

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

MARIA LUIZA FERNANDES DE CARVALHO

**CAPACIDADE DE DIVERSIDADE DE SISTEMAS SISO VS. MIMO:
IMPACTO NO DESEMPENHO EM CENÁRIOS URBANOS**

**CAMPO MOURÃO
2024**

MARIA LUIZA FERNANDES DE CARVALHO

**CAPACIDADE DE DIVERSIDADE DE SISTEMAS SISO VS. MIMO:
IMPACTO NO DESEMPENHO EM CENÁRIOS URBANOS**

**Diversity Capacity of SISO vs. MIMO Systems: impact on
performance in urban scenarios**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Eletrônica do
Curso de Bacharelado em Engenharia Eletrônica
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Osmar Tormena Júnior, Prof. Dr.

CAMPO MOURÃO

2024



4.0 Internacional

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, cuja graça e força me sustentaram nessa jornada. Aos meus pais, que compartilharam comigo este sonho e foram minha base em todos os momentos, e à minha família e amigos, que fizeram desses anos um capítulo inesquecível da minha vida. . .

Resumo

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo comparar sistemas SISO e MIMO em termos de diversidade espacial e desempenho em ambientes urbanos. Este estudo é relevante para a literatura existente sobre comunicações sem fio, pois oferecerá uma análise comparativa que poderá servir como base para futuras pesquisas e inovações na área. Nos sistemas SISO, a diversidade espacial é limitada a uma única antena de transmissão e recepção. Em contrapartida, o MIMO utiliza múltiplas antenas para explorar diversos caminhos de propagação. Para realizar esta análise, serão feitas simulações para avaliar o desempenho de ambos os sistemas, considerando métricas como BER e resiliência a desvanecimentos em diferentes níveis de interferência. Com base nos resultados obtidos, espera-se demonstrar a superioridade de um dos sistemas em termos de eficiência e confiabilidade. Esta análise é crucial para atender às crescentes demandas da sociedade atual, permitindo o desenvolvimento de redes de comunicação sem fio ainda mais rápidas e confiáveis, fundamentais para a implementação de tecnologias emergentes, como 5G, cidades inteligentes e IoT.

Palavras-chave: Diversidade; Cenários Urbanos; *Multiple Input Multiple Output*; *Single Input Single Output*.

Abstract

This work aims to compare SISO and MIMO systems in terms of spatial diversity and performance in urban environments. This study is relevant to the existing wireless communications literature as it provides a comparative analysis that can serve as a foundation for future research and innovations in the field. In SISO systems, spatial diversity is limited to a single transmission and reception antenna. In contrast, MIMO systems employ multiple antennas to leverage various propagation paths. The analysis will be conducted through simulations to evaluate the performance of both systems, considering metrics such as BER and resilience to fading under different levels of interference. Based on the results, this work aims to demonstrate the superiority of one system in terms of efficiency and reliability. This analysis is crucial to addressing the increasing demands of modern society, enabling the development of faster and more reliable wireless communication networks, which are essential for the implementation of emerging technologies such as 5G, smart cities, and IoT.

Keywords: Diversity; Urban Scenarios; Multiple Input Multiple Output; Single Input Single Output.

Sumário

| | | |
|------------|--|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO | 6 |
| 1.1 | Objetivos | 7 |
| 1.1.1 | Objetivos Gerais | 7 |
| 1.1.2 | Objetivos Específicos | 7 |
| 1.2 | Justificativa | 8 |
| 2 | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA | 9 |
| 2.1 | Cenários Urbanos | 9 |
| 2.1.1 | Características específicas de cenários urbanos | 9 |
| 2.2 | Teoria dos Sistemas SISO E MIMO | 10 |
| 2.2.1 | Definição de Sitemas SISO | 10 |
| 2.2.2 | Definição de Sitemas MIMO | 11 |
| 2.3 | Aplicação do Modelo de Rayleigh em Cenários Urbanos . . | 14 |
| 2.4 | Modulação em Quadratura e Amplitude | 14 |
| 3 | METODOLOGIA | 17 |
| 4 | RESULTADOS ESPERADOS | 20 |
| 5 | CRONOGRAMA | 22 |
| | REFERÊNCIAS | 23 |

1 Introdução

A história acerca da comunicação sem fio tem cerca de 160 anos, é possível observar avanços nas tecnologias nesse curto período, tendo marcos como a Teoria Eletromagnética da Luz de James Maxweel em 1864, em 1887 a demonstração da propagação de ondas eletromagnéticas de Heinrich Hertz. A invenção do telégrafo sem fio de Guglielmo Marconi em 1901, em 1906 a transmissão de música e voz por Reginald Fessenden por meio da técnica de modulação em amplitude, já em 1934 os departamentos de polícia nos Estados Unidos já utilizavam sistemas de rádio com portadora de 2 MHz para a comunicação *wireless* e no ano de 1946 houve o surgimento de sistemas de telefonia móvel. Sendo assim, é notório perceber que a comunicação sem fio é uma tecnologia que continua a se desenvolver mais a cada ano (1).

Desde os anos 90, a sociedade tem demonstrado uma crescente necessidade de alta qualidade, cobertura e robustez nos sistemas de comunicação, independentemente do ambiente, seja em áreas urbanas, rurais, dentro de casa ou ao ar livre. O avanço das tecnologias de comunicação sem fio tem sido impulsionado por essa demanda, visando fornecer conexões rápidas e confiáveis para suportar a crescente utilização de dispositivos móveis e a expansão de serviços como a internet móvel, comunicação em tempo real e redes de dados. No entanto, a comunicação sem fio em ambientes urbanos apresenta desafios significativos devido à complexidade do ambiente. As áreas urbanas são caracterizadas por uma alta densidade de obstáculos e interferências, que podem causar múltiplos caminhos de propagação de sinal, como reflexões e difrações, resultando em desvanecimento multipercurso. Isso pode levar à diminuição da qualidade do sinal, aumento da taxa de erro e maior dificuldade em ter uma conexão estável (2).

Nos sistemas de comunicação sem fio atuais, é essencial considerar cuidadosamente a camada física, de enlace e de rede, pois cada uma desempenha um papel fundamental para garantir a eficiência e a robustez da transmissão de dados. Na camada física, é preciso lidar com fatores como a modulação, codificação de sinal e a gestão de interferências. Já na camada de enlace, o foco é na correção de erros, assegurando que os dispositivos compartilhem o canal de comunicação de forma ordenada e eficiente. A camada de rede, por sua vez, coordena o roteamento e o direcionamento dos pacotes de dados, lidando com a mobilidade dos dispositivos e garantindo uma conexão contínua, mesmo em cenários de alta mobilidade, como em redes de 5G. A integração harmoniosa dessas camadas é crucial para proporcionar uma experiência de comunicação confiável e de alta qualidade (1).

