaboração da antena, Carneiro et al[18] descreve o desenvolvimento e teste de uma antena em array de banda larga UHF para aplicações em transmissão de TV Digital Terrestre dentro do projeto TV 3.0, cobrindo a banda de 470-700 MHz. O design apresenta dois elementos planares otimizados para baixo acoplamento mútuo, adequados para uso como interface de múltiplas entradas e saídas (MIMO). O objetivo do design foi facilitar a fabricação, garantir uma ampla largura de banda e reduzir custos. Foram realizados testes e simulações para confirmar a baixa correlação entre os elementos da antena e a operação adequada em toda a

banda especificada. Os resultados mostraram que a configuração ortogonal dos elementos produziu um maior isolamento e menores taxas de erro de bit no receptor, com um coeficiente de correlação de envelope abaixo de 0.1, indicativo de boas condições de diversidade para operações de MIMO. O artigo também inclui discussões sobre as técnicas utilizadas para minimizar o acoplamento e melhorar a performance da antena, incluindo o uso de linhas onduladas e elementos em forma de F gravados no plano de terra para antenas de banda ultra larga. As antenas foram testadas em diferentes orientações para avaliar o impacto na eficiência e no acoplamento. A antena desenvolvida mostrou-se adequada para aplicações de TV digital de próxima geração, com bons resultados em termos de largura de banda operacional, isolamento e custo.

No contexto do desenvolvimento do projeto da TV 3.0, verifica-se uma lacuna na pesquisa e aplicação de simuladores para sistemas de transmissão. Este trabalho visa preencher essa lacuna, propondo o estudo e desenvolvimento de uma plataforma abrangente para simulação de sistemas de transmissão, especificamente direcionada para as necessidades e desafios da TV digital.

Para as simulações será utilizada a biblioteca Sionna, criada pela Nvidia, que permite modelar e simular os componentes da camada física de um sistema de transmissão, como modulação, codificação de canal e equalização. E permitirá a avaliação e otimização de diferentes tecnologias e configurações de transmissão, contribuindo para o aprimoramento da qualidade e eficiência da TV 3.0.

Capítulo 3

Tecnologias e Conceitos Para o Auxílio de Simulações

Este capítulo apresenta uma revisão detalhada das principais técnicas de modulação digital e sistemas de transmissão utilizadas em comunicações modernas. As seções seguintes exploram as características, vantagens e desvantagens de cada técnica de modulação, QAM, e OFDM, bem como uma análise profunda dos sistemas baseados em diferentes configurações de antenas, incluindo *Single-Input Single-Output* (SISO), *Single-Input Multiple-Output* (SIMO), *Multiple-Input Single-Output* (MISO), e MIMO e também é explorado o modelo Kronecker e os canais *Flat Fading* e *Clustered Delay Line* (CDL). Cada sistema e técnica são discutidos com o objetivo de elucidar seu papel essencial na evolução das telecomunicações, abrangendo aplicações desde comunicações móveis até redes sem fio de alta velocidade. Este capítulo não só fornece a base teórica necessária para compreender as tecnologias emergentes, mas também destaca a relevância dessas tecnologias no panorama atual das comunicações digitais.

Além disso, a implementação e verificação dessas tecnologias são significativamente potencializadas pelo uso de tecnologias de simulação avançadas. Estas ferramentas são essenciais para que engenheiros e desenvolvedores avaliem meticulosamente todos os aspectos dos sistemas de telecomunicações, desde a compressão até a qualidade da recepção, sem a necessidade de implementações físicas complexas e dispendiosas. Ao simular ambientes que replicam condições reais e até cenários

extremamente adversos, é possível antecipar problemas potenciais e otimizar os sistemas para garantir performance ideal antes de sua implementação efetiva.

A eficácia destas tecnologias de simulação decorre do uso extensivo de modelos computacionais avançados e técnicas de inteligência artificial. Com a integração de tecnologias emergentes como computação em nuvem, os processos de teste e validação tornam-se mais ágeis, acessíveis e escaláveis. Isso permite que os avanços no campo das telecomunicações ocorram mais rapidamente e com menor risco. Além disso, a convergência de ferramentas de simulação com inteligência artificial, incluindo *Machine Learning* e *Deep Learning*, transforma a maneira como redes de telecomunicações são projetadas e testadas. Essas tecnologias proporcionam aos sistemas a capacidade de aprender e adaptar-se com base nos dados coletados durante as simulações, resultando em soluções mais robustas e eficientes para enfrentar os desafios da transmissão em tempo real.

3.1 Modulações Digitais

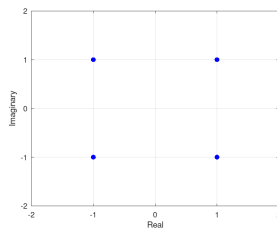
As técnicas de modulação digital formam a espinha dorsal dos sistemas de comunicação modernos, permitindo a transmissão eficiente de dados digitais através de canais de comunicação analógicos. Esta seção aborda as principais formas de modulação digital utilizadas atualmente, descrevendo como cada técnica modifica uma característica da onda portadora—seja amplitude, frequência ou fase—para representar a informação digital. A compreensão dessas técnicas é crucial para o projeto e análise de qualquer sistema de comunicação avançado, bem como para a implementação de soluções eficazes em ambientes com diferentes desafios de propagação e interferência.

3.1.1 QAM

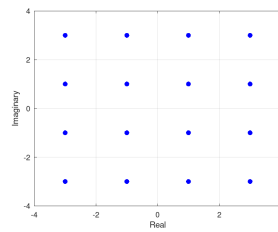
A Modulação QAM é uma técnica de modulação que combina duas modulações de amplitude em quadratura, permitindo a transmissão de dois sinais simultaneamente sobre a mesma faixa de frequência. Esta técnica é amplamente utilizada em sistemas de comunicação digital para aumentar a eficiência espectral, transmitindo mais dados por unidade de largura de banda.

O QAM utiliza dois portadores desfasados em 90 graus, um para o componente em fase (I, de in-phase) e outro para o componente em quadratura (Q, de quadrature). Cada um desses componentes pode ser modulado em amplitude, permitindo a representação de símbolos complexos no plano IQ [19].

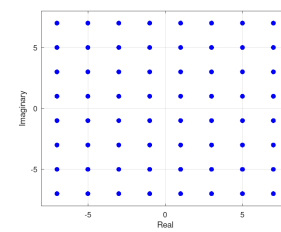
A visualização do funcionamento da modulação QAM pode ser observado nas Figuras 3.1a, 3.1b e 3.1c.



(a) Diagrama de Constelação 4QAM



(b) Diagrama de Constelação 16QAM



(c) Diagrama de Constelação 64QAM

O sinal QAM pode ser representado como:

$$s(t) = I(t) \cos(2\pi f(t)t) - Q(t) \sin(2\pi f(t)t), \quad (3.1)$$

No contexto de modulação, $I(t)$ e $Q(t)$ representam os sinais modulados em amplitude para os componentes em fase e em quadratura, respectivamente, enquanto $f(t)$ indica a frequência da onda portadora e t denota o tempo.

Esta representação permite a transmissão de uma quantidade significativamente maior de informação em comparação com modulações que utilizam apenas um componente.

Entre as vantagens, destacam-se a alta eficiência espectral, possibilitando o uso mais eficiente do espectro disponível, e a adaptabilidade a várias taxas de transmissão e condições de canal, através da alteração do esquema de modulação, como por exemplo, passando de 16-QAM para 64-QAM.

No entanto, as desvantagens incluem a maior suscetibilidade a ruído e interferências, especialmente em formatos de maior ordem, como 64-QAM ou 256-QAM, e a necessidade de sistemas de transmissão e recepção mais complexos, incluindo equalização adaptativa para compensar distorções do canal.

O QAM é utilizado em muitos sistemas de comunicação modernos, incluindo televisão digital, modems de cabo, e tecnologias de telefonia móvel, como LTE e 5G. A escolha do esquema QAM específico é geralmente um compromisso entre a eficiência espectral desejada e a robustez ao ruído e outras distorções do canal.

3.1.2 OFDM

A Modulação OFDM é uma técnica de modulação digital que é amplamente utilizada em comunicações sem fio de banda larga, incluindo Wi-Fi, LTE, e 5G. OFDM facilita a transmissão eficiente de dados em canais de comunicação propensos a reflexões e interferências, através da divisão do fluxo de dados em vários sub canais em diferentes frequências ortogonais [20].

O OFDM trabalha subdividindo a largura de banda disponível em múltiplos sub canais mais estreitos, cada um portando uma parte do fluxo de dados. Isso é alcançado usando uma série de portadoras ortogonais, de maneira que se permite

que os sub canais se sobreponham em frequência sem interferência intercanal, maximizando assim a eficiência espectral [19]. A visualização do funcionamento da modulação PSK pode ser observado na Figura 3.2.

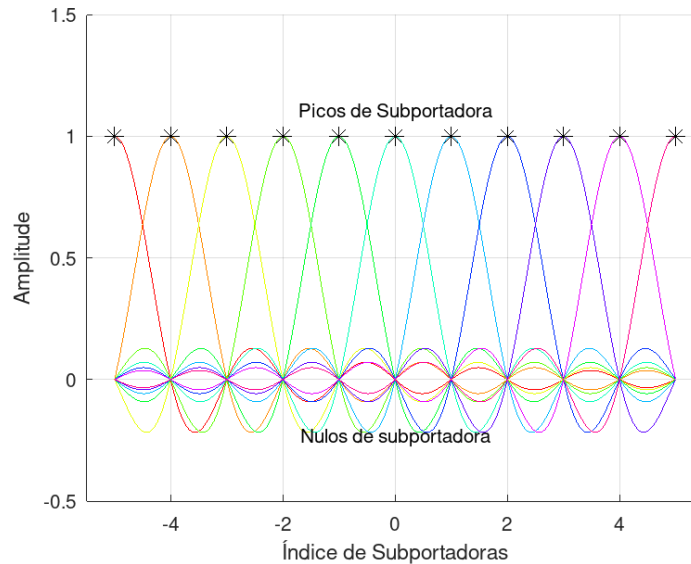


Figura 3.2: Modulação OFDM

O sinal OFDM pode ser descrito matematicamente pela soma de sinais modulados em frequência, cada um correspondendo a um subcanal:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k e^{j2\pi f_k t}, \quad (3.2)$$

onde X_k representa o símbolo modulado no k -ésimo subcanal, f_k é a frequência central do k -ésimo subcanal, e N é o número total de subcanais.

Podemos citar como vantagens a alta eficiência espectral devido à sobreposição dos subcanais, a boa resistência a reflexões e desvanecimentos, tornando-a ideal para ambientes urbanos densos, e a facilidade de equalização devido à transformada de Fourier, simplificando a correção de distorções do canal.

Por outro lado, as desvantagens incluem a sensibilidade a desvios de sincronização de frequência e tempo, exigindo algoritmos precisos de sincronização, e a maior complexidade computacional em comparação com técnicas de modulação mais simples.

O OFDM é a base para muitos padrões de comunicação sem fio modernos, incluindo IEEE 802.11 (Wi-Fi), LTE e 5G. Sua capacidade de lidar eficientemente com altas taxas de dados em ambientes propensos a interferências faz da OFDM uma escolha predominante para comunicações de banda larga.

3.2 Sistemas de Comunicação com Múltiplas Antenas

No campo dos sistemas de tecnologia de comunicação sem fios, uma variedade de configurações de antenas são implementadas com o objetivo de aprimorar a eficiência das operações de transmissão e recepção de sinais. As configurações que são mais comumente utilizadas incluem SISO, SIMO, MISO, e MIMO.

Esta secção da tese vai explorar em detalhe cada uma dessas configurações, elucidando os princípios operacionais por trás de cada uma e delineando os contextos específicos nos quais elas são mais eficazes. Uma ênfase particular será colocada na configuração MIMO, visto que ela constitui o cerne dos estudos apresentados nesta tese académica.

3.2.1 SISO

A configuração SISO representa o formato mais simples de sistema de comunicação sem fios, envolvendo uma única antena no transmissor e uma única antena no receptor. Este tipo de sistema é amplamente utilizado em aplicações como rádio FM e comunicações básicas de longa distância, onde a simplicidade e a economia são prioritárias. Apesar de sua simplicidade, os sistemas SISO enfrentam limitações significativas em termos de capacidade de transmissão em ambientes com altos níveis de interferência ou múltiplos caminhos de propagação.

A figura 3.3 abaixo ilustra um típico sistema SISO, mostrando o sinal sendo transmitido de uma antena e recebido por outra. A clareza e simplicidade deste sistema são evidentes, mas também são evidentes suas limitações em termos de diversidade e capacidade de lidar com interferências e desvanecimentos.

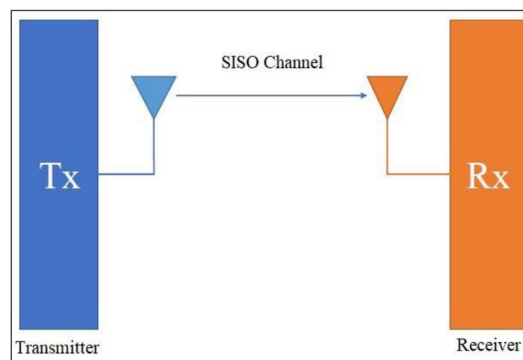


Figura 3.3: Representação de um sistema SISO, com uma única antena transmissora e uma única antena recetora [21].

A capacidade do canal em um sistema SISO pode ser descrita pela seguinte equação:

$$C_{\text{SISO}} = \log_2(1 + \rho|h|^2) \text{ bps/Hz} \quad (3.3)$$

onde ρ é a relação sinal-ruído (SNR) no receptor e $|h|^2$ representa o ganho normalizado do canal. Esta fórmula evidencia que a capacidade do canal é diretamente proporcional ao ganho do canal e ao SNR. Embora os sistemas SISO sejam menos capazes de mitigar problemas como desvanecimento e interferência em comparação com configurações mais complexas, eles permanecem uma escolha vital para muitas aplicações devido à sua simplicidade e custo reduzido.

3.2.2 SIMO

A configuração SIMO emprega uma única antena no transmissor e múltiplas antenas no receptor.

Esta abordagem é fundamental para melhorar a qualidade do sinal recebido através da diversidade de recepção, que permite ao sistema selecionar o sinal de melhor qualidade entre os vários recebidos.

Tal configuração é particularmente valiosa em ambientes urbanos densos, onde os sinais são frequentemente refletidos por edifícios e outras estruturas, criando múltiplos caminhos que o sinal pode percorrer até chegar ao recetor.

A figura 3.4 ilustra um sistema SIMO com múltiplas antenas recetoras, destacando como o sinal enviado por uma única antena transmissora é captado por várias antenas recetoras, cada uma potencialmente recebendo o sinal com diferentes níveis de qualidade devido às variações no ambiente de propagação.

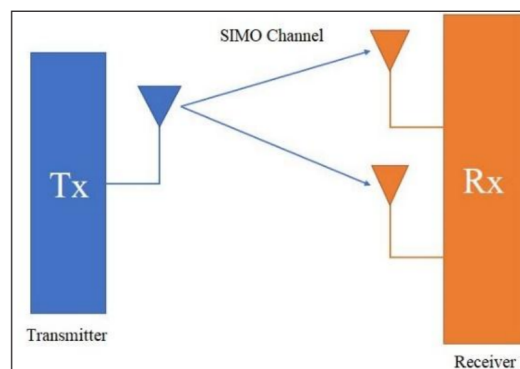


Figura 3.4: Ilustração de um sistema SIMO, mostrando uma única antena transmissora e múltiplas antenas recetoras[21].