O sistema Entrada única e saída única (SISO - *Single Input Single Output*) é um modelo de comunicação sem fio que utiliza uma única antena tanto para transmissão quanto para recepção de sinais. Ele opera na camada física do modelo de comunicação, sendo uma das formas mais simples de estabelecer uma comunicação sem fio. O Múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO - *Multiple Input Multiple Output*) também opera na

camada física, ao contrário do SISO, utiliza-se múltiplas antenas para transmitir e receber sinais. A evolução de sistemas de comunicação sem fio de SISO e MIMO é impulsionada pela necessidade de lidar com as limitações impostas pelos desvanecimentos de sinal em cenários urbanos, modelados pelos canais Rayleigh e Rice, que são os mais utilizados. O canal Rayleigh é adequado para situações em que não há linha de visão direta entre o transmissor e o receptor, como em áreas urbanas densas, como cidades e metrópoles, onde os sinais se propagam por múltiplos caminhos de reflexão. Já o canal Rice é utilizado em cenários onde existe uma linha de visão direta entre os dispositivos de comunicação, como em ambientes mais abertos, mas ainda com múltiplos reflexos que afetam a propagação do sinal. Nesse caso, o modelo de desvanecimento Rice considera a presença dessa linha de visão direta. Ambos os modelos são cruciais para entender como os sinais se comportam em diferentes cenários de propagação e como a diversidade espacial pode ser explorada para melhorar a qualidade da comunicação sem fio (3).

O estudo sobre a capacidade de diversidade de sistemas SISO e MIMO e seu impacto no desempenho em cenários urbanos é de grande importância para compreender e otimizar as comunicações sem fio em ambientes densos, onde fatores como desvanecimento e interferências são prevalentes. Ao investigar como cada sistema se comporta em condições de propagação complexas, descritas pelos modelos de desvanecimento Rayleigh e Rice, torna-se possível identificar as vantagens da diversidade espacial dos sistemas em superar desafios em cenários urbanos, como obstáculos físicos e reflexões. Esse tema é crucial para o desenvolvimento de redes mais eficientes e resilientes, especialmente em tecnologias de comunicação de próxima geração, como Wi-Fi, 5G e 6G, que buscam atender à crescente demanda por conectividade de alta velocidade e confiabilidade em áreas urbanas (3).

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos Gerais

Realizar uma análise comparativa entre sistemas de comunicação sem fio SISO e MIMO em cenários urbanos, avaliando métricas como eficiência espectral, Taxa de erro de bit (BER - *Bit Error Rate*), capacidade de canal e Relação sinal-ruído (SNR - *Signal-to-Noise Ratio*) em função da densidade de obstáculos e condições de propagação, utilizando o modelo de canal Rayleigh e simulações no software MATLAB.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Desenvolver um modelo de simulação no MATLAB utilizando o canal Rayleigh com 6 *taps*, adequado para representar cenários urbanos caracterizados por múltiplos caminhos de propagação;

Está muito bem delimitado. É possível enxergar o começo meio e fim

- Configurar e avaliar o desempenho de diferentes arquiteturas de antenas, incluindo: sistema SISO com configuração 1×1 e sistemas MIMO com configurações 2×2 e 4×4 ;
- Implementar a modulação 256-QAM e simular a transmissão de dados em condições ideais de equalização perfeita, para isolar os efeitos de desvanecimento;
- Analisar o impacto da densidade de obstáculos urbanos;
- Apresentar os resultados de forma comparativa, destacando as vantagens e limitações dos sistemas SISO e MIMO em cenários urbanos.

1.2 Justificativa

A análise do comportamento de tecnologias como MIMO e SISO em cenários urbanos é crucial devido aos desafios impostos pela alta densidade populacional, presença de obstáculos físicos e os efeitos do multipercurso, que afetam a qualidade da transmissão e recepção de dados. A comparação entre esses sistemas destaca as vantagens de diversidade e desempenho que cada um oferece, proporcionando uma base sólida para pesquisas acadêmicas e o desenvolvimento de soluções tecnológicas. Além disso, esses estudos têm implicações sociais e econômicas significativas, contribuindo para a melhoria da eficiência de tecnologias emergentes, como o 5G e o futuro 6G.

2 Fundamentação teórica

2.1 Cenários Urbanos


Os cenários urbanos são ambientes complexos e densamente povoados, caracterizados por uma alta concentração de edifícios, veículos e pessoas. Esses ambientes apresentam desafios únicos para a comunicação sem fio devido à presença de obstáculos físicos que podem causar interferências e atenuação do sinal. A análise do desempenho de sistemas SISO e MIMO em cenários urbanos é crucial para entender como esses sistemas podem ser otimizados para melhorar a qualidade e a confiabilidade da comunicação (4).

2.1.1 Características específicas de cenários urbanos

Quando se fala sobre a comunicação sem fio, a densidade de obstáculos verticais como prédios e edifícios em áreas urbanas cria um ambiente de propagação de sinal extremamente difícil. Quando um sinal é transmitido, ele pode encontrar vários obstáculos, que causam reflexões e difrações. Esses fenômenos resultam em múltiplos caminhos de propagação, onde o sinal original se divide em vários componentes que chegam ao receptor em diferentes momentos e ângulos. Esse efeito é conhecido como desvanecimento multipercurso (5).

O desvanecimento multipercurso pode causar interferência construtiva ou destrutiva. Na interferência construtiva, os múltiplos sinais se combinam de maneira que reforçam o sinal recebido, melhorando a qualidade da comunicação. Já na interferência destrutiva, os sinais se cancelam mutuamente, resultando em uma degradação significativa da qualidade do sinal. Esse fenômeno é particularmente problemático em sistemas SISO, onde há apenas uma antena de transmissão e uma de recepção, limitando a capacidade de mitigação dos efeitos do desvanecimento (4).

Além disso, a presença de muitos edifícios pode causar bloqueios do sinal, onde o sinal de rádio não consegue atravessar obstáculos sólidos, resultando em áreas de sombra ou zonas mortas. Isso é especialmente crítico em ambientes urbanos densos, onde a linha de visão direta entre o transmissor e o receptor é frequentemente obstruída. Para mitigar esses desafios, os sistemas MIMO são frequentemente utilizados em cenários urbanos. Os sistemas MIMO empregam múltiplas antenas tanto no transmissor quanto no receptor, permitindo a exploração dos múltiplos caminhos de propagação de maneira mais eficiente. Isso não só melhora a robustez contra o desvanecimento multipercurso, mas também aumenta a capacidade do sistema, permitindo taxas de dados mais altas e uma melhor qualidade de serviço (6).



usar o formato numérico
talvez gere dúvidas
para a banca.
Geralmente os
professores estão
acostumados ao
modelo (sobrenome,
ano)

2.2 Teoria dos Sistemas SISO E MIMO

2.2.1 Definição de Sitemas SISO

O sistema SISO é o arranjo mais simples entre os sistemas de comunicação, comparado aos outros três tipos mais conhecidos: Entrada única e múltiplas saídas (SIMO - *Single Input Multiple Output*) , Múltiplas entradas e saída única (MISO - *Multiple Input Single Output*) e MIMO. Nesse sistema, há apenas uma antena transmissora e uma antena receptora. Devido à sua simplicidade, os sistemas SISO são de fácil implementação e mais baratos, pois a complexidade do hardware é menor, já que há apenas uma antena transmissora e uma receptora. Isso resulta em um sistema com baixa diversidade, comparado aos outros três tipos (6).

Além disso, como não é necessário realizar o processamento mais complexo do sinal recebido, como a combinação e separação, o processamento dos sistemas SISO é mais simples. Mesmo não utilizando diversidade espacial complexa, os sistemas SISO ainda são amplamente utilizados em tecnologias como Wi-Fi, radiodifusão e televisões, devido ao seu custo reduzido e à facilidade de implementação, na Figura 1 é possível observar a arquitetura de um sistema SISO e sua simplicidade (7).

Figura 1 — Esquemático Genérico de um sistema SISO.



Fonte — Adaptado de (6).

Quando se fala sobre a SNR, estamos nos referindo a uma forma de medir a qualidade do sinal em relação ao ruído do canal. A Equação (1) representa a razão entre a potência do sinal S e a potência do ruído R , com o resultado normalmente sendo expresso em decibéis (dB). Com base na Equação (1), é possível observar que quanto maior a SNR, maior é o sinal em comparação com o ruído, aumentando assim a Qualidade de serviço (QoS - *Quality of Service*) (2).

$$\text{SNR (dB)} = 10 \log_{10} \left(\frac{S}{R} \right) \quad (1)$$

Já a BER é uma métrica importante para avaliar o desempenho de um sistema de comunicação. Em resumo, a BER é a taxa de bits errados recebidos em comparação com

os bits transmitidos. Sua equação na forma mais genérica para sistemas de comunicação digital pode ser expressa na Equação (2) (2).

$$\text{BER} = \frac{1}{2} \left(1 - \sqrt{\frac{\text{SNR}}{1 + \text{SNR}}} \right) \quad (2)$$

A fórmula matemática para a capacidade do sistema é dada pelo teorema da capacidade de Shannon, expressa na Equação (3) que representa e define a capacidade máxima de um canal de comunicação sem erros. onde C é a capacidade do canal em bits/s, B é a largura de banda do canal em Hz e S/R é a SNR. A Equação (3) mostra que a capacidade do canal aumenta em proporção com o aumento da largura de banda e da SNR (8).

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{R} \right) \text{ bits/s} \quad (3)$$

Em cenários urbanos, onde existem edifícios e outras barreiras verticais, os efeitos de multipercurso emergem. Quando uma onda eletromagnética interage com essas barreiras, ela se dispersa e segue diferentes caminhos até chegar ao receptor. Esse fenômeno pode causar diversos problemas, como perdas e atenuações no sinal. Além disso, o multipercurso pode resultar em desvanecimento, onde as múltiplas versões do sinal chegam ao receptor em momentos ligeiramente diferentes, causando interferência construtiva ou destrutiva. Isso pode levar a uma redução na velocidade de dados, aumento na taxa de erros e perda de pacotes (4).

Embora os sistemas SISO possam enfrentar limitações em termos de capacidade e robustez em ambientes desafiadores, eles continuam a ser uma escolha popular devido às suas vantagens em termos de custo, eficiência energética e simplicidade. Dependendo dos requisitos do projeto, os sistemas SISO podem ser a solução ideal para muitas aplicações de comunicação sem fio (8).

2.2.2 Definição de Sitemas MIMO

A necessidade de atender às crescentes demandas por transmissões de informações rápidas e confiáveis, que emergiram da sociedade ao longo dos últimos séculos e permanecem até os dias atuais, impulsionou o desenvolvimento de tecnologias como 4G, 5G e 6G. Essas inovações destacam a importância de pesquisas sobre técnicas avançadas de transmissão, com foco na QoS, que é um dos pontos cruciais para a avaliação de sistemas de comunicação (5).

Quando se trata de projetar e pesquisar sistemas que operem dentro de faixas de frequência pré-estabelecidas por agências reguladoras, como a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) no Brasil, o desenvolvimento de futuros sistemas de comunicação torna-se mais desafiador. Isso ocorre devido às restrições impostas, que limitam e tornam escassas as possibilidades de implementação em determinadas faixas de frequência. Além

disso, cenários urbanos apresentam, por natureza, alta densidade de obstáculos físicos, dificultando a propagação do sinal e prejudicando a transmissão de informações (9).

Diante dessas limitações, sistemas como o MIMO se destacam. Utilizando arranjos de múltiplas antenas de transmissão e recepção, o MIMO aumenta significativamente a capacidade do canal de comunicação. Dessa forma, com base nas características e demandas específicas de cada projeto, é possível projetar arranjos de antenas otimizados para atender às necessidades, mesmo em ambientes urbanos desafiadores (5).

Além disso, sabe-se que os sistemas MIMO possuem como característica a diversidade espacial, um atributo crucial para determinar o desempenho dos sistemas em ambientes de alta densidade. Essa diversidade permite explorar os múltiplos caminhos de propagação de maneira eficiente, contribuindo para uma transmissão mais confiável e de maior qualidade.

O desvanecimento por multipercurso ocorre quando um sinal se propaga por múltiplos caminhos antes de chegar ao receptor. Em cenários urbanos, reflexões e difrações em obstáculos verticais resultam na soma de várias cópias do sinal original, causando variações na intensidade do sinal. Como consequência, o sinal recebido pode apresentar diferenças significativas em relação ao sinal transmitido (10).