A capacidade do canal em um sistema SIMO pode ser matematicamente expressa pela equação:

$$C_{\text{SIMO}} = \log_2(1 + \rho \sum_{m=1}^{N_R} |h_m|^2) \text{ bps/Hz} \quad (3.4)$$

onde ρ representa a relação sinal-ruído (SNR) no recetor, N_R é o número de antenas no recetor, e $|h_m|^2$ indica o ganho de cada antena recetora.

Esta fórmula demonstra que a capacidade do canal aumenta com a soma dos ganhos das antenas recetoras, refletindo a melhoria na qualidade do sinal devido à diversidade de receção.

A diversidade proporcionada pelo uso de múltiplas antenas ajuda a combater o desvanecimento do sinal e aumenta a robustez da receção, facilitando uma comunicação mais confiável mesmo em condições adversas, a escolha da antena de receção consiste em escolher a antena que recebe o sinal com a maior relação sinal-ruído (SNR) ou a melhor qualidade de sinal.

3.2.3 MISO

A configuração MISO envolve múltiplas antenas no transmissor e uma única antena no recetor. Este arranjo é projetado para aumentar a fiabilidade e a qualidade da transmissão sem necessidade de uma largura de banda maior.

Utilizando técnicas de transmissão, sinais idênticos são enviados simultaneamente através de várias antenas. Essa estratégia visa aprimorar a fiabilidade do sinal recebido, dado que diferentes trajetórias podem sofrer variadas condições de desvanecimento. Assim, se um dos sinais enfrentar condições adversas de propagação, outro pode ser recebido sob circunstâncias mais favoráveis, aumentando a probabilidade de uma receção bem-sucedida. A utilização de múltiplas antenas para transmitir cópias do mesmo sinal fortalece a robustez do sinal contra desvanecimentos e interferências. Adicionalmente, outra técnica que pode ser empregada é o uso de múltiplas antenas para direcionar a transmissão de energia especificamente para a localização do recetor. Essa abordagem melhora a eficiência do sinal ao concentrar a energia na direção do recetor, otimizando a qualidade do sinal recebido sem necessidade de aumentar a potência de transmissão total.

Sistemas MISO são particularmente vantajosos em cenários onde a consistência e a integridade do sinal são cruciais, como em comunicações críticas e aplicações de segurança.

A figura 3.5 mostra como um sistema MISO pode ser configurado, destacando o uso de múltiplas antenas transmissoras que enviam o mesmo sinal para uma única antena recetora. Esta configuração permite que o recetor receba o sinal de várias trajetórias, aumentando as chances de uma receção de qualidade mesmo em condições adversas de propagação.

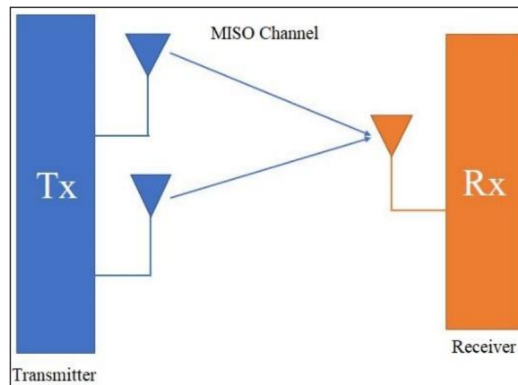


Figura 3.5: Sistema MISO com múltiplas antenas transmissoras e uma única antena recetora [21].

A capacidade do canal MISO pode ser matematicamente expressa pela fórmula:

$$C_{\text{MISO}} = \log_2 \left(1 + \frac{\rho}{N_T} \sum_{n=1}^{N_T} |h_n|^2 \right) \text{ bps/Hz} \quad (3.5)$$

onde ρ representa a relação sinal-ruído (SNR) no receptor, N_T é o número de antenas transmissoras, e $|h_n|^2$ indica o ganho de cada uma das antenas transmissoras. Essa equação mostra que a capacidade do canal beneficia-se diretamente da diversidade de transmissão proporcionada pelas múltiplas antenas, o que é essencial para manter a qualidade da transmissão em ambientes com alta probabilidade de interferência e desvanecimento do sinal [21].

3.2.4 MIMO

A configuração MIMO envolve múltiplas antenas no transmissor e no recetor. Essa tecnologia permite uma melhoria na taxa de transmissão de dados e eficiência espectral, e consegue proporcionar uma robustez maior contra interferências e desvanecimento de sinal, a visualização do sistema MIMO está representada na Figura 3.6.

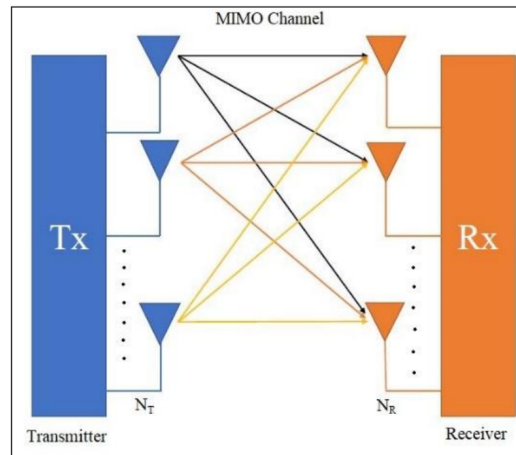


Figura 3.6: Sistema MIMO com múltiplas antenas transmissoras e receptoras [21].

A capacidade do canal MIMO pode ser matematicamente expressa pela fórmula:

$$C_{\text{MIMO}} = \log_2 \left(\det \left(I + \frac{\rho}{N_T} H H^\dagger \right) \right) \quad (3.6)$$

Nesta fórmula, H representa a matriz do canal MIMO, que contém os ganhos do canal entre as antenas transmissoras e receptoras. $H H^\dagger$, a matriz conjugada transposta de H , é usada para descrever as interações entre os diferentes caminhos de transmissão e recepção. I é a matriz identidade, cuja dimensão corresponde ao número de antenas receptoras N_R . ρ é a relação sinal-ruído média por antena no recetor, e N_T é o número de antenas transmissoras.

A expressão $\det(I + \frac{\rho}{N_T} H H^\dagger)$ calcula o determinante da matriz formada pela adição da matriz identidade e do produto escalado da matriz do canal, refletindo a capacidade volumétrica do espaço de sinal ocupado pelos dados transmitidos, levando em consideração as características do canal e do ruído [21].

Esta abordagem permite que os sistemas MIMO explorem as múltiplas vias de transmissão e recepção para ampliar a capacidade do canal, utilizando eficientemente a diversidade espacial das múltiplas antenas para permitir a transmissão simultânea de mais dados sem a necessidade de aumentar a potência transmitida ou a largura de banda.

A melhoria na taxa de transmissão de dados e na eficiência espectral ocorre através de um processo conhecido como multiplexação espacial, que permite que vários fluxos de dados independentes sejam enviados simultaneamente pelo mesmo canal de frequência, mas utilizando percursos espaciais distintos.

Ao receber o sinal através de múltiplas antenas, o recetor pode combinar as várias versões do sinal que chegaram por diferentes caminhos, o que melhora a relação sinal-ruído e torna a comunicação mais robusta.

As interferências, sejam elas provenientes de sinais de outras fontes ou de reflexões indesejadas, o MIMO tem a habilidade de distingui-las do sinal desejado. Isso é possível através de técnicas de processamento de sinal, como a formação de feixe e a codificação espacial, que focam a transmissão de energia na direção do recetor pretendido e podem criar padrões de antena que minimizam a interferência [22].

A capacidade de um canal MIMO aumenta linearmente com o mínimo entre o número de antenas no transmissor e no recetor, assumindo um ambiente de propagação rico em multi-percursos. Isso significa que, teoricamente, a capacidade do sistema pode ser duplicada cada vez que o número de antenas é dobrado, sem necessidade de aumentar a potência transmitida ou a largura de banda [22] [23].

3.2.5 Configurações de sistemas MIMO

No universo dos sistemas MIMO, encontramos configurações distintas, cada uma com suas particularidades e aplicações específicas. Sendo o *Spatial Multiplexing*, que visa aumentar a taxa de transmissão de dados através da utilização de múltiplos fluxos de dados simultâneos; o *Diversity*, que busca melhorar a fiabilidade da comunicação ao explorar a diversidade espacial dos sinais transmitidos e recebidos; e o *Beamforming*, que concentra a energia do sinal em direções específicas, otimizando a qualidade da comunicação e reduzindo a interferência em outras direções.

Spatial Multiplexing

Esta técnica permite que o mesmo canal de frequência seja usado para transmitir múltiplos fluxos de dados simultaneamente, aumentando a taxa de transmissão sem necessidade de largura de banda adicional ou maior potência de transmissão

Num sistema MIMO com multiplexação espacial, o transmissor divide um fluxo de dados de alta taxa em vários fluxos de dados de menor taxa. Cada um destes fluxos é transmitido simultaneamente a partir de uma antena diferente na matriz de antenas do transmissor [24].

Os múltiplos fluxos de dados são transmitidos no mesmo canal de frequência, mas como eles são enviados de antenas separadas de maneira espacial, eles percorrem caminhos distintos até chegar ao recetor. Devido às características únicas de cada caminho de propagação, os sinais chegam no recetor com diferentes perfis de atraso e atenuação [24] [25].

No lado do recetor, uma matriz de antenas recebe os sinais misturados. Como os sinais refletidos têm propriedades distintas, o recetor utiliza algoritmos de processamento de sinal para separar os fluxos de dados individuais. Esses algoritmos se baseiam em técnicas como a decomposição em *Singular Value Decomposition* (SVD) ou *Space-Division Multiple Access* (SDMA) para organizar e recuperar os fluxos de dados originais.

O SVD é uma técnica matemática aplicada nos sistemas de comunicação MIMO para otimizar a transmissão de sinais. No processo está incluso a matriz do canal, que carrega as informações sobre como os sinais de múltiplas antenas transmissoras são recebidos pelas antenas recetoras, cada um afetado pelo caminho único que percorre no ambiente. Usando SVD, a matriz do canal é decomposta em três componentes: uma matriz de vetores ortogonais representando as antenas recetoras, uma matriz diagonal contendo valores singulares que indicam a força de cada caminho de transmissão, e outra matriz de vetores ortogonais relacionada às antenas transmissoras. Esses valores singulares são essenciais, pois nos mostram os caminhos de transmissão mais fortes pelos quais podemos enviar informações de maneira eficaz. Na prática, isso transforma um complexo sistema MIMO em múltiplos canais SISO simples e independentes. Ao ajustar as transmissões conforme os vetores obtidos pela SVD, os sinais são enviados pelo canal de comunicação de tal forma que maximizam a capacidade do sistema e minimizam a interferência. Os canais mais fortes podem ser utilizados para enviar mais dados, enquanto os mais fracos são evitados ou usados menos, resultando em uma transmissão mais eficiente e confiável [26] [27].

O SDMA é uma técnica aplicada em comunicações sem fio que permite a comunicação simultânea com múltiplos usuários ocupando o mesmo espectro de frequência. Utilizando antenas múltiplas, o SDMA realiza a formação de feixes adaptativa, conhecida como *beamforming*. Neste processo, os sinais são intencionalmente dirigidos em feixes estreitos diretamente para os usuários individuais, muito parecido com o ajuste do feixe de uma lanterna [28]. A habilidade de direcionar sinais a usuários específicos permite que o SDMA diferencie entre eles, mesmo quando compartilham a mesma frequência. Isso minimiza a interferência, uma vez que os sinais são separados no espaço. Os recursos do sistema, como potência e largura de banda, são alocados dinamicamente, baseando-se na localização dos usuários e nas condições momentâneas do canal. Maximizando a eficiência espectral, garantindo que os usuários recebam a quantidade de recursos necessários para uma comunicação confiável. A técnica pode ajustar os padrões de feixes para acomodar as mudanças na localização e na mobilidade dos usuários, mantendo assim uma conexão estável e de alta qualidade [29].

Diversity

Esta é uma técnica utilizada nos sistemas de comunicação sem fios que se concentra em melhorar a fiabilidade e a qualidade do sinal em vez de aumentar a taxa de transmissão de dados. Ela aproveita-se de múltiplas antenas para transmitir com diversidade cópias redundantes de um sinal ou para receber com diversidade várias versões de um sinal transmitido, o que ajuda a combater as imperfeições do canal de comunicação, como o desvanecimento e os múltiplos percursos [30].

A transmissão com diversidade é utilizada em sistemas de comunicação sem fio para melhorar a fiabilidade do sinal transmitido, especialmente em ambientes onde o desvanecimento do sinal é uma preocupação significativa. Nessa abordagem, múltiplas cópias do mesmo sinal são enviadas usando diferentes métodos para garantir que pelo menos uma versão do sinal chegue ao recetor com boa qualidade. Na diversidade de tempo, a mesma informação é transmitida em momentos distintos. Isso é particularmente útil contra o desvanecimento rápido, uma vez que as variações nas condições do canal podem afetar as cópias do sinal em momentos diferentes de maneiras diferentes. Por sua vez, a diversidade de frequência envolve a transmissão do mesmo sinal em diferentes frequências. Como o desvanecimento não afeta todas as frequências igualmente, essa estratégia aumenta a probabilidade de que ao menos uma das frequências transmita o sinal claramente. A diversidade de espaço faz uso de várias antenas fisicamente separadas para transmitir o mesmo sinal. Essa separação espacial significa que cada antena experimenta um conjunto único de condições de propagação, tornando menos provável que todas as antenas sejam afetadas adversamente ao mesmo tempo por desvanecimento ou interferências. Essa estratégia é particularmente eficaz em ambientes urbanos densos ou em interiores onde as reflexões e obstruções são comuns [31].

A recepção com diversidade é uma técnica nos sistemas de comunicação sem fios que utiliza múltiplas antenas para captar sinais transmitidos. Ao empregar esta abordagem, diferentes antenas recebem o sinal em locais distintos, o que significa que cada uma pode experimentar condições de sinal variáveis devido a fatores como desvanecimento, interferência ou obstruções físicas. Estas variações nas recepções são benéficas porque permitem que o sistema escolha ou combine as versões recebidas do sinal de maneiras que maximizem a qualidade geral da recepção. Entre as estratégias utilizadas, a seleção de antena é comum, onde o recetor opta pelo sinal de melhor qualidade entre as antenas disponíveis, geralmente baseando-se na intensidade do sinal ou na relação sinal-ruído. Outra abordagem é a combinação por seleção, que escolhe o melhor sinal para cada bit ou símbolo transmitido, e não apenas para toda a mensagem. Já a combinação de razão máxima aproveita todos os sinais recebidos, ponderando-os de acordo com a sua qualidade antes de somá-los, o que potencia a intensidade do sinal resultante. Alternativamente, a combinação por diversidade de ganho igual trata todos os sinais com igual importância, mantendo a fase dos sinais e reforçando a potência do sinal composto sem ponderar pela qualidade individual de cada sinal recebido. Cada uma destas técnicas de combinação e seleção ajuda a mitigar os efeitos negativos de um ambiente de transmissão desafiador, garantindo que o sistema de comunicação mantenha uma transmissão de dados robusta e fiável, reduzindo significativamente a taxa de erro de bits e melhorando a eficácia das comunicações sem fios [32].