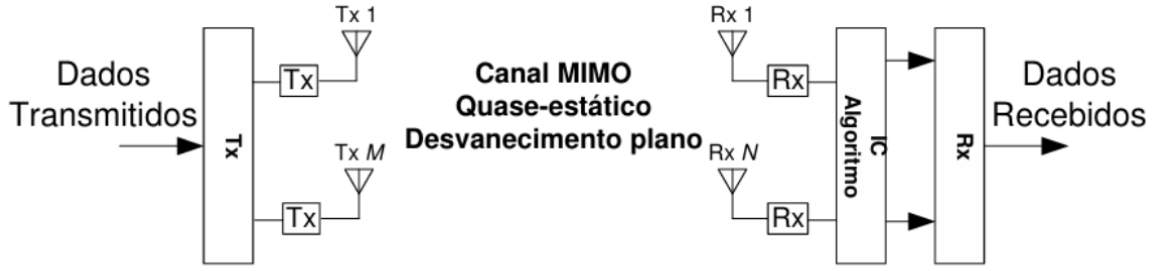
De acordo com (11), em 1901, Guglielmo Marconi realizou a primeira transmissão de um sinal de Roma até o continente americano utilizando um arranjo de múltiplas antenas. Essa abordagem permanece relevante até os dias atuais como uma solução para desafios relacionados à capacidade de transmissão e confiabilidade em sistemas de comunicação modernos, como o 5G. O uso de múltiplas antenas tanto no transmissor quanto no receptor forma um sistema linear de múltiplas entradas e múltiplas saídas, gerando uma matriz de canal que relaciona os sinais de entrada com os sinais de saída (4). Segundo (5), um exemplo prático da vantagem proporcionada pela diversidade desses sistemas é que, ao utilizar duas antenas de transmissão e duas antenas de recepção, é possível dobrar aproximadamente a quantidade de informações transmitidas e recebidas, sem a necessidade de aumentar o tempo, a largura de banda ou a potência do sinal.

Na Figura 2, é apresentado um esquema genérico de arranjo de antenas em sistemas MIMO. Essa representação ilustra que, a partir de diferentes configurações de antenas, é possível alcançar múltiplas possibilidades de transmissão confiável. Esse número de possibilidades é o que se denomina diversidade espacial, considerada um dos métodos mais eficientes para mitigar os efeitos do desvanecimento por multipercurso.

A relação entre o sinal de saída $\mathbf{y}[k]$ e o sinal de entrada $\mathbf{x}[k]$ em um canal MIMO de banda larga com multipercursos pode ser descrita por uma resposta com L taps. Esse sistema conecta M antenas transmissoras e N antenas receptoras. A equação que descreve essa relação no instante k é dada por:

$$\mathbf{y}[k] = \sum_{l=0}^{L-1} \mathbf{H}_l \mathbf{x}[k-l] + \mathbf{n}[k], \quad (4)$$

Figura 2 — Esquemático Genérico de um sistema MIMO.



Fonte — (12).

onde $\mathbf{y}[k]$ é o vetor de saída no instante k , com dimensão $N \times 1$; $\mathbf{x}[k]$ é o vetor de entrada no instante k , com dimensão $M \times 1$; \mathbf{H}_l é a matriz de ganho do canal correspondente ao l -ésimo *tap*, com dimensão $N \times M$; L é o número de *taps* do canal; e $\mathbf{n}[k]$ é o vetor de ruído aditivo no instante k , com dimensão $N \times 1$. Essa equação captura os efeitos de multipercursos e ruído no sistema, com \mathbf{H}_l representando as contribuições de cada percurso para a comunicação MIMO (9).

Já quando se trata de um canal MIMO em faixa estreita, a relação entre o sinal de saída \mathbf{y} e o sinal de entrada \mathbf{x} é expressa por uma equação mais simplificada, dada por:

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ y_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & \cdots & h_{1,M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N,1} & \cdots & h_{N,M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_N \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde \mathbf{y} é o vetor de saída com dimensão $N \times 1$; \mathbf{x} é o vetor de entrada com dimensão $M \times 1$; \mathbf{H} é a matriz do canal com dimensão $N \times M$; e \mathbf{n} é o vetor de ruído aditivo com dimensão $N \times 1$. Nesse caso, o modelo de faixa estreita não considera os efeitos de multipercursos com diferentes atrasos temporais, sendo mais adequado para canais onde todos os percursos chegam com atraso insignificante (3).

Válido (9) afirma que outro ponto importante é que, em sistemas MIMO, é possível mensurar de forma matemática a diversidade dos arranjos de múltiplas antenas, além de ser possível aumentar o desempenho e a ordem de diversidade com base nos tipos de técnicas de codificação utilizadas. A ordem de diversidade de um sistema de comunicação pode ser definida pela forma como a BER diminui à medida que o sinal se torna mais forte, ou seja, com o aumento da razão SNR. A ordem de diversidade D é uma medida da eficiência do sistema em reduzir a taxa de erro de bit à medida que o SNR aumenta. Em termos mais simples, ela indica o quão bem o sistema consegue combater os efeitos de interferência e ruído conforme a qualidade do sinal melhora. A equação que descreve

a ordem de diversidade é dada pela Equação (7) onde D é a ordem de diversidade e γ representa a razão sinal-ruído.

$$D = - \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \frac{\log_{10}(\gamma)}{\log_{10}(\text{BER}(\gamma))} \quad (7)$$

2.3 Aplicação do Modelo de Rayleigh em Cenários Urbanos

O modelo de sistemas MIMO tem sido amplamente reconhecido por revolucionar a comunicação sem fio, uma vez que explora múltiplos caminhos de propagação entre os arranjos de antenas transmissoras e receptoras, aproveitando a diversidade espacial. Nos ambientes urbanos, contudo, o fenômeno de multipercurso pode limitar o desempenho desses sistemas, provocando desvanecimento ou interferência de símbolos, dependendo se a faixa de banda é estreita ou larga. Portanto, é fundamental compreender como os sinais se propagam em diferentes direções e cenários, uma vez que isso influencia diretamente o desempenho da comunicação. Ao aproveitar a diversidade das várias trajetórias que os sinais percorrem, a análise dessa distribuição é essencial para melhorar o projeto do sistema e solucionar esses desafios (5).

Conforme apontado por (9), os modelos de canais visam estabelecer uma relação entre o sinal a ser transmitido, o ambiente de propagação e a forma como o sinal chegará ao receptor. Em cenários onde não há Linha de Visada (LoS — *Line of Sight*), o modelo estatístico que melhor representa as características desses ambientes urbanos é o modelo de Rayleigh. Esse modelo assume que a amplitude do sinal recebido segue uma distribuição gaussiana complexa com média zero e variância igual em todas as direções. Em resumo, o modelo de Rayleigh é utilizado para representar a matriz de canal H , cujos elementos são variáveis complexas distribuídas de forma uniforme.