Beamforming

É uma técnica que opera através da adaptação dos sinais transmitidos por cada antena na matriz, ajustando a fase e a amplitude de forma precisa. Este ajuste permite que os sinais de diferentes antenas se sobreponham no espaço de maneira construtiva em certas direções e destrutiva em outras, criando assim um "feixe" de energia direcionado para um utilizador específico ou para vários utilizadores em locais distintos [33].

O ajuste dos sinais é governado por algoritmos de processamento de sinal que calculam as modificações necessárias para maximizar a eficiência da transmissão. Esses algoritmos são complexos e variam dependendo dos objetivos específicos do sistema e do ambiente operacional. Os algoritmos que podem ser utilizados estão listados abaixo:

- **Algoritmo de Máxima Razão de Combinação (MRC):** Embora mais frequentemente mencionado como uma técnica de recepção, o princípio do MRC pode ser adaptado para o Beamforming de transmissão. Ele maximiza a relação sinal-ruído ao ajustar as fases e as amplitudes dos sinais transmitidos de modo que se somem de forma construtiva no recetor. Os coeficientes de ponderação para cada antena são ajustados proporcionalmente ao conjugado complexo do canal correspondente, maximizando assim a potência do sinal recebido [34].
- **Algoritmo de *Zero Forcing* (ZF):** Este algoritmo foca em eliminar a interferência entre múltiplos utilizadores ou fluxos de dados, forçando a interferência a zero. No contexto do Beamforming, o Zero Forcing ajusta os sinais de tal forma que a matriz de sinal resultante no recetor tenha elementos fora da diagonal próximos a zero, minimizando a interferência entre os canais [35].
- **Algoritmo de Formação de Feixe Baseado em Eigen-beamforming:** Este algoritmo utiliza a decomposição em SVD da matriz do canal para identificar os melhores caminhos para transmissão com base nos valores singulares [26]. Os vetores singulares direito e esquerdo (correspondentes às antenas transmissora e recetora) são usados para orientar o feixe. Este método é eficaz para maximizar a capacidade do canal em cenários com múltiplos utilizadores [36].
- **Algoritmo de Formação de Feixe Adaptativo:** Utiliza feedback contínuo sobre a qualidade do sinal recebido para ajustar dinamicamente os parâmetros de Beamforming. Este método pode envolver técnicas como o algoritmo de gradientes descendentes ou algoritmos adaptativos baseados em filtros *Least Mean Squares* (LMS) ou *Recursive Least Squares* (RLS) para ajustar os pesos

das antenas de forma a maximizar a recepção do sinal ou minimizar a taxa de erro de bit [37].

- **Precoding Linear:** Técnicas como ZF Precoding e Precoding de Máxima Razão de Transmissão (MRT) são usadas para pré-codificar os sinais em sistemas MIMO antes da transmissão. Esses algoritmos ajustam os sinais de transmissão para otimizar a performance de recepção considerando o conhecimento do canal [38].

Ao concentrar a energia do sinal na direção dos recetores pretendidos, o Beamforming MIMO consegue aumentar significativamente a relação sinal-ruído no recetor, o que melhora substancialmente a qualidade do sinal. Esta melhoria é essencial em ambientes densos onde múltiplos utilizadores e dispositivos competem pelo mesmo espectro de frequência [33].

Simultaneamente, ao minimizar a emissão de energia em direções não desejadas, o Beamforming ajuda a reduzir a interferência sentida por outros dispositivos. Esta característica é particularmente valiosa em cenários de alta densidade, como em ambientes urbanos ou grandes eventos, onde muitos dispositivos estão ativos simultaneamente.

3.2.6 Desafios técnicos de sistemas MIMO

Embora os sistemas MIMO realizem melhorias significativas em termos de taxa de transmissão de dados e eficiência espectral. No entanto, esses sistemas enfrentam desafios técnicos, que incluem, *cross-polarization*, correlação espacial, complexidade de processamento de sinal, e desvanecimento de multi-percursos.

Cross-Polarization

O fenómeno da *cross-polarization*, também conhecido como polarização cruzada, ocorre quando as ondas eletromagnéticas que são polarizadas numa direção específica são parcialmente ou completamente convertidas para uma polarização perpendicular durante a sua transmissão ou recepção [39].

A *cross-polarization* pode ser causada por diversos fatores, incluindo a reflexão das ondas eletromagnéticas em superfícies como edifícios, água ou metais, que são comuns em ambientes urbanos densos ou áreas com muitas superfícies refletoras. Um alinhamento inadequado ou imperfeições nas antenas também podem contribuir para este fenómeno [40].

Os impactos da *cross-polarization* nos sistemas de comunicação são significativos. Pode resultar numa redução da qualidade do sinal, visto que a energia que deveria ser captada numa determinada polarização é recebida, em parte, na polarização oposta. Isso deteriora a relação sinal-ruído e aumenta a taxa de erro de bits, comprometendo a qualidade da comunicação. Além disso, em sistemas que utilizam múltiplas

polarizações para separar canais e minimizar a interferência, a *cross-polarization* pode causar um aumento na interferência entre canais. Isto ocorre porque os sinais que deveriam ser recebidos por antenas configuradas para uma certa polarização são parcialmente captados por antenas de polarização oposta [41].

Para mitigar os efeitos da *cross-polarization*, é essencial um design apropriado das antenas e uma configuração apropriada do sistema. Utilizar materiais e geometrias de antena que reduzem as mudanças indesejadas na polarização e ajustar precisamente a orientação das antenas são medidas que auxiliam a mitigar estes efeitos. Em ambientes onde a *cross-polarization* é inevitável, podem ser implementados algoritmos de processamento de sinal para compensar os efeitos adversos e preservar a qualidade da comunicação. Os algoritmos que podem ser utilizados seguem listados abaixo:

- **Algoritmos de Estimação de Canal e Equalização:** Algoritmos de estimação de canal podem ser utilizados para identificar as características do canal, incluindo os efeitos da *cross-polarization*. Uma vez que o canal é estimado, algoritmos de equalização podem ser aplicados para corrigir ou compensar distorções no sinal recebido [42].
- **Algoritmos de *Beamforming* Adaptativo:** *Beamforming* adaptativo pode ser utilizado para dirigir e formar feixes de transmissão e recepção de forma a maximizar a relação sinal-ruído e minimizar a interferência, incluindo aquela causada pela *cross-polarization*. Estes algoritmos ajustam as fases e amplitudes dos sinais nas antenas de transmissão e recepção, focando os feixes de energia nas direções desejadas e longe das indesejadas [37].
- **Algoritmos de Cancelamento de Interferência:** Técnicas de cancelamento de interferência são especialmente úteis em ambientes onde a *cross-polarization* contribui para a interferência entre canais ou sinais. Algoritmos como *Interference Alignment* e *Interference Cancellation* trabalham para decompor e distinguir entre os sinais desejados e os sinais de interferência, permitindo que apenas os sinais úteis sejam extraídos [43].
- **Diversidade de Polarização e Combinadores:** Algoritmos que exploram a diversidade de polarização usam informações de múltiplas polarizações para melhorar a qualidade do sinal. Combinadores, como o MRC, podem ser utilizados para combinar sinais de diferentes polarizações de maneira a maximizar a potência do sinal recebido e minimizar o erro [34].

Esses algoritmos podem ser aplicados individualmente ou em combinação, dependendo da complexidade do sistema e da severidade da *cross-polarization*. O uso eficaz dessas técnicas de processamento de sinal pode melhorar o desempenho dos

sistemas de comunicação em ambientes desafiadores, garantindo uma comunicação de qualidade.

Correlação Espacial

O fenómeno da correlação espacial em sistemas MIMO ocorre quando as antenas estão posicionadas muito próximas umas das outras, levando a uma situação em que os sinais que captam são semelhantes ou dependentes, devido à proximidade física entre elas. Esta condição resulta da insuficiente separação entre as antenas no arranjo MIMO, fazendo com que estas recebam as mesmas ondas refletidas, dispersas e difratadas. Quando as antenas captam sinais que não apresentam variações significativas entre si, a diversidade de sinal, que é um dos principais benefícios dos sistemas MIMO, é drasticamente reduzida [44].

A correlação espacial pode afetar negativamente o desempenho dos sistemas de comunicação de várias maneiras. Primeiramente, reduz a capacidade do canal, pois a capacidade máxima é alcançada quando cada antena recebe um sinal único e independente. Adicionalmente, a falta de diversidade de sinal pode aumentar a probabilidade de erro na transmissão dos dados, pois o sistema dispõe de menos recursos independentes para recuperar a informação transmitida corretamente. Também pode levar a uma deterioração da eficiência espectral, uma vez que as técnicas de processamento de sinal usadas para separar e decodificar os fluxos de dados tornam-se menos eficazes com sinais mais correlacionados [45].

Para mitigar a correlação espacial em sistemas MIMO, pode-se adotar estratégias como aumentar a distância entre as antenas dentro do arranjo MIMO, o que pode ajudar a reduzir a correlação. Outra estratégia envolve a utilização de técnicas de diversidade de polarização, alternando as polarizações das antenas para criar caminhos de sinal mais distintos, mesmo em situações de proximidade física. Além disso, otimizar a orientação das antenas para maximizar a captação de sinais de diferentes direções pode ser uma solução eficaz [46].

Complexidade de Processamento de Sinal

O fenômeno da complexidade de processamento de sinal em sistemas MIMO é uma consequência da utilização de múltiplas antenas e da necessidade de executar operações complexas para otimizar tanto a transmissão quanto a recepção de dados. Esta complexidade advém principalmente do volume aumentado de informações que precisam ser processadas e das técnicas avançadas empregadas para explorar a diversidade espacial, como a formação de feixe e a multiplexação espacial, que exigem a aplicação de algoritmos matemáticos sofisticados [47].

A presença de múltiplas antenas significa que cada uma pode receber sinais distintos que devem ser eficientemente combinados ou tratados separadamente. Além disso, para otimizar os sinais transmitidos e recebidos, frequentemente recorre-se a métodos como o SVD, que são computacionalmente intensivos. Este aumento na complexidade de processamento impacta diretamente a eficiência operacional dos sistemas MIMO, exigindo hardware mais sofisticado e potente, o que pode levar a um aumento no consumo de energia e nos custos operacionais [48] [49].

A complexidade pode induzir latência no processamento dos sinais, o que é particularmente crítico em aplicações que exigem transmissões em tempo real ou de baixa latência. Para gerir essa complexidade, é essencial o desenvolvimento e a implementação de algoritmos mais eficientes que consomem menos recursos computacionais sem sacrificar a performance. Técnicas de processamento de sinal distribuído também podem ser aplicadas, onde o processamento é compartilhado entre múltiplos nós ou antenas, ajudando a aliviar a carga em processadores centrais únicos [50].

Desvanecimento de multi-percursos

Quando estas várias cópias do sinal se combinam no recetor, podem interferir umas com as outras de forma construtiva ou destrutiva. A interferência construtiva ocorre quando as ondas se alinham de maneira a reforçar-se mutuamente, aumentando a amplitude do sinal recebido. Por outro lado, a interferência destrutiva acontece quando as ondas se alinham de forma a cancelarem-se, o que pode resultar numa redução significativa da amplitude do sinal. Este tipo de interferência é particularmente problemático porque pode criar zonas de sombra ou reduzir drasticamente a qualidade do sinal, causando erros na transmissão de dados e degradação da qualidade da chamada ou da conexão [51].

O desvanecimento de multi-percursos pode variar significativamente dependendo do ambiente. Em áreas urbanas densas, onde há muitos edifícios altos e estruturas metálicas, é mais provável que ocorra desvanecimento de multi-percursos devido à abundância de superfícies que podem refletir sinais. Em contraste, em ambientes abertos ou rurais, o fenômeno pode ser menos intenso, mas ainda presente, especialmente se houver elementos naturais como colinas ou grandes árvores [52].

Para combater o desvanecimento de multi-percursos, os sistemas de comunicação utilizam várias técnicas. Uma das mais comuns é a diversidade de antenas, onde são utilizadas múltiplas antenas para receber o sinal em locais ou polarizações diferentes, aumentando as hipóteses de pelo menos uma antena receber um sinal forte. Outra técnica envolve o uso de equalizadores, que ajustam dinamicamente as condições do sinal recebido para minimizar os efeitos do desvanecimento.

3.3 Teoria e Aplicações em MIMO

A simulação de sistemas de comunicação sem fio tem se tornado uma ferramenta essencial no desenvolvimento de novas tecnologias, permitindo que pesquisadores e engenheiros testem e validem teorias e protocolos de forma eficiente. A biblioteca Sionna, desenvolvida pela Nvidia, é uma dessas ferramentas de simulação que visa facilitar o processo de design e otimização de sistemas de comunicação.

Entre suas funcionalidades, a simulação de canais MIMO, permite que se explore as complexidades envolvidas em cenários de múltiplos caminhos de propagação do sinal. Um dos modelos utilizados para representar esses canais é o modelo Kronecker, amplamente adotado devido à sua capacidade de simplificar a correlação espacial entre antenas transmissoras e recetoras.

O uso dessas ferramentas, como a Sionna, abre caminho para avanços significativos em comunicações sem fio, como no conceito de *Massive* MIMO, que já é uma realidade nas redes celulares e está integrado aos padrões de redes 5G. A tecnologia *Massive* MIMO não apenas aumenta a capacidade de multiplexação espacial, mas também melhora a resolução espacial, contribuindo para o desempenho de sistemas em ambientes densamente povoados. Essa evolução tecnológica, possibilitada pela simulação, continua a impulsionar a pesquisa em áreas como 6G, sistemas de radar MIMO e redes inteligentes, que utilizam antenas reconfiguráveis para maximizar o desempenho da comunicação.

Essas simulações são cruciais para avaliar o desempenho de diferentes canais de comunicação, incluindo o modelo *flat fading*, que simplifica a resposta em frequência do canal, e o modelo CDL, utilizado para cenários mais complexos, como ambientes urbanos com diversos obstáculos.

3.3.1 Ferramenta de Simulação: Sionna

A Nvidia elaborou uma biblioteca de software, chamada de Sionna [6] que foi desenvolvida para facilitar e acelerar o desenvolvimento e a simulação de comunicações sem fio, inserindo-se dentro do ecossistema de ferramentas e tecnologias de Inteligência Artificial da Nvidia. Esta biblioteca permite que pesquisadores e engenheiros apliquem técnicas de *machine learning* e *deep learning* para aprimorar o design e a eficiência dos sistemas de comunicações sem fio.

Sionna destaca-se pela sua integração com plataformas de aprendizado de máquina como TensorFlow e PyTorch, permitindo a utilização de algoritmos avançados de IA nos dados de simulação gerados. Esta característica oferece a possibilidade de desenvolver modelos de comunicação mais inteligentes e eficientes. Além disso, a biblioteca foi projetada para ser flexível e escalável, suportando uma gama de cenários de simulação, desde pequenas até grandes conjuntos de dados e ambientes complexos. Isso facilita o teste e a validação de diversas tecnologias e teorias de comunicação em ambientes controlados e ajustáveis.

Uma funcionalidade chave do Sionna é a simulação de diferentes ambientes de canal de comunicação, como urbanos densos, rurais ou subterrâneos, que são essenciais para o desenvolvimento de sistemas que precisam funcionar sob diversas condições ambientais e geográficas. A biblioteca também incorpora ferramentas de visualização para permitir uma interpretação intuitiva dos dados de simulação e resultados de análises, ajudando a compreender o comportamento dos sistemas de comunicação e a otimizá-los.

As aplicações do Sionna são variadas e impactam significativamente a pesquisa e o desenvolvimento em comunicações sem fio. A biblioteca é usada para desenvolver e testar novos protocolos de comunicação que podem ser mais eficientes ou robustos contra interferências e ruídos. Além disso, ela auxilia na otimização de redes sem fio existentes através da simulação e teste de diferentes configurações e estratégias de rede. Sionna também desempenha um papel crucial na pesquisa de tecnologias emergentes como 5G e 6G, onde simulações são fundamentais para a experimentação e desenvolvimento de novas tecnologias antes de sua implementação prática.

O artigo [53] aborda o avanço do conceito de *Massive MIMO*, que já é uma realidade em redes celulares comerciais desde 2018. Com o desenvolvimento de estações base equipadas com grandes *arrays* de antenas, os elementos-chave do *Massive MIMO* foram incorporados ao padrão 5G, e suas técnicas de processamento de sinal permitiram ganhos significativos em eficiência espectral. Além disso, problemas como a contaminação de pilotos foram resolvidos, tornando possível a aplicação de *arrays* totalmente digitais, mesmo em frequências *mmWave*.

O artigo delinea cinco novas direções de pesquisa que surgem com a implementação do *Massive MIMO*, apontando para um futuro onde o processamento espacial se torna onipresente. Essas direções incluem *arrays* de abertura extremamente grandes para melhorar a capacidade de multiplexação espacial e aumentar a resolução espacial, o *Massive MIMO* holográfico com o uso de superfícies contínuas para transmitir e receber sinais, criando uma resolução espacial superior e eliminando efeitos indesejados como lóbulos laterais, e o posicionamento em seis dimensões, que explora o uso de *arrays* de antenas para estimar a posição e a orientação de usuários em três dimensões espaciais e três dimensões de rotação (roll, pitch e yaw). Além disso, o *Radar MIMO* em larga escala aplica os princípios do *Massive MIMO* para

aumentar a resolução e a capacidade de rejeição de interferência em sistemas de radar, e o *MIMO inteligente*, com antenas que podem reconfigurar dinamicamente suas características para melhorar o desempenho de comunicação e detecção.

Esta utilização da biblioteca Sionna indica a possibilidade para a utilização para outras aplicações como por exemplo TV digital.

3.3.2 Modelo Kronecker

A matriz de um canal MIMO 2x2 é dada pelos sinais transmitidos entre as antenas transmissoras e recetoras. A Figura 3.7 mostra um diagrama de transmissão e recepção dos sinais, onde h_{11} é o sinal transmitido da primeira antena transmissora para a primeira antena receptora, h_{12} é o sinal transmitido da primeira antena transmissora para a segunda antena receptora, h_{21} é o sinal transmitido da segunda antena transmissora para a primeira antena receptora, e h_{22} é o sinal transmitido da segunda antena transmissora para a segunda antena receptora.

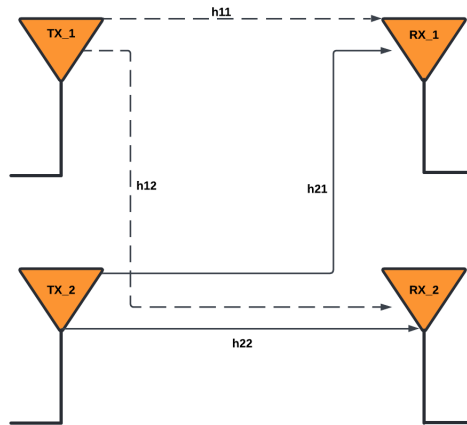


Figura 3.7: Sistema de transmissão e recepção MIMO 2x2.

A matriz é representada da seguinte forma:

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

O modelo *Kronecker* é amplamente utilizado na modelagem de canais MIMO devido à sua capacidade de simplificar a correlação espacial entre as antenas transmissoras e recetoras. Esse modelo assume que a matriz de correlação do canal pode ser decomposta em componentes separáveis para o transmissor (R_t) e o recetor (R_r). A matriz de correlação do canal R é dada por $R = R_r \otimes R_t$, onde \otimes denota o produto *Kronecker*.

Dentro do canal foi incluída uma correlação espacial. A matriz de correlação do transmissor (R_t) representa a correlação entre as antenas transmissoras, descrevendo

as correlações entre os sinais transmitidos por diferentes antenas no recetor. No sistema MIMO 2x2, a matriz é dada pela Equação 3.8.

$$R_t = \begin{bmatrix} 1 & \rho_t \\ \rho_t & 1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Onde ρ_t é o coeficiente de correlação entre as antenas de transmissão.

A matriz de correlação do recetor (R_r) representa a correlação entre as antenas recetoras, descrevendo as correlações entre os sinais recebidos por diferentes antenas no recetor. No sistema MIMO 2x2, a matriz é dada pela Equação 3.9.

$$R_r = \begin{bmatrix} 1 & \rho_r \\ \rho_r & 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Onde ρ_r é o coeficiente de correlação entre as antenas de receção.

Dentro deste modelo ocorrerá uma variação dos valores de (ρ_t) e (ρ_r). Um valor alto para as matrizes de correlação significa que os sinais recebidos ou transmitidos pelas diferentes antenas são muito semelhantes. Isso pode levar a uma redução na diversidade espacial e, conseqüentemente, a uma degradação do desempenho do sistema MIMO, pois menos caminhos independentes de propagação estão disponíveis para a transmissão de dados. Um valor baixo de correlação indica que os sinais recebidos ou transmitidos pelas diferentes antenas são bastante diferentes. Isso aumenta a diversidade espacial e melhora o desempenho do sistema MIMO, pois mais caminhos independentes de propagação estão disponíveis, permitindo uma melhor separação dos fluxos de dados transmitidos simultaneamente.

Com correlação, a matriz de canal (H) fica de acordo com a Equação 3.10:

$$\mathbf{H} = \mathbf{R}_r^{1/2} \mathbf{H}_w \mathbf{R}_t^{1/2} \quad (3.10)$$

Onde $\mathbf{R}_r^{1/2}$ representa a matriz de correlação no lado do recetor, elevada à potência 1/2, $\mathbf{R}_t^{1/2}$ representa a matriz de correlação no lado do transmissor, elevada à potência 1/2 e \mathbf{H}_w é a matriz de canal sem correlação, onde os elementos são independentes e identicamente distribuídos (i.i.d), representando um canal de Rayleigh.

3.3.3 Canais

Flat Fading

Um canal *flat fading*, também conhecido como canal de desvanecimento plano, é um tipo de canal de comunicação em que todas as frequências componentes de um sinal transmitido são afetadas de maneira uniforme pelo canal [54]. Em outras palavras, a resposta em frequência do canal é considerada constante ou plana sobre a largura de banda do sinal transmitido [55]. Este tipo de canal é utilizado para simplificar o modelo de propagação do sinal, especialmente em cenários onde a largura de banda

do sinal é significativamente menor que a largura de banda de coerência do canal [56].

A característica principal de um canal *flat fading* é a resposta em frequência constante. Neste canal, a resposta em frequência do canal é aproximadamente constante sobre a largura de banda do sinal, o que significa que o canal não introduz distorção de frequência, afetando igualmente todas as componentes espectrais do sinal [57]. O desvanecimento em um canal *flat fading* é causado principalmente pela interferência construtiva e destrutiva de múltiplos caminhos de propagação do sinal, resultando em flutuações na amplitude e na fase do sinal recebido. O desvanecimento pode ser modelado como um processo aleatório, tipicamente seguindo uma distribuição *Rayleigh* ou *Rician*, dependendo da presença ou ausência de uma linha de visão direta entre o transmissor e o receptor [58].

A largura de banda de coerência é uma medida da faixa de frequências sobre a qual o canal pode ser considerado plano. Em um canal *flat fading*, a largura de banda do sinal é muito menor do que a largura de banda de coerência do canal, assegurando que todas as frequências componentes do sinal experimentam o mesmo nível de desvanecimento [54]. O tempo de coerência é a medida do intervalo de tempo durante o qual a resposta do canal permanece praticamente constante. Em sistemas móveis, o tempo de coerência é inversamente proporcional à velocidade de movimento do receptor ou do transmissor [55]. Em um canal *flat fading*, o sinal deve ser transmitido dentro do tempo de coerência para evitar variações significativas na resposta do canal durante a transmissão [56].

Para modelar um canal *flat fading*, são utilizadas representações matemáticas que descrevem a amplitude e a fase do sinal recebido como variáveis aleatórias. Dois modelos principais são frequentemente utilizados. O desvanecimento *Rayleigh* é aplicável quando não há uma linha de visão direta entre o transmissor e o receptor, e o sinal recebido é composto por múltiplos caminhos refletidos. A amplitude do sinal recebido segue uma distribuição *Rayleigh*, e a fase é uniformemente distribuída entre 0 e 2π [57]. Já o desvanecimento *Rician* é utilizado quando há uma linha de visão direta entre o transmissor e o receptor, além de múltiplos caminhos refletidos. A amplitude do sinal recebido segue uma distribuição *Rician*, que é uma combinação da componente direta (linha de visão) e das componentes difusas (múltiplos caminhos) [58].

Os canais *flat fading* são considerados em cenários de comunicação onde a largura de banda do sinal é relativamente estreita, como em certos sistemas de comunicação móvel e satélite. Entender e modelar o comportamento do canal *flat fading* é fundamental para o design e a análise de sistemas de comunicação, permitindo a previsão de desempenho e a implementação de técnicas de mitigação de desvanecimento, como diversidade de recepção e equalização adaptativa [54, 55, 56]. Em resumo, o canal *flat fading* é um modelo que assume uma resposta em frequência

constante do canal sobre a largura de banda do sinal transmitido. Este modelo é aplicável em situações onde a largura de banda de coerência do canal é maior que a largura de banda do sinal. A compreensão do comportamento do canal *flat fading* é essencial para o design eficiente de sistemas de comunicação, especialmente em ambientes onde o desvanecimento é um fator significativo na qualidade do sinal recebido [57, 58].

CDL

Um canal CDL é um modelo sofisticado utilizado em sistemas de múltiplas entradas e múltiplas saídas MIMO. Este modelo é projetado para capturar as complexas características de propagação do sinal em ambientes sem fio, especialmente em cenários urbanos onde o sinal enfrenta múltiplos caminhos de propagação devido à presença de obstáculos como edifícios, veículos e outros objetos que causam reflexões, difrações e espalhamentos. O modelo de canal CDL agrupa múltiplos caminhos de propagação em *clusters*. Cada *cluster* representa um conjunto de caminhos que compartilham características de atraso e ângulo semelhantes. Essa abordagem é crucial para representar a realidade de como os sinais de rádio se comportam em ambientes densos. Dentro de cada *cluster*, os caminhos de propagação têm atrasos de propagação ligeiramente diferentes, o que reflete a diversidade de trajetórias que o sinal pode percorrer antes de alcançar o recetor [59].

Além dos atrasos de propagação, o modelo CDL considera o espalhamento angular. Isso inclui tanto a direção de chegada *Angle of Arrival* (AoA) quanto a direção de partida *Angle of Departure* (AoD) dos sinais. Esses ângulos são essenciais para capturar a dispersão espacial dos sinais, que é uma característica fundamental em sistemas MIMO, onde múltiplas antenas são usadas para transmitir e receber sinais.

O modelo também incorpora o desvanecimento, que pode ser de natureza Rayleigh, Rician ou outro tipo, dependendo das características específicas do ambiente de propagação. O desvanecimento descreve a variação aleatória da amplitude do sinal devido à interferência construtiva e destrutiva das múltiplas trajetórias do sinal [60].

Em cenários de mobilidade, o modelo CDL leva em consideração o efeito *Doppler*, resultante da movimentação do transmissor ou do recetor. O efeito *Doppler* causa uma variação na frequência dos sinais recebidos, o que é crucial para a avaliação do desempenho de sistemas de comunicação em ambientes móveis.

Os modelos CDL são classificados de A a E, cada um com características específicas que refletem diferentes cenários de propagação. O CDL-A representa um ambiente com baixa dispersão, tipicamente um cenário rural ou suburbano com poucos obstáculos. Os caminhos de propagação são menos variados, resultando em um desvanecimento mais suave e menor espalhamento angular. O CDL-B é apropriado para ambientes com moderada dispersão, como áreas suburbanas com mais

obstruções do que CDL-A, mas ainda menos complexas do que ambientes urbanos densos. Há um número maior de caminhos de propagação com maior variabilidade nos atrasos e ângulos. O CDL-C representa ambientes urbanos típicos. Neste modelo, há uma maior quantidade de *clusters* e caminhos de propagação, refletindo a complexidade do cenário urbano com muitos edifícios e outras estruturas que causam múltiplas reflexões e difrações. O CDL-D é utilizado para ambientes urbanos densos com alta dispersão. É caracterizado por muitos *clusters* e uma grande variabilidade nos atrasos e ângulos de chegada e partida. Este modelo é crucial para simular cenários como centros de grandes cidades. O CDL-E representa ambientes industriais ou centros urbanos extremamente densos. Este é o modelo mais complexo e detalhado, capturando a alta dispersão e a grande quantidade de caminhos de propagação, refletindo ambientes com muitas superfícies refletoras e dispersoras [61].

Capítulo 4

Metodologia e Resultados

Este capítulo apresenta a metodologia empregada e os resultados obtidos na análise do fator de correlação e na avaliação de um modelo CDL em sistemas de comunicação MIMO 2x2. Inicialmente, detalha-se a metodologia para a análise do fator de correlação, incluindo a descrição do diagrama de blocos do sistema de transmissão, a utilização da biblioteca Sionna para simulações e os testes planejados para avaliar o impacto da correlação no desempenho do sistema, a Nvidia disponibiliza uma serie de modelos em que o Sionna pode ser utilizado e para este trabalho foi utilizado um modelo disponibilizado e foram feitas algumas mudanças para que se obtenha os resultados indicado na metodologia. Em seguida, são apresentados os resultados da análise, com ênfase na avaliação da curva de BER em função da relação sinal-ruído por bit E_b/N_0 para diferentes tipos de correlação e modulações QAM.

Na segunda parte do capítulo, descreve-se a metodologia para a análise de um modelo CDL, incluindo a configuração dos testes, a geração da resposta ao impulso do canal e as etapas envolvidas na simulação do sistema MIMO 2x2. Por fim, são apresentados os resultados da análise do modelo CDL, com foco na avaliação da curva de BER em função do E_b/N_0 para diferentes modelos de canal CDL e modulações QAM, permitindo a comparação do desempenho e a identificação das condições de propagação mais desafiadoras para o sistema.

Em suma, este capítulo fornece uma visão abrangente da metodologia e dos resultados obtidos neste estudo, contribuindo para a compreensão do impacto da correlação e dos diferentes modelos de canal no desempenho de sistemas de comunicação MIMO 2x2.

4.1 Metodologia para a análise do fator de correlação

A Figura 4.7 mostra o diagrama de blocos que foi elaborado. No diagrama, apresentam-se as variáveis de entrada e saída que foram utilizadas durante a elaboração do código. Todo o sistema foi elaborado na linguagem de programação *Python*.