2.4 Modulação em Quadratura e Amplitude

De acordo com (13), o sinal original gerado pelo transmissor não pode ser enviado diretamente sem nenhum tipo de modificação. O autor destaca que é necessário transformar o sinal utilizando ondas magnéticas portadoras, que possuem características mais adequadas para propagação em canais e meios de comunicação. É nesse contexto que entra a modulação. A modulação consiste em alterar as propriedades de uma onda portadora de tensão senoidal para que ela seja capaz de transportar as informações de uma mensagem. Esse processo pode incluir a aplicação de técnicas de codificação. No campo das comunicações, a modulação é essencial para integrar dados à onda portadora e permitir sua recuperação posterior, garantindo a transmissão eficaz das informações. As técnicas de modulação

podem ser divididas em duas categorias: aquelas que transmitem sinais analógicos e aquelas que transmitem dados digitais.

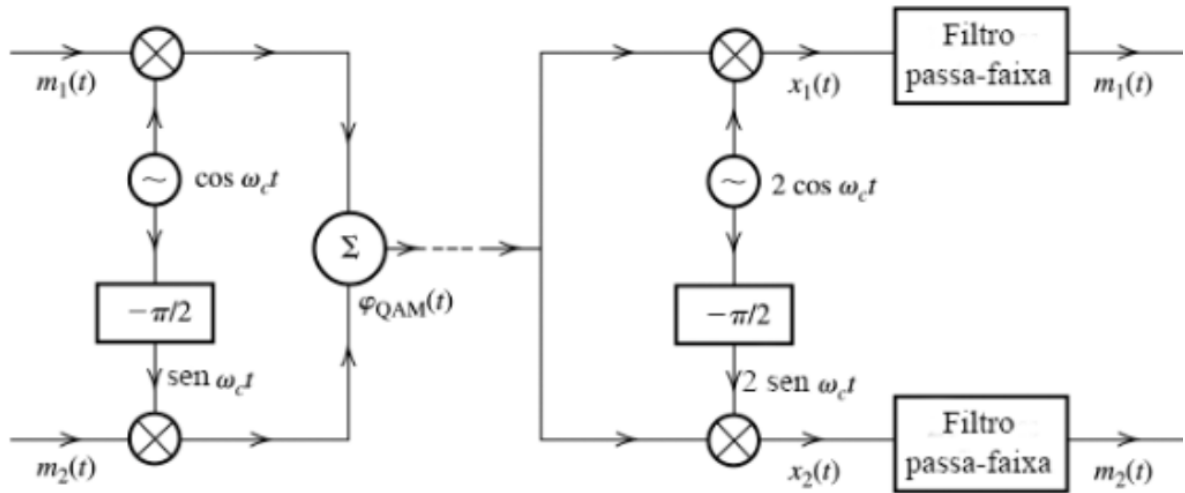
A Equação (8) é utilizada para representar uma função senoidal, onde $e(t)$ representa o valor instantâneo da tensão do sinal em função do tempo, V_p é a amplitude máxima da onda, ω é a frequência angular da onda, t é a variável tempo e θ é a fase inicial da onda:

$$e(t) = V_p \cdot \sin(\omega t + \theta) \quad (8)$$

Um dos principais componentes do transmissor em sistemas de comunicação sem fio digitais é o modulador. O resultado de passar o sinal original por um modulador é um sinal modulado. A Modulação por amplitude em quadratura (QAM - *Quadrature Amplitude Modulation*) é amplamente utilizada por ter uma técnica de modulação sofisticada, pois sua estrutura é baseada na presença de dois portadores ortogonais (11).

A QAM opera utilizando dois tipos de modulação: a modulação de amplitude (AM) e a modulação de fase (PM). Uma das características distintivas dessa técnica é que as componentes em fase e em quadratura estão deslocadas por 90° . Essas duas componentes são moduladas de maneira independente, com fluxos de dados distintos para cada uma, e os sinais resultantes são combinados para gerar o sinal QAM final (2).

Figura 3 — Modulação por amplitude em quadratura.



Fonte — (2).

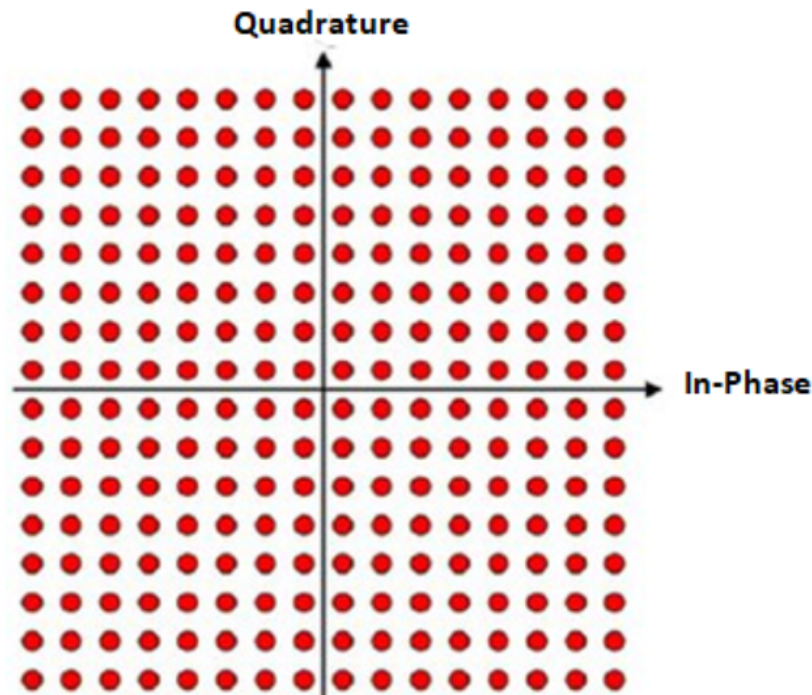
Conforme ilustrado na Figura 3 as caixas rotuladas com $-\frac{\pi}{2}$ funcionam como deslocadores de fase, que introduzem um atraso de $-\frac{\pi}{2}$ rad na fase de uma entrada senoidal. Quando os dois sinais de mensagens em banda base a serem transmitidos são $m_1(t)$ no canal em fase e $m_2(t)$ no canal em quadratura são modulados por portadoras $\cos(\omega_c t)$ e $\sin(\omega_c t)$ respectivamente, formando o sinal correspondente de modulação por QAM

$$\varphi_{\text{QAM}}(t) = m_1(t) \cos(\omega_c t) + m_2(t) \sin(\omega_c t). \quad (9)$$

No receptor, a detecção síncrona é realizada por multiplicadores que utilizam portadoras em quadratura. Após passar por filtros passa-baixa, os sinais $m_1(t)$ e $m_2(t)$ são recuperados separadamente nos canais em fase e em quadratura, respectivamente (2).