O diagrama de blocos é composto por uma fonte binária que gera uma sequência de bits pseudoaleatórios que servem como dados de entrada para o sistema de transmissão. Esses bits representam a informação que se deseja transmitir. O codificador aplica um código de canal à sequência de bits para adicionar redundância, ajudando a corrigir erros que podem ocorrer durante a transmissão através do canal. Exemplos de codificação incluem códigos de blocos e códigos convolucionais. O mapeador converte a sequência de bits codificados em símbolos, que são representações modulares dos dados. Cada grupo de bits é mapeado em um símbolo de acordo com a técnica de modulação escolhida, como QAM, sendo utilizada uma quantidade diferente de bits por símbolo, variando de 2 até 8, correspondendo a 4-QAM até 256-QAM. A fonte QAM representa a modulação QAM, uma técnica de modulação que utiliza a amplitude de duas ondas portadoras em quadratura para transmitir os dados.

O canal de desvanecimento plano, *FlatFading*, modela o canal de comunicação que pode introduzir uma variação na amplitude, potência e a fase do sinal causada por multicaminhos de propagação e reflexões. O canal pode ser afetado por condições ambientais e pela movimentação dos transmissores e receptores. O ruído branco gaussiano, *AWGN*, representa a adição de ruído branco gaussiano ao sinal transmitido. O ruído é caracterizado por uma densidade espectral de potência constante, afetando igualmente todas as frequências na banda de interesse, e suas amplitudes são distribuídas de acordo com uma distribuição normal com média zero e uma variância que depende da potência do ruído.

A correlação espacial representa a correlação espacial entre diferentes caminhos de propagação, realizada através de um modelo Kronecker. O equalizador de erro quadrático médio mínimo linear, *LMMSE*, é utilizado para mitigar os efeitos do canal de desvanecimento, ajustando os sinais recebidos para minimizar o erro médio quadrático entre os sinais transmitidos e recebidos, melhorando a recuperação dos dados. O desmapeador realiza o processo inverso ao mapeamento, convertendo os símbolos de volta em bits de dados, um passo essencial para recuperar a sequência de bits original após a equalização. O decodificador aplica a técnica de decodificação para corrigir os erros que ocorreram durante a transmissão e remover a redundância adicionada pelo codificador, com o objetivo de recuperar a sequência de bits original enviada pela fonte binária.

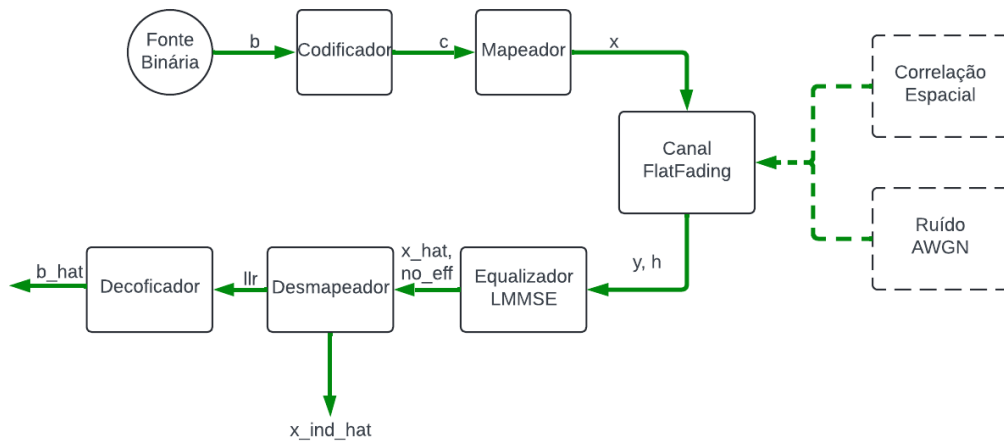


Figura 4.1: Diagrama de Blocos.

Os testes planejados via Sionna incluem a elaboração da curva de BER pelo E_b/N_0 , para diferentes tipos de correlação. Esses testes são para verificar como a correlação afeta o desempenho do sistema de comunicação.

4.2 Resultados da análise do fator de correlação

O primeiro passo deste estudo foi a elaboração dos sistemas de transmissão, nos quais foram realizadas variações na quantidade de bits por símbolo. Especificamente, foram consideradas configurações com 2, 4 e 8 bits por símbolo.

Foram gerados 1024 bits que são transmitidos através de um canal com desvanecimento *Rayleigh*, que também introduz um ruído AWGN, com um E_b/N_0 de 20 dB. Após a transmissão pelo canal, os símbolos passam por um equalizador LMMSE. Após a equalização, verifica-se as constelações transmitidas e recebidas. A Figura 4.2a mostra a constelação 4-QAM com os símbolos transmitidos sendo os pontos em laranja (pontos 'x') e os símbolos recebidos sendo os pontos em azul (pontos circulares). A Figura 4.2b mostra a constelação 16-QAM com os símbolos transmitidos sendo os pontos em laranja e os símbolos recebidos sendo os pontos em azul, e a Figura 4.2c mostra a constelação 256-QAM com os símbolos transmitidos sendo os pontos em laranja e os símbolos recebidos sendo os pontos em azul.

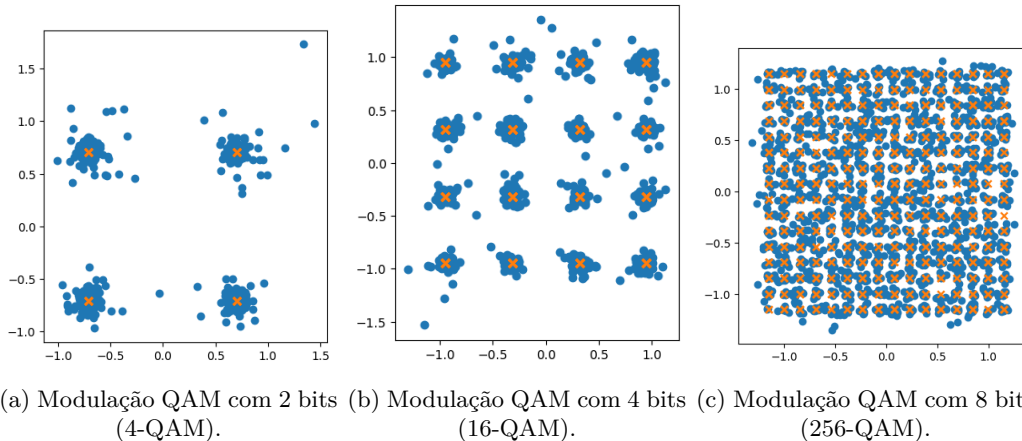


Figura 4.2: Comparação das diferentes modulações QAM.

A saída do equalizador gera uma matriz que representa o ruído efetivo. O formato dessa matriz está relacionado à quantidade de bits transmitidos e ao número de antenas transmissoras. No caso de um sistema MIMO 2x2, a matriz de ruído efetivo terá um número de linhas correspondente à quantidade de bits transmitidos e um número de colunas correspondente ao número de antenas de transmissão.

O próximo passo é a demodulação dos símbolos recebidos e a avaliação do desempenho do sistema de comunicação através do cálculo do SER. Uma das características é que o demodulador deve fazer decisões abruptas (*hard decisions*), o que significa que ele mapeia diretamente os símbolos recebidos para os índices dos símbolos mais próximos na constelação, sem considerar a probabilidade ou suavidade dos símbolos recebidos, o demodulador também retorna os índices dos símbolos transmitidos, que são os pontos na constelação QAM mapeados para os bits transmitidos. O codificador de canal foi o LDPC com o tamanho do quadro em 1024 bits, e taxa de codificação de 0,5 e 50 iterações. A explicação acima pode ser vista na listagem 4.1 que se refere uma parte do código em Python utilizado para realizar as simulações.

```

1 class Model(tf.keras.Model):
2     def __init__(self, spatial_corr=None):
3         super().__init__()
4         self.n = 1024
5         self.k = 512
6         self.coderate = self.k/self.n
7         self.num_bits_per_symbol =m
8         self.num_tx_ant = 2
9         self.num_rx_ant = 2
10        self.binary_source = BinarySource()
11        self.encoder = LDPC5GEncoder(self.k, self.n)
12        self.mapper = Mapper("qam", self.num_bits_per_symbol)
13        self.demapper = Demapper("app", "qam", self.
            num_bits_per_symbol)

```

```

14         self.decoder = LDPC5GDecoder(self.encoder, hard_out=True)
15         self.channel = FlatFadingChannel(self.num_tx_ant,
16                                         self.num_rx_ant,
17                                         spatial_corr=spatial_corr
18                                         ,
19                                         add_awgn=True,
20                                         return_channel=True)

```

Listagem 4.1: Definição de uma classe de modelo com canal *Flat Fading*.

Os gráficos resultantes da simulação, mostram a curva de BER, onde no eixo Y está o valor de BER e no eixo X está E_b/N_0 , as curvas foram elaboradas utilizando valores de 0,2 para ρ_t e valores de 0,1 até 0,9 para ρ_r . A lógica para tal aplicação pode ser vista na listagem exemplificativa 4.2.

```

1  step = 0.1
2  current_value = 0.1
3
4  r_tx = exp_corr_mat(0.2, num_tx_ant)
5
6  while current_value <= 0.9:
7      print(current_value)
8
9      r_rx = exp_corr_mat(current_value, num_rx_ant)
10     model2 = Model(KroneckerModel(r_tx, r_rx))
11
12     ber_plot.simulate(model2,
13                       range,
14                       batch_size=1024,
15                       max_mc_iter=50,
16                       num_target_block_errors=20,
17                       legend=f"Fator de Correla o {current_value:.1f}");
18
19     current_value += step

```

Listagem 4.2: Lógica para a elaboração dos gráficos.

A linha define um limiar crítico de BER de 10^{-6} , este valor indica que o sistema de comunicação apresenta poucos erros e os sinais recebidos serão pouco afetados. Um BER abaixo deste valor indica um desempenho adequado, enquanto um BER acima deste limiar indica um desempenho não satisfatório. Uma comportamento padrão que é indicado nos gráficos é que conforme os valores da correlação aumentam, as curvas de BER tendem a deslocar-se para a direita, indicando que um maior valor de E_b/N_0 é necessária para atingir o limiar estabelecido. Indicando que quando os

sinais transmitidos estão muito correlacionados o desempenho do sistema tende a ser prejudicado.

A Figura 4.3 mostra a modulação 4-QAM. A curva azul escuro, correspondente à correlação 0.0, mostra o melhor desempenho, atingindo o limiar de BER de 10^{-6} em torno de 5 dB de E_b/N_0 . Isso implica que, com baixa correlação, o sistema requer menos energia para atingir um BER aceitável. A curva azul claro, correspondente à correlação 0.9, mostra o pior desempenho. Ela atinge o limiar de BER de 10^{-6} com um E_b/N_0 de aproximadamente 11 dB, indicando que alta correlação degrada significativamente o desempenho do sistema. As curvas intermediárias mostram como o desempenho se degrada gradualmente com o aumento da correlação. Por exemplo, a curva correspondente à correlação 0.5 atinge o limiar de 10^{-6} em torno de 6 dB de E_b/N_0 .

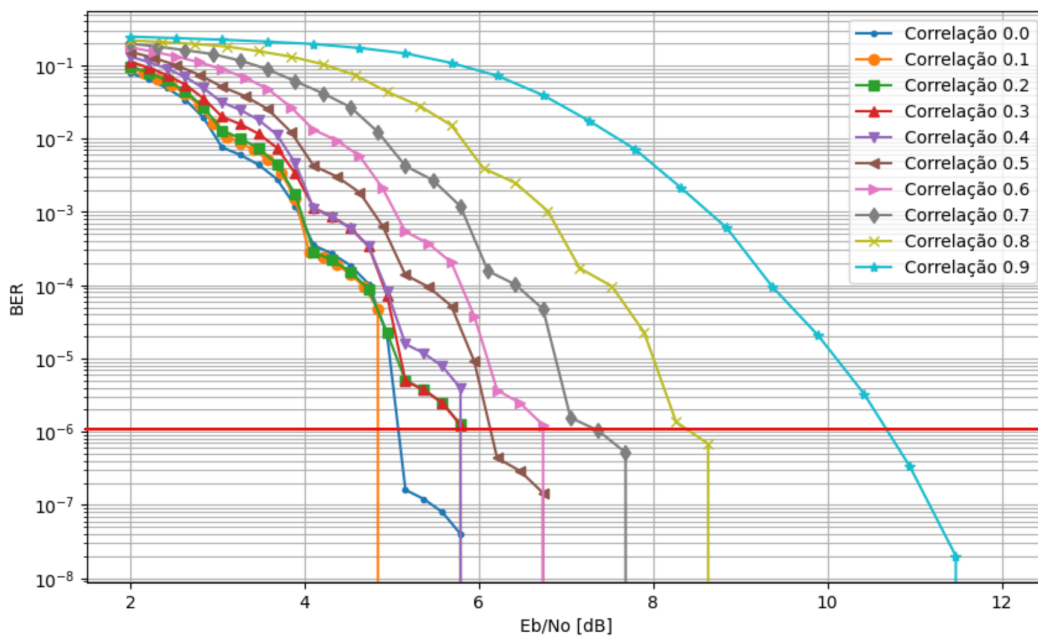


Figura 4.3: Curva de BER para 4-QAM.

A Figura 4.4 mostra a modulação 16-QAM. A curva azul escuro, que representa a correlação 0.0, demonstra o desempenho mais eficiente, alcançando o limiar de BER de 10^{-6} em aproximadamente 9 dB de E_b/N_0 . Isso sugere que, com baixa correlação, o sistema necessita de menos energia para atingir um BER aceitável. Por outro lado, a curva azul claro, correspondente à correlação 0.9, exibe o pior desempenho. Esta curva atinge o limiar de BER de 10^{-6} com cerca de 15 dB de E_b/N_0 , indicando que alta correlação prejudica significativamente o desempenho do sistema. As curvas intermediárias ilustram como o desempenho se deteriora gradualmente com o aumento da correlação. Por exemplo, a curva associada à correlação 0.5 atinge o limiar de 10^{-6} por volta de 11 dB de E_b/N_0 .

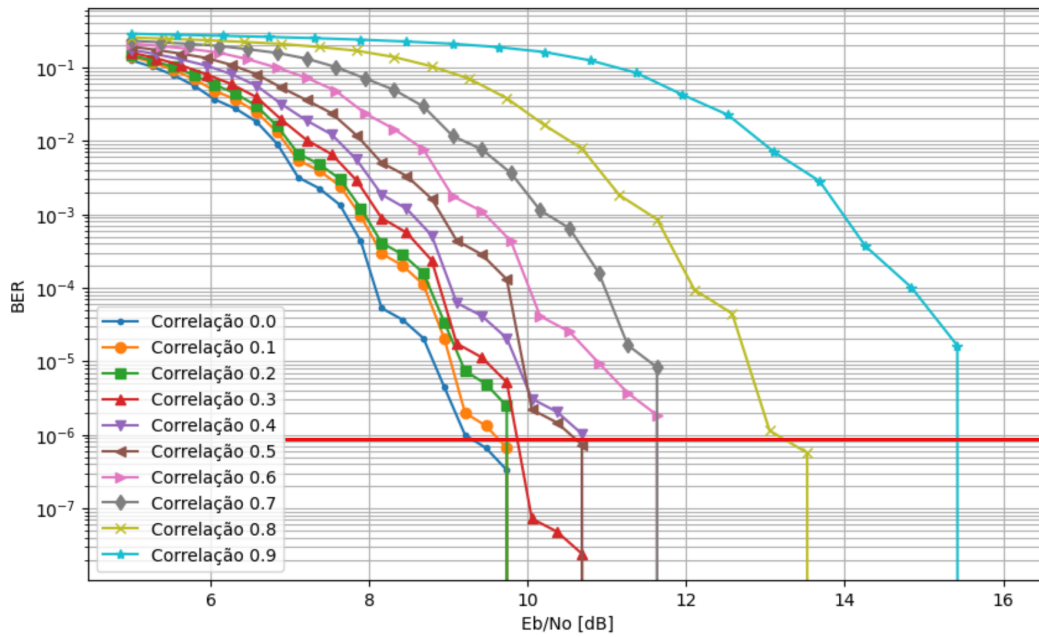


Figura 4.4: Curva de BER para 16-QAM.

A Figura 4.5 mostra a modulação 256-QAM. A curva laranja, que representa a correlação 0.1, demonstrou o desempenho mais eficiente, alcançando o limiar de BER de 10^{-6} em aproximadamente 17 dB de E_b/N_0 . Isso sugere que, com baixa correlação, o sistema necessita de menos energia para atingir um BER aceitável. Por outro lado, a curva azul claro, correspondente à correlação 0.9, exibe o pior desempenho. Esta curva atinge o limiar de BER de 10^{-6} com cerca de 24 dB de E_b/N_0 , indicando que alta correlação prejudica significativamente o desempenho do sistema. As curvas intermediárias ilustram como o desempenho se deteriora gradualmente com o aumento da correlação. Por exemplo, a curva associada à correlação 0.5 atinge o limiar de 10^{-6} por volta de 18 dB de E_b/N_0 .

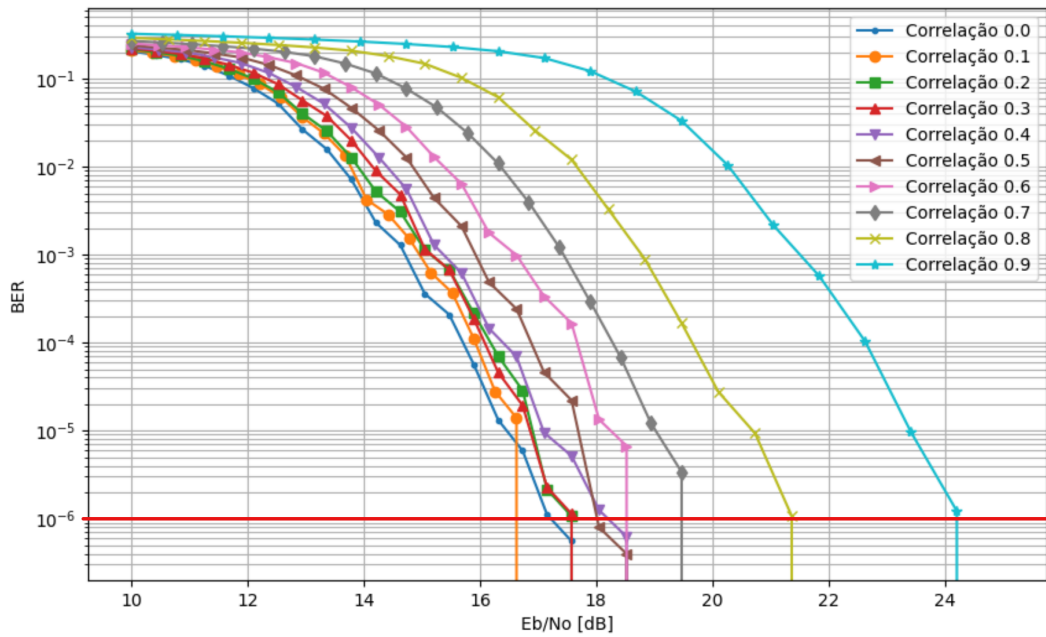


Figura 4.5: Curva de BER para 256-QAM.

Outro teste elaborado foi o de realizar as curvas de BER com diferentes fatores de correlação entre as antenas. A Figura 4.6 com a modulação 4-QAM, mostra as curvas utilizando os fatores de correlação de 0.1 para o transmissor e 0.9 para o recetor, 0.9 para o transmissor e 0.1 para o recetor, 0.2 para o transmissor e 0.5 para o recetor, 0.5 para o transmissor e 0.2 para o recetor, 0.2 para o transmissor e 0.3 para o recetor e 0.3 para o transmissor e 0.2 para o recetor.

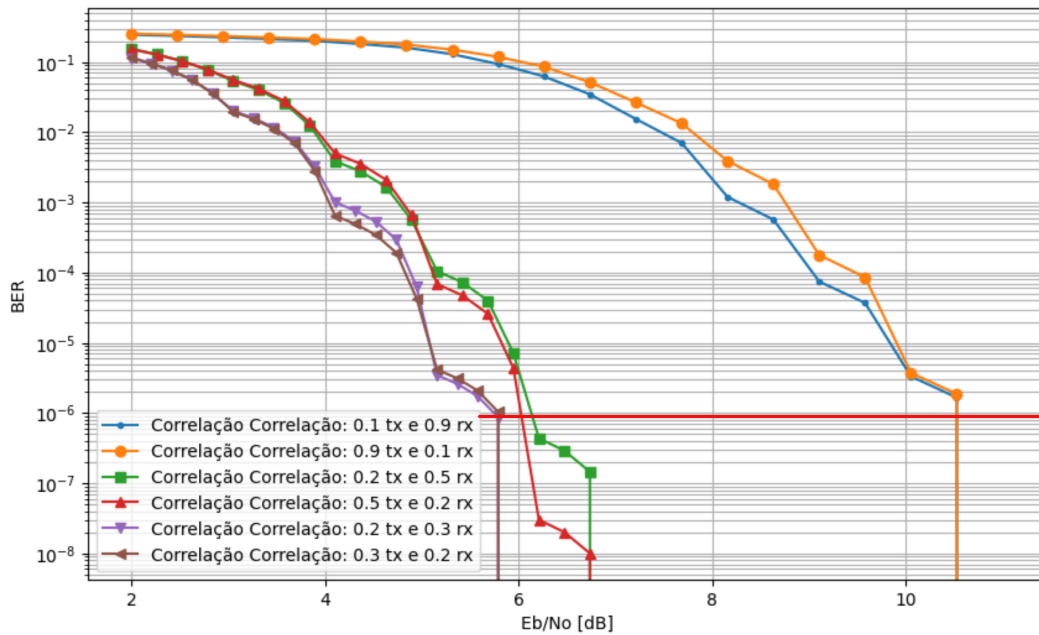


Figura 4.6: Curva de BER com diferentes fatores de correlação entre as antenas.

De acordo com a Figura 4.6, nota-se que, caso o fator de correlação seja maior para a antena transmissora, a curva de BER tende a deslocar-se mais para a direita. Mesmo com esta observação, as curvas de BER para os fatores de correlação de 0.1 para o transmissor e 0.9 para o recetor, e de 0.9 para o transmissor atingem o limiar com aproximadamente 11 dB de E_b/N_0 . As curvas com os fatores de correlação de 0.2 para o transmissor e 0.5 para o recetor, e de 0.5 para o transmissor e 0.2 para o recetor atingem o limiar com aproximadamente 6 dB de E_b/N_0 . Para os fatores de correlação de 0.2 para o transmissor e 0.3 para o recetor, e de 0.3 para o transmissor e 0.2 para o recetor, o limiar é atingido com um valor abaixo de 6 dB de E_b/N_0 . O mesmo comportamento ocorre para as modulações de 16-QAM e 256-QAM, sendo a diferença os valores de E_b/N_0 .

Em suma, os resultados indicam que em um sistema onde o fator de correlação é controlável, como nos testes iniciais com $\rho_t = 0.2$, é necessário aumentar o valor de E_b/N_0 para garantir uma recepção com poucos erros.

Quanto às modulações, a 256-QAM se destaca por permitir o envio de uma maior quantidade de dados, porém, exige um valor mais elevado de E_b/N_0 .

Além disso, observou-se que o sinal é mais suscetível a deterioração quando há alta correlação na transmissão. Em outras palavras, um alto fator de correlação no transmissor tende a prejudicar a qualidade do sinal recebido.

4.3 Metodologia para a análise de um modelo CDL

O objetivo desta sessão é propor um teste de avaliação do desempenho do sistema MIMO 2x2 em diferentes cenários de propagação representados pelos modelos de canal CDL (CDL-A, CDL-B, CDL-C, CDL-D e CDL-E). A métrica de desempenho utilizada é a BER em função da relação sinal-ruído por bit (E_b/N_0).

Para configurar os testes, utiliza-se um sistema MIMO 2x2, que consiste em duas antenas de transmissão e duas de recepção. Os testes são realizados utilizando diferentes modelos de canal CDL no domínio da frequência. Os parâmetros de simulação incluem um tamanho de lote de 100 amostras por lote, 1024 amostras de tempo, uma largura de banda de 6 MHz, típica para TV digital.

Para cada modelo de canal CDL, gera-se a resposta ao impulso do canal considerando múltiplos caminhos, cada um com diferentes atrasos, ganhos de potência e ângulos de chegada e partida. A resposta ao impulso do canal é normalizada para garantir que a soma dos ganhos de potência de todos os caminhos seja igual a 1.

A simulação do sistema envolve várias etapas. Primeiramente, os dados binários são gerados e codificados usando um codificador *Low Density Parity Check* (LDPC). Em seguida, os dados codificados são mapeados para símbolos de modulação QAM. Esses símbolos modulados são então mapeados na grade de recursos OFDM, que organiza os símbolos em uma estrutura temporal e frequencial adequada para transmissão. Após o mapeamento, realiza-se a modulação OFDM, onde os símbolos são convertidos para o domínio do tempo usando a transformada inversa de Fourier.

Os símbolos OFDM são então transmitidos através do canal CDL simulado, que aplica os efeitos de múltiplos caminhos, desvanecimento e atraso. No receptor, aplica-se a equalização *Linear Minimum Mean Square Error* (LMMSE) para mitigar os efeitos do desvanecimento, ajustando os sinais recebidos para minimizar o erro médio quadrático entre os sinais transmitidos e recebidos, melhorando a recuperação dos dados. Após a equalização, realiza-se a demodulação OFDM, convertendo os sinais de volta para o domínio da frequência usando a transformada de Fourier. Em seguida, o desmapeador converte os símbolos de volta em bits de dados. Finalmente, o decodificador LDPC corrige os erros ocorridos durante a transmissão e remove a redundância adicionada pelo codificador, visando recuperar a sequência de bits original enviada pela fonte binária.

A Figura 4.7 apresenta o diagrama de blocos elaborado para o sistema de transmissão. Neste diagrama, são exibidas as etapas principais do processo de transmissão e recepção de dados.

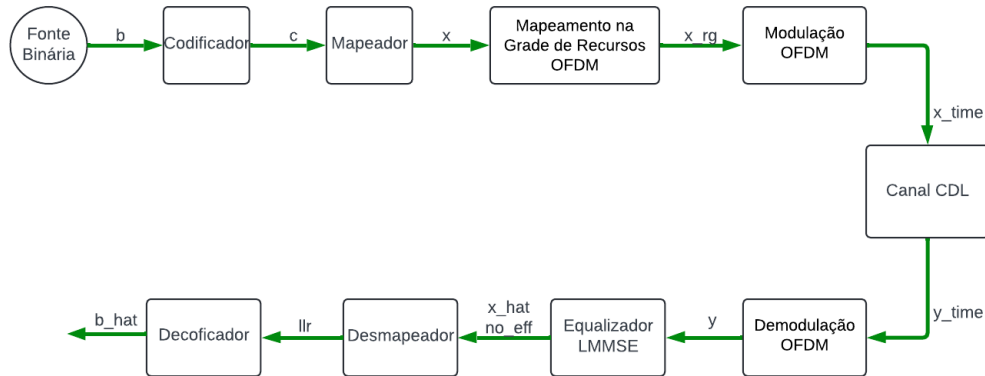


Figura 4.7: Diagrama de Blocos.

Os testes planejados incluem a avaliação da curva de BER em função do E_b/N_0 para diferentes tipos de correlação. Esses testes visam verificar como a correlação afeta o desempenho do sistema de comunicação. Durante os testes, é possível verificar os valores do BER, proporcionando uma análise detalhada da eficiência e robustez do sistema em uma variedade de cenários operacionais.

As simulações são executadas para cada valor de E_b/N_0 dentro da faixa especificada. Para cada valor de E_b/N_0 , o BER é calculado comparando os dados transmitidos e recebidos. Este processo é repetido para cada modelo de canal CDL para avaliar o desempenho sob diferentes condições de propagação.

Os resultados são plotados em gráficos de BER versus E_b/N_0 para cada modelo de canal CDL. A análise dos gráficos permite comparar o desempenho dos diferentes modelos de canal, identificando quais condições de propagação são mais desafiadoras para o sistema e quais modelos oferecem melhor desempenho em termos de redução de erros.

4.4 Resultados da análise de um modelo CDL

A Figura 4.8 mostra um gráfico de BER versus E_b/N_0 para diferentes modelos de canal CDL em um sistema MIMO 2x2 com modulação 4QAM. No eixo X, são representados os valores de E_b/N_0 em decibéis, onde valores mais altos indicam melhor qualidade do sinal. No eixo Y, são representados os valores de BER em escala logarítmica, onde valores mais baixos indicam melhor desempenho do sistema.

As curvas representam diferentes modelos de canal CDL. O modelo CDL-A, representado por círculos azuis, mostra um desempenho consistente ao longo da faixa de E_b/N_0 , com o BER diminuindo gradualmente com o aumento de E_b/N_0 . O modelo CDL-B, representado por quadrados laranja, apresenta uma queda mais acentuada no BER em comparação com CDL-A, alcançando valores muito baixos (\approx

10^{-6}) em altos E_b/N_0 , indicando boa performance em condições de alta relação sinal-ruído. O modelo CDL-C, representado por triângulos verdes, tem um desempenho similar ao CDL-A e CDL-B em baixos E_b/N_0 , mas mostra uma queda abrupta no BER em altos E_b/N_0 . O modelo CDL-D, representado por losangos vermelhos, exibe um desempenho inferior em baixas relações E_b/N_0 , com BER altos ($\approx 10^{-4}$), mas o BER diminui significativamente com o aumento de E_b/N_0 , embora não atinja níveis tão baixos quanto CDL-B ou CDL-C. O modelo CDL-E, representado por cruzeiros roxas, não demonstra um comportamento variável para esta modulação.

Em termos de desempenho relativo dos modelos CDL, CDL-A e CDL-B apresentam melhor desempenho, com o BER caindo consistentemente à medida que o E_b/N_0 aumenta. O modelo CDL-B, em particular, demonstra uma robustez maior em altos E_b/N_0 , alcançando os menores valores de BER. O modelo CDL-C mostra uma melhoria significativa em altos E_b/N_0 , semelhante ao CDL-B, mas com uma curva um pouco mais irregular. O modelo CDL-D exibe um desempenho inferior em baixos E_b/N_0 , mas melhora significativamente à medida que E_b/N_0 aumenta, embora não atinja os mesmos baixos níveis de BER que CDL-B e CDL-C.