O diagrama de constelação é uma ferramenta visual essencial para entender o funcionamento do 256-QAM, uma modulação que utiliza 256 pontos de constelação. Cada ponto representa uma combinação específica de amplitude e fase, codificando um símbolo único. No caso do 256-QAM, cada símbolo corresponde a 8 bits, devido ao elevado número de pontos disponíveis. Essa característica permite uma alta eficiência espectral, já que mais informações podem ser transmitidas em um único símbolo. A modulação 256-QAM é amplamente utilizada em sistemas modernos de comunicação devido à sua capacidade de transmitir grandes volumes de dados em canais com largura de banda limitada (1).

Figura 4 — Diagrama de Constelação 256-QAM.



Fonte — (14).

3 Metodologia

Neste capítulo, apresentam-se os métodos utilizados para as simulações de capacidade de diversidade em sistemas de comunicação sem fio, comparando os desempenhos de sistemas SISO e MIMO, bem como a análise em diversos cenários urbanos, caracterizados por diferentes condições de propagação e níveis de interferência. O foco principal está em avaliar a eficiência espectral, a robustez e o impacto da densidade de obstáculos no desempenho dos sistemas. Para isso, será adotado o modelo de canal Rayleigh, a modulação 256-QAM, com foco na avaliação de métricas como SNR, BER e Eficiência Espectral. O software MATLAB será empregado como ferramenta para realizar as simulações, processar os dados e gerar análises comparativas entre os sistemas. A escolha do MATLAB fundamenta-se em sua ampla capacidade de modelar canais de comunicação, implementar algoritmos matemáticos complexos e representar resultados por meio de gráficos precisos.

O modelo de canal Rayleigh é uma escolha adequada para as simulações, especialmente em cenários urbanos, onde a linha de visada direta é frequentemente obstruída por obstáculos verticais. Nestes ambientes, os sinais transmitidos são frequentemente refletidos por essas superfícies, criando múltiplos caminhos de propagação. O modelo Rayleigh captura precisamente esses efeitos, permitindo uma simulação mais realista do comportamento do canal em tais condições. A escolha de 6 *taps* para o canal Rayleigh é justificada, pois ela representa um número típico de caminhos de multipercurso observados em cenários urbanos com diversas reflexões e difrações. Cada *tap* corresponde a um caminho de propagação distinto, com um atraso e uma atenuação específicos, refletindo a diversidade de caminhos disponíveis para o sinal a Listagem 3.1 mostra o modelo em que o canal será implementado, com o auxílio da função `rayleighchan()` do MATLAB que cria um objeto baseado na taxa de amostragem, símbolos e número de *taps*.

Listagem 3.1: Parâmetros de configuração de antenas.

```

1  % Parâmetros do canal Rayleigh
2  Numero_de_taps = 6; % Número de taps
3  % Canal Rayleigh com múltiplos taps (6 taps)
4  Canal_Rayleigh = rayleighchan(1/sampling_rate,symbol_rate,num_taps);

```

A simulação com equalização perfeita é escolhida para eliminar idealmente os efeitos de desvanecimento, proporcionando uma comparação clara da performance do sistema sob condições ideais de processamento de sinal. Embora em sistemas reais a equalização perfeita não seja possível devido a limitações de tempo e recursos computacionais, ela serve como um ponto de referência para a análise do desempenho do sistema. A equalização perfeita é capaz de compensar completamente o impacto dos múltiplos caminhos, proporcionando a maior taxa de transferência possível no canal, sem a perda de sinal causada pelo desvanecimento.

Dessa forma, ela permite avaliar o desempenho do sistema sem interferência dos efeitos de desvanecimento, isolando outros fatores, como a modulação e a codificação, para uma análise mais detalhada do impacto de múltiplos caminhos e do SNR.

A configuração de antenas é um aspecto fundamental na análise de sistemas de comunicação sem fio, especialmente para avaliar o ganho de diversidade e o desempenho, diferentes configurações de antenas permitem avaliar a evolução da capacidade e da robustez dos sistemas diante das condições em cenários urbanos. Serão três o número de configurações adotados neste presente projeto para comparativo, o 1×1 do sistema SISO, sendo este o mais básico da comunicação sem fio, onde existirá uma única antena transmissora e uma única receptora. Já no sistema MIMO serão simuladas duas configurações, a 2×2 e a 4×4 , a Listagem 3.2 mostra as configurações dos dois sistemas.

Listagem 3.2: Parâmetros de configuração de antenas.

```

1  % Parâmetros de configurações de antenas
2  numTXAntenas = [1, 2, 4]; % num. de antenas transmissoras (1, 2 e 4)
3  numRxAntenas = [1, 2, 4]; % num. de antenas receptoras (1, 2 e 4)

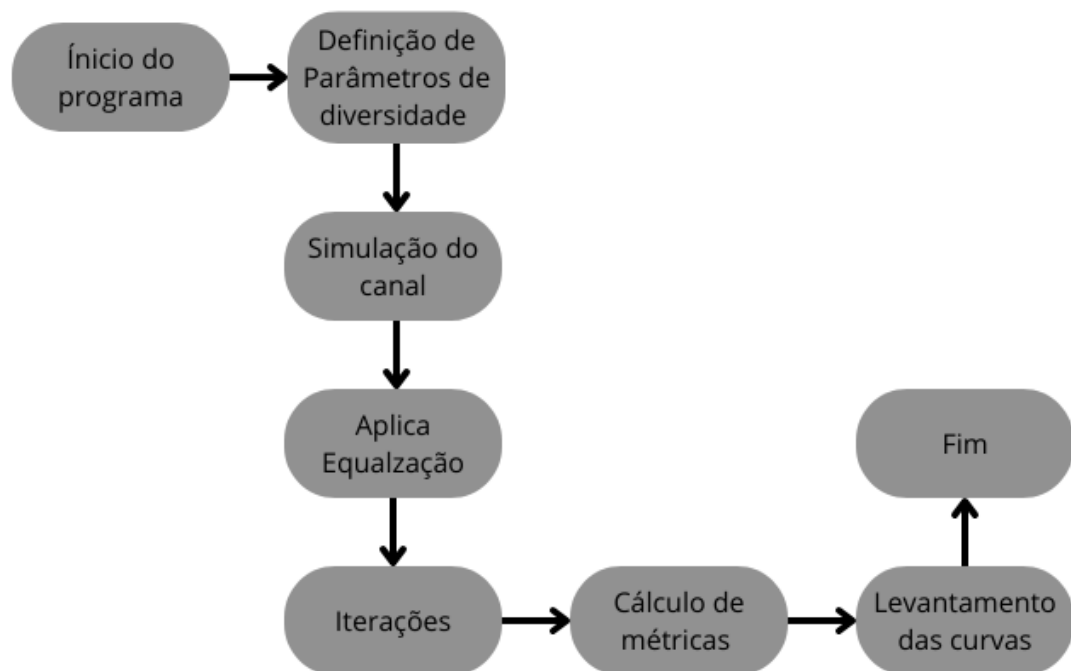
```