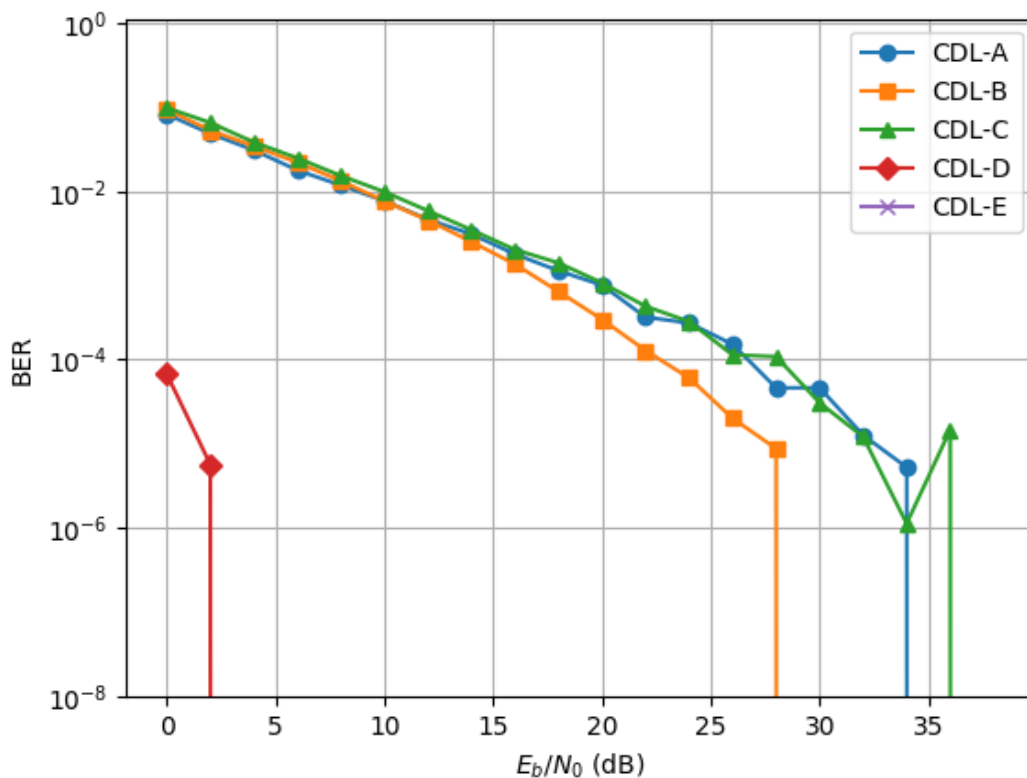


Figura 4.8: Curva de BER para 4-QAM em um canal CDL.

A Figura 4.9 apresenta um gráfico de BER versus E_b/N_0 para diferentes modelos de canal CDL em um sistema MIMO 2x2 utilizando modulação 16QAM. O modelo CDL-A mostra uma diminuição gradual do BER com o aumento de E_b/N_0 , mas

em um ritmo mais lento comparado a outras modulações, refletindo a maior complexidade de 16QAM. CDL-B se destaca pela queda acentuada no BER em altos E_b/N_0 , sugerindo sua eficiência em ambientes com alta relação sinal-ruído. O modelo CDL-C exibe uma performance intermediária, com uma queda significativa no BER em níveis elevados de E_b/N_0 , embora com algumas flutuações menores. O modelo CDL-D, embora inicialmente apresentando um BER elevado, mostra uma melhora notável com o aumento de E_b/N_0 , destacando-se por sua robustez em cenários de maior sinal-ruído. CDL-E, por sua vez, apresenta variabilidade no desempenho, com quedas abruptas do BER em níveis específicos de E_b/N_0 , indicando a influência de condições específicas do canal.

A modulação 16QAM, ao contrário de modulações de ordem inferior, como QPSK ou 4QAM, é mais suscetível a erros devido à sua maior densidade de constelação. Isso se reflete no gráfico, onde os valores de BER são maiores em baixos E_b/N_0 . No entanto, à medida que E_b/N_0 aumenta, observa-se uma diminuição significativa do BER, demonstrando a eficácia da 16QAM em condições favoráveis de alta relação sinal-ruído. Este comportamento é particularmente visível em modelos como CDL-B e CDL-C, que mostram uma queda rápida do BER em altos E_b/N_0 .

O desempenho do modelo CDL-B em altos E_b/N_0 é notável, com o BER atingindo valores muito baixos, sugerindo que este modelo de canal é ideal para ambientes com alta relação sinal-ruído. CDL-C também oferece um bom desempenho, mas com maior variabilidade. CDL-D, embora inicialmente desfavorecido, mostra uma melhoria significativa com o aumento de E_b/N_0 , indicando sua robustez potencial em certas condições. Por outro lado, CDL-E, com sua variabilidade, aponta para uma maior sensibilidade às condições específicas do canal, exigindo talvez uma consideração mais detalhada em seu uso.

A Figura 4.10 apresenta um gráfico de BER (Taxa de Erro de Bit) versus E_b/N_0 (relação sinal-ruído por bit) para diferentes modelos de canal CDL em um sistema MIMO 2x2 utilizando modulação 256QAM. O modelo CDL-A, representado por círculos azuis, mostra um desempenho relativamente consistente, mas com uma queda mais gradual do BER em função do E_b/N_0 . Mesmo em altos E_b/N_0 , o BER diminui lentamente, refletindo a maior complexidade e sensibilidade ao ruído da modulação 256QAM.

O modelo CDL-B, representado por quadrados laranja, apresenta uma queda mais acentuada no BER em comparação com CDL-A. Em altos E_b/N_0 , o BER atinge valores muito baixos ($\approx 10^{-6}$), indicando boa performance em condições de alta relação sinal-ruído. O modelo CDL-C, representado por triângulos verdes, tem um desempenho similar ao CDL-B em baixos E_b/N_0 , mas mostra uma queda abrupta no BER em altos E_b/N_0 . Contudo, há algumas flutuações menores na curva, indicando uma ligeira variabilidade nas condições de propagação.

O modelo CDL-D, representado por losangos vermelhos, exibe um desempenho

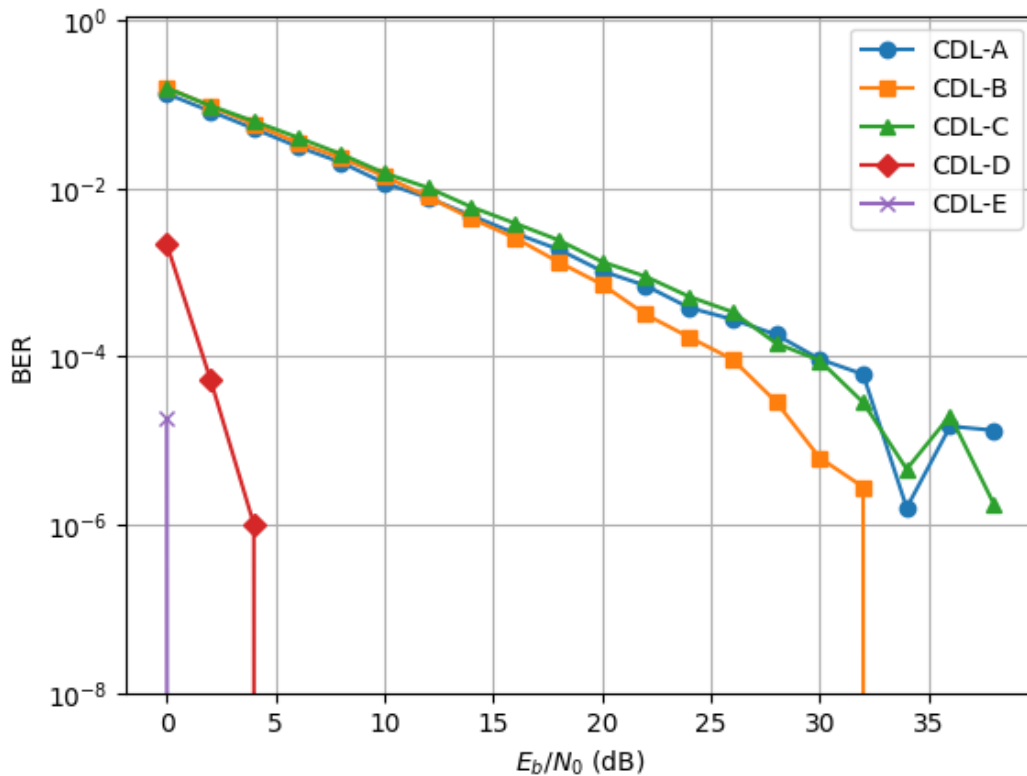


Figura 4.9: Curva de BER para 16-QAM em um canal CDL.

inicial inferior, com BER relativamente alto em baixos E_b/N_0 . No entanto, com o aumento de E_b/N_0 , há uma melhoria notável, com o BER caindo significativamente. O modelo CDL-E, representado por cruces roxas, mostra um comportamento variável. Em baixos E_b/N_0 , o BER é relativamente alto, mas melhora rapidamente com o aumento do E_b/N_0 , apresentando quedas abruptas e atingindo baixos valores de BER em níveis específicos de E_b/N_0 .

A modulação 256QAM, por sua alta densidade de constelação, oferece a maior eficiência espectral entre as modulações QAM, permitindo a transmissão de mais bits por símbolo. Contudo, essa vantagem vem com uma maior sensibilidade ao ruído e interferências, resultando em maiores taxas de BER em baixos E_b/N_0 . No gráfico, observa-se que todos os modelos de canal CDL começam com valores de BER relativamente altos, refletindo essa sensibilidade. À medida que E_b/N_0 aumenta, o BER diminui significativamente, especialmente para modelos como CDL-B e CDL-C, que mostram uma queda rápida do BER em altos E_b/N_0 .

O desempenho do modelo CDL-B em altos E_b/N_0 é notável, com o BER atingindo valores muito baixos, sugerindo que este modelo de canal é ideal para ambientes com alta relação sinal-ruído. CDL-C também oferece um bom desempenho, mas com maior variabilidade em altos E_b/N_0 . CDL-D, embora inicialmente desfavorecido, mostra uma melhoria significativa com o aumento de E_b/N_0 , destacando sua

robustez potencial em condições mais desafiadoras. Por outro lado, CDL-E, com sua variabilidade, pode apontar para uma maior sensibilidade às condições específicas do canal, exigindo talvez uma consideração mais detalhada em seu uso.

A análise do gráfico destaca a importância de selecionar o modelo de canal CDL adequado ao ambiente de comunicação. A modulação 256QAM, embora altamente eficiente em termos espectrais, requer uma relação sinal-ruído elevada para minimizar a taxa de erro de bit, especialmente em canais complexos. CDL-B e CDL-C se mostram eficazes em altos E_b/N_0 , enquanto CDL-D, apesar de sua desvantagem inicial, melhora significativamente com o aumento do sinal-ruído. CDL-E, devido à sua variabilidade, pode demandar uma análise mais cautelosa em aplicações específicas. Essa compreensão é essencial para otimizar sistemas de comunicação sem fio, garantindo um equilíbrio entre eficiência espectral e robustez ao ruído.

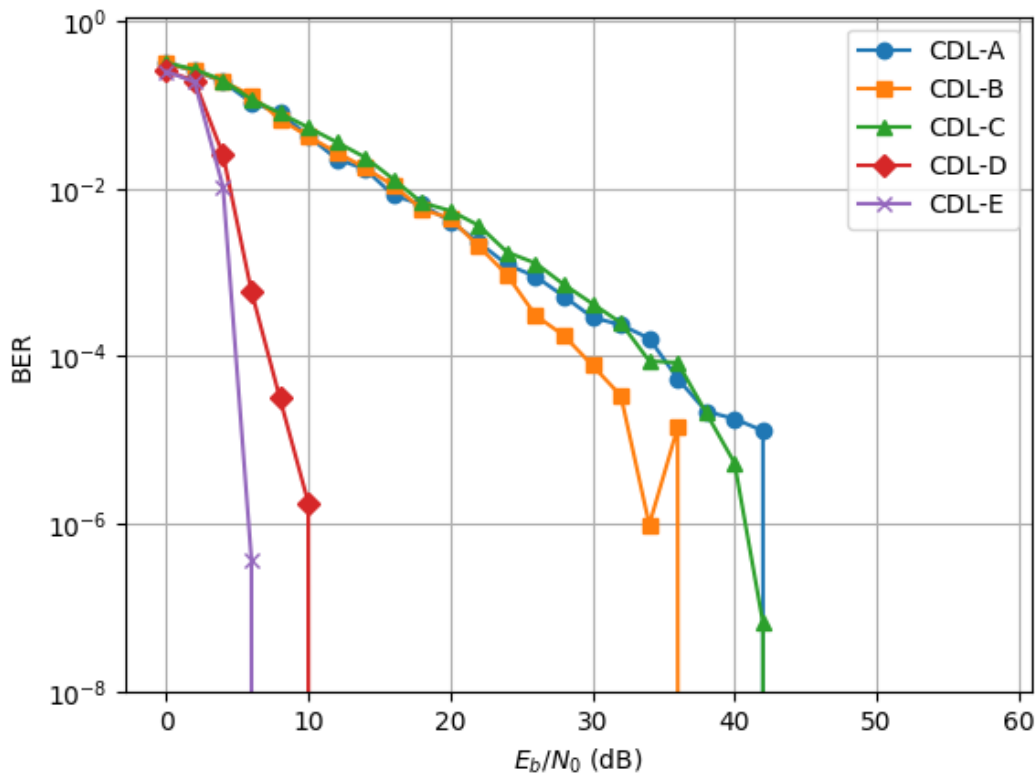


Figura 4.10: Curva de BER para 256-QAM em um canal CDL.

O desempenho dos diferentes modelos de canal CDL em sistemas MIMO 2x2 foi avaliado para três modulações distintas: 4QAM, 16QAM e 256QAM. As análises gráficas apresentaram a relação entre a BER e a relação sinal-ruído por bit (E_b/N_0), destacando as características de cada modelo em função das condições de canal.

Embora os resultados ofereçam uma visão geral do desempenho dos modelos de canal CDL, eles são inconclusivos, uma vez que a ferramenta de simulação utilizada não conseguiu testar a aplicação em todos os ambientes possíveis. Essa limitação

impede uma análise mais abrangente e definitiva sobre a robustez e eficiência de cada modelo em diversas condições de canal. Para uma avaliação mais completa, seria necessário atualizações na plataforma para que os resultados gerados possam obter uma conclusão mais definido.

Capítulo 5

Conclusão

O presente trabalho analisou a implementação da tecnologia MIMO 2x2 para melhorar a capacidade de transmissão da televisão digital no Brasil, considerando a escassez de espectro disponível nas grandes cidades. Foram detalhados modelos de canal, algoritmos de processamento de sinal e simulações utilizando a biblioteca Simonna da Nvidia, verificando o potencial desta tecnologia na otimização do uso do espectro.

Os resultados indicam que a utilização de sistemas MIMO aumenta a eficiência espectral e a capacidade de transmissão, permitindo a transmissão de conteúdos de alta qualidade mesmo em ambientes urbanos densos. As simulações realizadas mostraram que a tecnologia de pré-codificação e a exploração de bandas de frequência mais amplas são eficazes na otimização do uso do espectro. Também foi indicado que para simulações em canais CDL utilizando o MIMO 2x2 geram resultados inconclusivos por não gerar informações de desempenho em todos os ambientes possíveis e os valores não apresentarem um padrão conclusivo.

A implementação de sistemas MIMO na televisão digital brasileira pode trazer vantagens como a melhora da qualidade de serviço, cobertura expandida e uma experiência mais interativa para os usuários finais. Esses avanços estão em consonância com as tendências globais em transmissão digital e podem posicionar o Brasil na vanguarda das inovações tecnológicas em comunicação sem fio.