Das simulações, serão levantadas diversas métricas com o objetivo de realizar uma análise dos resultados e avaliar o desempenho sob diferentes condições do ambiente. Entre as métricas analisadas, destaca-se a BER vs. Densidade de Obstáculos, que permitirá avaliar a robustez dos sistemas de comunicação frente ao aumento das interferências ambientais causadas por obstáculos urbanos. Essa análise é essencial para entender como o aumento da densidade de obstáculos impacta a integridade do sinal e a precisão da transmissão. Além disso, será considerada a Capacidade do Canal vs. Largura de Banda, visando avaliar a eficiência espectral e o aproveitamento do espectro disponível em diferentes configurações de canal e largura de banda, permitindo otimizar a taxa de transmissão de dados.

Também serão analisados os efeitos da Taxa de Transmissão vs. Densidade de Obstáculos, que examinará como a degradação do canal devido ao aumento da densidade de obstáculos afeta a capacidade de transmissão de dados, impactando diretamente a qualidade do serviço em ambientes urbanos. Por fim, a SNR vs. Densidade de Obstáculos será investigada, com o objetivo de entender como a qualidade do sinal varia em ambientes urbanos com diferentes níveis de interferência e obstáculos.

Para ilustrar a estrutura e o funcionamento do código que será desenvolvido, apresenta-se um fluxograma detalhado Figura 3 que descreve as etapas principais do processo de simulação. O fluxograma organiza o fluxo lógico do código, iniciando pela definição dos parâmetros de entrada, como modelos de canal, configuração de antenas e frequência de operação, seguido pela implementação das equações matemáticas que regem os cálculos de BER, capacidade de canal e eficiência espectral.

Figura 5 — Fluxo geral do código do projeto.



Fonte — Autoria própria.

Ano?

Com essa abordagem, o estudo fornecerá uma análise detalhada e criteriosa sobre o desempenho dos sistemas SISO e MIMO, contribuindo para um melhor entendimento de suas aplicações em ambientes urbanos, além de oferecer subsídios para o desenvolvimento de tecnologias mais robustas e eficientes.

4 Resultados Esperados

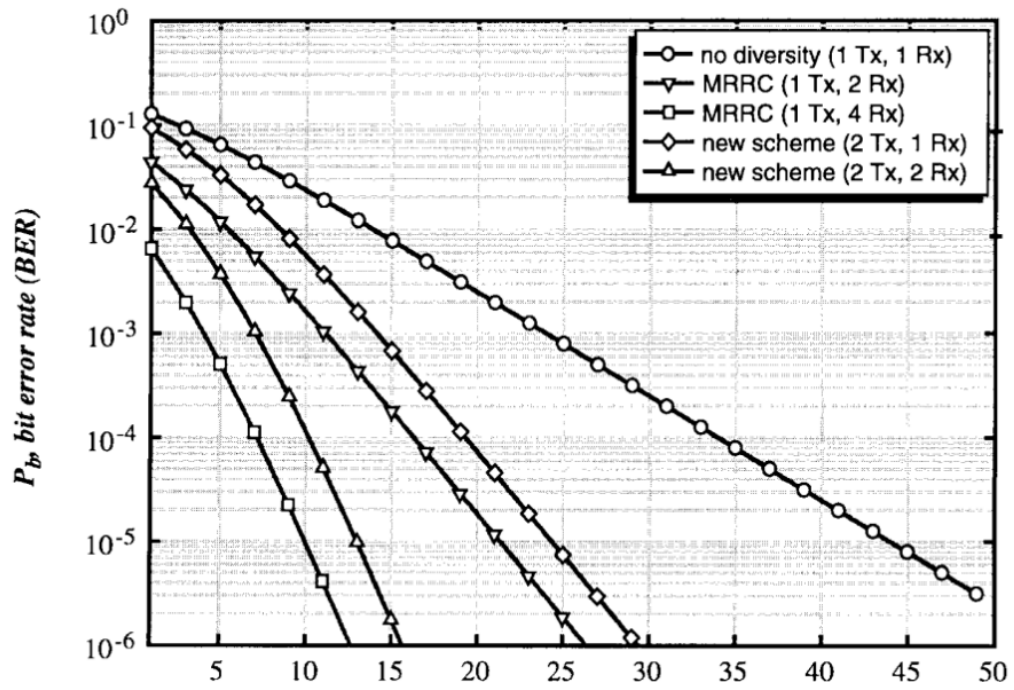
Com base na metodologia apresentada, espera-se que as simulações realizadas forneçam uma análise detalhada e comparativa entre os sistemas SISO e MIMO, evidenciando as vantagens e limitações de cada configuração em cenários urbanos. Os resultados deverão demonstrar que o sistema MIMO apresenta maior eficiência espectral e robustez em relação ao sistema SISO, especialmente em ambientes com alta densidade de obstáculos e níveis elevados de interferência. Essa expectativa fundamenta-se na Seção 2.2.2 da fundamentação teórica, que afirma que, quanto maior a diversidade disponível no sistema, melhor será sua capacidade de combater os efeitos de desvanecimento e interferência. No caso do MIMO, o uso de múltiplas antenas transmissoras e receptoras permite explorar essa diversidade espacial, resultando em um desempenho superior em termos de taxa de transmissão, confiabilidade do sinal e resistência às condições adversas do canal.

No que se refere à BER em função da densidade de obstáculos, espera-se que os sistemas MIMO, particularmente a configuração 4×4 , apresentem desempenho significativamente superior. O aumento no número de antenas deverá proporcionar maior diversidade e confiabilidade do sinal, permitindo que a BER se mantenha em níveis baixos. O sistema SISO, por outro lado, deverá apresentar uma degradação mais acentuada da BER à medida que a densidade de obstáculos aumenta, evidenciando suas limitações em ambientes urbanos. Essa expectativa é respaldada pelos resultados obtidos por (4), que demonstraram que sistemas MIMO, mesmo em configurações simples como o MIMO 2×2 , apresentam uma significativa redução da BER em comparação aos sistemas SISO, especialmente em cenários de baixa SNR. Alamouti concluiu que a diversidade espacial proporcionada pelo MIMO ajuda a combater os efeitos de desvanecimento e interferência, reduzindo a taxa de erro de bit.

Em relação à SNR, espera-se que os sistemas MIMO mantenham valores mais elevados em comparação ao SISO, mesmo em cenários com alta densidade de obstáculos. A configuração 4×4 , em particular, deverá demonstrar maior resistência aos efeitos de atenuação e interferência, destacando sua superioridade na transmissão de dados em ambientes desafiadores. O sistema SISO deverá apresentar uma redução mais acentuada da SNR nesses mesmos cenários, limitando sua eficiência.

As representações gráficas esperadas deverão ilustrar de forma clara os impactos da densidade de obstáculos, SNR e largura de banda no desempenho dos sistemas. Gráficos de BER, capacidade do canal e SNR deverão evidenciar as diferenças entre as configurações SISO e MIMO, destacando os ganhos proporcionados pelos sistemas com múltiplas antenas. A Figura 6, adaptada do artigo de (4), ilustra a comparação entre SISO e MIMO 2×2 , destacando a redução de BER em função da SNR. Esse tipo de representação será útil para ilustrar os resultados obtidos nas simulações para as configurações MIMO 4×4 em comparação ao SISO.

Figura 6 — Comparação do desempenho BER de BPSK e diversidade de transmissão de duas antenas no desvanecimento Rayleigh.



Fonte — (4).

No sistema SISO, observa-se que a BER decresce de forma lenta à medida que a SNR aumenta, o que reflete a limitação do sistema em lidar com os efeitos de desvanecimento e interferência. Em contraste, o sistema MIMO 2×2 com a codificação de Alamouti demonstra uma redução significativa na BER em todas as faixas de SNR, especialmente nas mais baixas. Por exemplo, para uma SNR de 10 dB, o sistema MIMO 2×2 atinge uma BER aproximadamente 10 vezes menor que o sistema SISO, evidenciando a eficiência do uso de múltiplas antenas. Com essa análise, espera-se confirmar que os sistemas MIMO são mais adequados para cenários urbanos, fornecendo subsídios para otimizar suas aplicações em futuros sistemas de comunicação sem fio.

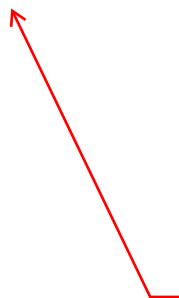
5 Cronograma

Nesta seção, será apresentado o cronograma de atividades a ser seguido no projeto, a Tabela 1 apresenta o quadro de atividades a serem desenvolvidas a cada mês, no qual o "X" indica o mês em que cada atividade será realizada.

Tabela 1 — Quadro de Atividades a serem desenvolvidas para a Conclusão do Trabalho de Conclusão de Curso.

| Atividades | Fevereiro | Março | Abril | Mai | Junho |
|---|-----------|-------|-------|-----|-------|
| Simulações iniciais (SISO vs. MIMO) | X | | | | |
| Testes de diferentes configurações MIMO | X | | | | |
| Simulação com alta densidade de obstáculos | X | X | | | |
| Simulação com diferentes condições de BER e SNR | | X | | | |
| Análise dos resultados | | X | X | X | |
| Ajuste e validação das simulações | | | | X | |
| Elaboração dos resultados | | | | X | X |
| Elaboração das conclusões | | | | X | X |
| Revisão final do TCC | | | | | X |

Fonte — Autoria própria.



Considere o tempo de desenvolvimento e correções. Veja que a versão final provavelmente deverá ser entregue na primeira semana de junho apenas.

Referências

- 1 HAYKIN, Simon; MOHER, Michael. **Introduction To Analog & Digital Communications**. [S. l.: s. n.], 2007.
- 2 LATHI, B P; DING, Zhi. **Modern digital and analog communication systems**. [S. l.: s. n.], 2009.
- 3 CHO, Yong Soo *et al.* **MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB®**. [S. l.: s. n.], 2010. DOI: 10.1002/9780470825631.
- 4 ALAMOUTI, Siavash M. A simple transmit diversity technique for wireless communications. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 16, 8 1998. ISSN 07338716. DOI: 10.1109/49.730453.
- 5 FREITAS, Walter C.; CAVALCANTE, Charles C.; CAVALCANTI, F. Rodrigo. P. Estratégias MIMO-OFDM para Sistemas de Comunicações Móveis. **XXII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações**, set. 2005.
- 6 SENGAR, Kritika *et al.* Study and Capacity Evaluation of SISO, MISO and MIMO RF Wireless Communication Systems. **International Journal of Engineering Trends and Technology (IJETT)**, Banasthali University, Newai, India, Amity Institute of Information e Technology University, Noida, India, v. 9, n. 9, p. 436–440, 2014.
- 7 PAULRAJ, Arogyaswami J. *et al.* An Overview of MIMO Communications—A Key to Gigabit Wireless. **Proceedings of the IEEE**, IEEE, v. 92, n. 2, p. 198–218, 2004.
- 8 SHANNON, Claude E. A mathematical theory of communication. **Bell System Technical Journal**, v. 27, n. 3, p. 379–423, 1948.
- 9 VÁLIO, Cassiano Mori. **Diversidade espacial em comunicação sem fio com STBC de Alamouti**. [S. l.: s. n.], 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Eletrônica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2018.
- 10 SILVA, Jorge Tiago Pereira Mogas da. **Receptor MIMO em FPGA baseado no esquema de Alamouti**. 2011. Dissertação de Mestrado – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa.
- 11 ROCHOL, Juergen. **Sistemas de comunicação sem fio : conceitos e aplicações**. 1. ed. [S. l.]: Bookman, 2018. v. 1.

- 12 SOUZA, Reginaldo N. de. **Modulação Espacial em Sistemas de Comunicação sem Fio: Compromisso Complexidade-Desempenho**. 2013. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 80 f.
- 13 NEUMANN, Fabiano B.; LENZ, Maikon L.; SILVA, Fernanda Rosa da *et al.* **Princípios de Comunicação de Dados**. Porto Alegre: SAGAH, 2021. E-book, p.43. ISBN 9786556901428. Disponível em:
<https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9786556901428/>. Acesso em: 17 jan. 2025.
- 14 RF, Everything. **What is 256 QAM Modulation?** [S. l.: s. n.], 2025.
<https://www.everythingrf.com/community/what-is-256-qam-modulation>. Acesso em: 17 jan. 2025.