Para trabalhos futuros, recomenda-se investigar a aplicação de tecnologias MIMO em outros tipos de comunicação digital, como rádio digital e internet móvel, a fim

de avaliar a viabilidade e os benefícios em diferentes contextos. Também é sugerido explorar a combinação de MIMO com outras técnicas avançadas de modulação e codificação de canal para maximizar a eficiência espectral. Adicionalmente, desenvolver e testar algoritmos de aprendizado de máquina mais sofisticados para processamento de sinal em tempo real pode contribuir para melhorar a robustez e a qualidade da transmissão em condições adversas.

Conclui-se que a adoção de sistemas MIMO representa um avanço significativo na evolução da televisão digital no Brasil, oferecendo soluções viáveis para superar as limitações do espectro e atender à crescente demanda por serviços de alta qualidade.

Referências

- [1] M. S. Alencar, W. T. A. Lopes, and F. Madeiro, “History of television in brazil,” in *2010 Second Region 8 IEEE Conference on the History of Communications*, pp. 1–4, 2010. [Citado na página 1]
- [2] J. Omi, N. S. Santiago, G. H. M. G. De Oliveira, E. F. Filho, M. A. Santana, L. N. Dos Santos, W. H. S. De Souza, G. De Melo Valeira, P. B. Lopes, G. Stolfi, E. T. C. Dos Santos, L. G. P. Meloni, and C. Akamine, “Performance analysis of tv 3.0 over-the-air physical layer protocols,” in *2022 IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, pp. 1–5, 2022. [Citado nas páginas 2, 3 e 16]
- [3] F. SBTVD, “Background – terrestrial tv evolution in brazil,” 2022. https://forumsbtvd.org.br/tv3_0/#[Accessed: 28/03/2024]. [Citado nas páginas vii e 2]
- [4] P. E. R. . D. U. S. Soares, Thiago Aguiar; Cardoso, “Spectrum availability for the deployment of tv 3.0.,” in *SET INTERNATIONAL JOURNAL OF BROADCAST ENGINEERING*, pp. 21–32, 2022. [Citado na página 3]
- [5] L. H. Gonsioroski, A. B. D. Santos, N. C. Fernandes, P. V. G. Castellanos, L. J. Matos, D. S. V. Medeiros, D. M. F. Mattos, and L. A. R. d. S. Mello, “Advanced isdb-t—next generation digital tv system: Performance in field tests in brazil,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 69, no. 2, pp. 538–551, 2023. [Citado na página 3]
- [6] N. Corporation, “Sionna: A library for machine learning research in wireless communication.” <https://nvlabs.github.io/sionna/index.html>, 2024. Accessed: 2024-05-26. [Citado nas páginas 3 e 38]
- [7] J. Stolfi, “Apontamentos de processamento de informação visual,” 2016. Acessado em: 2 de setembro de 2024. [Citado na página 7]
- [8] P. Rio, “Padrões de tv digital.” Acessado em: 2 de setembro de 2024. [Citado nas páginas 8 e 9]
- [9] J. I. M. de Souza, “Sistemas de transmissão multiportadoras baseados na transformada wavelet discreta,” Master’s thesis, Universidade Federal do Amazonas, 2017. Acessado em: 2 de setembro de 2024. [Citado na página 9]

- [10] *Digital Terrestrial Television Broadcasting: Technology and System*. Jian Song, Zhixing Yang, Jun Wang, 2015. Acessado em: 2 de setembro de 2024. [Citado na página 9]
- [11] A. T. S. C. (ATSC), “Atsc 3.0 standards,” 2024. Acessado em: 2 de setembro de 2024. [Citado na página 10]
- [12] “Tv 3.0 project.” https://forumsbtvd.org.br/tv3_0/. Acessado em: 28 de junho de 2024. [Citado na página 12]
- [13] “Fórum do sbtvd.” <https://forumsbtvd.org.br/>. Acessado em: 28 de junho de 2024. [Citado na página 12]
- [14] F. SBTVD, “Projeto tv 3.0 - fase 2 - camada física over-the-air testes laboratoriais,” 2021. [Citado nas páginas 14 e 15]
- [15] F. SBTVD, “Projeto tv 3.0 - fase 3 - camada física over-the-air testes laboratoriais,” 2023. [Citado nas páginas 15 e 16]
- [16] L. H. Gonsioroski, A. B. D. Santos, N. C. Fernandes, P. V. G. Castellanos, L. J. Matos, D. S. V. Medeiros, D. M. F. Mattos, and L. A. R. d. S. Mello, “Advanced isdb-t—next generation digital tv system: Performance in field tests in brazil,” *IEEE Transactions on Broadcasting*, vol. 69, no. 2, pp. 538–551, 2023. [Citado na página 17]
- [17] A. B. Santos, L. H. Gonsioroski, R. Oliveira, L. da Silva Mello, A. Botelho, C. Akamine, N. C. Fernandes, and M. M. Silva, “Preliminary results of the indoor coverage field tests of the advanced isdb-t system in brazil,” in *2023 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, pp. 25–27, 2023. [Citado na página 18]
- [18] D. S. Edson T. Carneiro, D. S. Daniel H. M., M. B. Perotoni, C. J. Bordin, M. S. Vieira, S. Frank L. P., and C. Akamine, “Broadband diversity antenna array for uhf digital tv,” in *2022 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, pp. 217–218, 2022. [Citado na página 18]
- [19] B. Sklar and F. Harris, *Digital Communications: Fundamentals and Applications*. Pearson; 3ª edição, 27 janeiro 2021. [Citado nas páginas 22 e 24]
- [20] H. K. Channi, “A comparative study of various digital modulation techniques,” *International Journal in IT and Engineering*, vol. 4, no. 03, 2016. [Citado na página 23]
- [21] D. Bala, G. M. Waliullah, M. A. Hena, M. I. Abdullah, and M. A. Hossain, “Study the performance of capacity for siso, simo, miso and mimo in wireless

- communication,” *Journal of Network and Information Security*, vol. 8, pp. 01–06, August 2020. [Citado nas páginas vii, 25, 26, 28 e 29]
- [22] A. S. P. J. v. R. Lars T. Berger, Pascal Pagani, *MIMO Power Line Communications*. CRC Press, 2014. [Citado na página 30]
- [23] K. Kaboutari and V. Hosseini, “A compact 4-element printed planar mimo antenna system with isolation enhancement for ism band operation,” *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 134, p. 153687, 2021. [Citado na página 30]
- [24] D. Zheng, H. Zhang, and J. Song, “Spatial multiplexing mimo visible light communications with densely distributed leds and pds,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 12, no. 5, pp. 1–7, 2020. [Citado na página 30]
- [25] A. A. Kalachikov and N. S. Shelkunov, “Performance evaluation of the detection algorithms for mimo spatial multiplexing based on analytical wireless mimo channel models,” in *2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, pp. 180–183, 2018. [Citado na página 30]
- [26] R. Zerrougui, A. B. H. Adamou-Mitiche, and L. Mitiche, “Projection approach for interval systems approximation: An extension to mimo systems,” *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol. 69, no. 2, pp. 499–503, 2022. [Citado nas páginas 31 e 33]
- [27] V.-F. Crâșmariu, M.-O. Arvinte, A.-A. Enescu, and S. Ciochină, “Performance analysis of the singular value decomposition with block-diagonalization precoding in multi-user massive mimo systems,” in *2016 12th IEEE International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC)*, pp. 71–74, 2016. [Citado na página 31]
- [28] M. Schlamann, L. Haering, and A. Czylik, “Lattice filter-based frequency-domain equalizer with multiple frequency offset compensation for mimo sdma ofdm systems,” in *OFDM 2014; 18th International OFDM Workshop 2014 (InOWo’14)*, pp. 1–6, 2014. [Citado na página 31]
- [29] R. Raghu, M. Panju, and V. Sharma, “Queueing theoretic models for multiuser miso content-centric networks with sdma, noma, oma and rate-splitting downlink,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, pp. 1–1, 2023. [Citado na página 31]
- [30] W.-J. Liao, C.-H. Chuang, and B.-Y. Dai, “Field test results and analysis of a semi-automatic effective diversity gain measurement system for mimo and

- diversity antennas,” in *2016 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP)*, pp. 146–147, 2016. [Citado na página 31]
- [31] A. M. Abdelraheem, A. Elsaieed, M. A. Abdalla, and A. Mahran, “Hybrid diversity for ecc enhancement of uwb mimo antenna,” in *2016 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI)*, pp. 1765–1766, 2016. [Citado na página 32]
- [32] I. Ahamed and M. Vijay, “Comparison of different diversity techniques in mimo antennas,” in *2017 2nd International Conference on Communication and Electronics Systems (ICCES)*, pp. 47–50, 2017. [Citado na página 32]
- [33] M. Hefnawi and E. Yahya, “Capacity-aware hybrid beamforming for multi-user massive mimo,” in *2018 6th International Conference on Multimedia Computing and Systems (ICMCS)*, pp. 1–3, 2018. [Citado nas páginas 33 e 34]
- [34] Q. Zhang, J. Yu, X. Zhao, W. Li, M. Zhu, J. Zhang, Y. Wei, K. Wang, W. Zhou, B. Liu, F. Zhao, and J. Yu, “ 2×2 mimo w-band millimeter wireless signal delivery employing cma and mrc technology,” *Journal of Lightwave Technology*, pp. 1–8, 2024. [Citado nas páginas 33 e 35]
- [35] N. Wang, Q. Wang, N. Li, C. Zhu, and W. Zhou, “Dynamic power allocation method based on zf precoding for multibeam geo-leo co-existence system,” in *2022 IEEE 8th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, pp. 557–562, 2022. [Citado na página 33]
- [36] M. Rybakowski, K. Bechta, C. Grangeat, and P. Kabacik, “Impact of beamforming algorithms on the actual rf emf exposure from massive mimo base stations,” *IEEE Access*, vol. 11, pp. 141956–141964, 2023. [Citado na página 33]
- [37] H. MANAI, L. BEN HADJ SLAMA, and R. BOUALLEGUE, “Interference management by adaptive beamforming algorithm in massive mimo networks,” in *2019 15th International Wireless Communications Mobile Computing Conference (IWCMC)*, pp. 49–54, 2019. [Citado nas páginas 34 e 35]
- [38] C.-M. Chen, C.-H. Lin, and P.-Y. Tsai, “Multi-mode sorted qr decomposition for 4×4 and 8×8 single-user/multi-user mimo precoding,” in *2015 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, pp. 2980–2983, 2015. [Citado na página 34]
- [39] Y. Wang and D. Piao, “Cross-polarization discrimination of a colocated quad-polarized mimo antenna in a room,” in *2020 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, pp. 872–874, 2020. [Citado na página 34]

- [40] Sharif and S. P. Majumder, “Analytical evaluation of ber of the effect of cross-polarization in a polarization diversity mimo satellite to ground link,” in *2015 IEEE International Conference on Telecommunications and Photonics (ICTP)*, pp. 1–5, 2015. [Citado na página 34]
- [41] S. Yamada, D. Choudhury, C. Thakkar, A. Chakrabarti, K. Dasgupta, S. Daneshgar, and B. D. Horine, “Cross-polarization discrimination and port-to-port isolation enhancement of dual-polarized antenna structures enabling polarization mimo,” *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 18, no. 11, pp. 2409–2413, 2019. [Citado na página 35]
- [42] J. Yin, G. Zhu, X. Han, L. Guo, L. Li, and W. Ge, “Temporal correlation and message-passing-based sparse bayesian learning channel estimation for underwater acoustic communications,” *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, pp. 1–20, 2024. [Citado na página 35]
- [43] J. Jin and A. Wang, “Multiple-objective power control algorithm based on successive interference cancellation algorithm,” in *2020 IEEE 11th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, pp. 278–283, 2020. [Citado na página 35]
- [44] Y. Parshin, A. Parshin, and M. Grachev, “Influence of signal and interference spatial correlation on the mimo communication system’s channel capacity,” in *2022 24th International Conference on Digital Signal Processing and its Applications (DSPA)*, pp. 1–5, 2022. [Citado na página 36]
- [45] V. Fedosov, R. Ibadov, and S. Ibadov, “Investigation of the influence of spatial correlation on the performance of the mimo system when using the adaptation algorithm,” in *2023 Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)*, pp. 252–255, 2023. [Citado na página 36]
- [46] P. Tennakoon and C. B. Wavegedara, “A 3d geometry-based spatial correlation model for mimo channels,” in *2019 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon)*, pp. 222–227, 2019. [Citado na página 36]
- [47] I. Kanno, M. Ito, T. Ohseki, K. Yamazaki, Y. Kishi, T. Choi, W.-Y. Chen, and A. F. Molisch, “Fronthaul load-reduced scalable cell-free massive mimo by uplink hybrid signal processing,” in *2022 IEEE 95th Vehicular Technology Conference: (VTC2022-Spring)*, pp. 1–5, 2022. [Citado na página 37]
- [48] N. Samuel, T. Diskin, and A. Wiesel, “Learning to detect,” *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 67, no. 10, pp. 2554–2564, 2019. [Citado na página 37]
- [49] P. Seidel, S. Paul, and J. Rust, “Low-complexity 2-coordinates descent for near-optimal mmse soft-output massive mimo uplink data detection,” in *2019 27th*

- European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, pp. 1–5, 2019. [Citado na página 37]
- [50] K. Yang, X. Tan, Q. Qian, Z. Zhang, X. You, and C. Zhang, “An improved newton-schulz iterative algorithm for massive mimo detection,” in *2023 International Conference on Wireless Communications and Signal Processing (WCSP)*, pp. 984–989, 2023. [Citado na página 37]
- [51] M. A. Mobin, M. Islam, and M. S. Rahman, “Performance analysis of gmsk and chirp-binary orthogonal keying in awgn and multipath fading channels,” in *2020 11th International Conference on Electrical and Computer Engineering (ICECE)*, pp. 443–446, 2020. [Citado na página 37]
- [52] N. Belwal, G. S. Jethi, P. K. Juneja, and V. Joshi, “Investigating the impact of doppler shift performance of multipath rayleigh fading channel,” in *2020 IEEE 5th International Conference on Computing Communication and Automation (ICCCA)*, pp. 473–476, 2020. [Citado na página 37]
- [53] E. Björnson, L. Sanguinetti, H. Wymeersch, J. Hoydis, and T. L. Marzetta, “Massive mimo is a reality—what is next?: Five promising research directions for antenna arrays,” *Digital Signal Processing*, vol. 94, pp. 3–20, 2019. Special Issue on Source Localization in Massive MIMO. [Citado na página 39]
- [54] A. Goldsmith, *Wireless Communications*. Cambridge University Press, 2023. [Citado nas páginas 41 e 42]
- [55] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press, 2020. [Citado nas páginas 41 e 42]
- [56] A. F. Molisch, *Wireless Communications*. John Wiley & Sons, 2019. [Citado na página 42]
- [57] T. S. Rappaport, R. W. Heath, R. C. Daniels, and J. N. Murdock, *Millimeter Wave Wireless Communications*. Prentice Hall, 2019. [Citado nas páginas 42 e 43]
- [58] R. W. H. Jr and A. Lozano, *Foundations of MIMO Communication*. Cambridge University Press, 2021. [Citado nas páginas 42 e 43]
- [59] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall, 2nd ed., 2001. [Citado na página 43]
- [60] A. F. Molisch, *Wireless Communications*. Wiley-IEEE Press, 2nd ed., 2011. [Citado na página 43]
- [61] “Study on channel model for frequencies from 0.5 to 100 ghz,” Tech. Rep. TR 38.901, 3GPP, 2020. [Online]. Available: <https://www.3gpp.org/DynaReport/38901.htm>. [Citado na página 44]