



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES CAMPUS PATOS DE
MINAS

BRENO CÉSAR CORTEZ MARTINEZ

**COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ENTRE AS
MODULAÇÕES OTFS E OFDM EM CANAIS DE
ALTA MOBILIDADE SOB CONDIÇÕES DE RUÍDO
IMPULSIVO**

Patos de Minas – MG

2026



BRENO CÉSAR CORTEZ MARTINEZ

**COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ENTRE AS
MODULAÇÕES OTFS E OFDM EM CANAIS DE ALTA
MOBILIDADE SOB CONDIÇÕES DE RUÍDO IMPULSIVO**

Projeto Final de Curso apresentado à banca avaliadora como requisito parcial de avaliação da disciplina de PFC2 da graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações, da Faculdade de Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia, Campus Patos de Minas.

Orientador: Prof. Dr. André Antônio dos Anjos.



Breno César Cortez Martinez

**COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ENTRE AS MODULAÇÕES OTFS E
OFDM EM CANAIS DE ALTA MOBILIDADE SOB CONDIÇÕES DE RUÍDO
IMPULSIVO**

Este Projeto Final de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Eletrônico e de Telecomunicações” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia de Eletrônica e de Telecomunicações.

Patos de Minas – MG, 24 de Abril de 2026.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. André Antônio dos Anjos
FEELT – UFU

Profa. Dra. Karine Barbosa Carbonaro
FEELT – UFU

Prof. Dr. Renan Alves dos Santos
FEELT – UFU



Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ter me concedido força, sabedoria e coragem ao longo de toda a minha trajetória, e por me permitir alcançar mais esta importante conquista em minha vida. Sem Sua presença em meu caminho, nada disso seria possível.

À minha família, deixo minha mais profunda gratidão, especialmente à minha mãe, Inês Regina Gonçalves Cortez Martinez, e ao meu pai, Cesar Augusto Martinez, que sempre fizeram dos meus estudos uma prioridade e nunca mediram esforços para me oferecer apoio, incentivo e condições para que eu pudesse seguir em frente. Cada passo dado até aqui carrega o amor, o cuidado e a dedicação de vocês. Esta conquista também é de vocês.

Às minhas irmãs, Barbara Cortez Martinez e Bianca Cortez Martinez, agradeço por todo o carinho, apoio e por sempre acreditarem no meu potencial. Em muitos momentos, foram as palavras de incentivo e a confiança de vocês que me deram forças para continuar e acreditar que eu seria capaz de chegar até aqui.

Ao meu orientador André Antonio dos Anjos, expresso minha profunda gratidão por ter acreditado em mim e no desenvolvimento deste trabalho, além de toda a orientação, paciência e conhecimento compartilhados ao longo desta etapa tão importante. Seus ensinamentos foram fundamentais não apenas para a realização deste projeto, mas também para a minha formação acadêmica e profissional.

Agradeço também a todos os professores da minha graduação, que, com paciência, dedicação e excelência, contribuíram de maneira significativa para a minha formação. Sou grato pela oportunidade de aprender com cada um de vocês, não apenas os conteúdos técnicos, mas também os valores, a postura e a responsabilidade que definem o que é ser um engenheiro.

Aos meus amigos Victor Hugo Ferreira Braga e Gabriel Melo, expresso minha sincera gratidão por terem sido verdadeiros companheiros ao longo de toda essa jornada. Obrigado por estarem presentes nos momentos difíceis, por dividirem comigo os desafios, as incertezas, os aprendizados e também as conquistas. O apoio de vocês foi fundamental para que eu não desistisse e continuasse firme até o final.

Concluir esta etapa representa mais do que uma realização acadêmica; representa a superação de desafios, o esforço de muitos anos e a contribuição de pessoas que foram essenciais em minha caminhada. Por isso, meu mais sincero obrigado a todos que, de alguma forma, fizeram parte desta conquista.



Resumo

A evolução das comunicações móveis em direção à sexta geração (6G) impõe novos desafios relacionados à confiabilidade, latência e desempenho em ambientes de alta mobilidade e ruídos impulsivos. Nesse contexto, técnicas de modulação mais robustas tornam-se essenciais para garantir a eficiência e integridade da transmissão dos dados. Este Projeto Final de Curso busca comparar o desempenho das modulações OTFS (Orthogonal Time Frequency Space) e OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) sob diferentes condições de canal, com destaque para cenários com desvanecimento Doppler elevado, canais seletivos em frequência e presença de ruído impulsivo. As modulações foram analisadas a partir de simulações computacionais desenvolvidas no software MATLAB, considerando diferentes ordens de modulação (16-QAM, 64-QAM e 256-QAM) e variações no modelo estatístico do ruído impulsivo, baseado em distribuições de Poisson e log-normal. A análise de desempenho foi realizada com base nas curvas de BER (Bit Error Rate), comparando a resiliência de cada técnica frente aos diversos níveis de degradação do canal. Os resultados indicam que o desempenho relativo entre OTFS e OFDM depende do cenário avaliado: em canais com alta mobilidade, multipercurso e ruído impulsivo mais severo, a OTFS apresenta maior robustez, enquanto em condições estáticas ou com ruído impulsivo pouco severo o OFDM pode apresentar desempenho semelhante ou ligeiramente superior. Conclui-se que a OTFS é uma alternativa promissora para sistemas 6G em cenários adversos, por sua capacidade de manter robustez frente a múltiplas interferências, especialmente quando são empregadas modulações de alta ordem.

Palavras-chave: OTFS, OFDM, Ruído impulsivo, Alta mobilidade, Comunicação sem fio, BER.



Abstract

The evolution of mobile communications toward sixth-generation (6G) systems imposes new challenges related to reliability, latency, and performance in environments characterized by high mobility and impulsive noise. In this context, more robust modulation techniques become essential to ensure transmission efficiency and data integrity. This Final Course Project aims to compare the performance of OTFS (Orthogonal Time Frequency Space) and OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) modulations under different channel conditions, with emphasis on scenarios involving high Doppler fading, frequency-selective channels, and the presence of impulsive noise. The modulations are analyzed through computational simulations developed in the MATLAB environment, considering different modulation orders (16-QAM, 64-QAM, and 256-QAM) and variations in the statistical model of impulsive noise, based on Poisson and log-normal distributions. Performance evaluation is carried out using Bit Error Rate (BER) curves, allowing a comparative assessment of the resilience of each technique under different levels of channel degradation. The results indicate that the relative performance of OTFS and OFDM depends on the evaluated scenario: in channels with high mobility, multipath propagation, and more severe impulsive noise, OTFS shows greater robustness, while under static conditions or low-severity impulsive noise, OFDM may present similar or slightly better performance. It is concluded that OTFS is a promising alternative for 6G systems in adverse scenarios due to its ability to maintain robustness against multiple impairments, especially when high-order modulation schemes are employed.

Keywords: OTFS, OFDM, Impulsive noise, High mobility, Wireless communication, BER.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Subportadoras ortogonais na modulação OFDM.	16
Figura 2.2 – Diagrama de blocos da modulação OTFS.	19
Figura 2.3 – Ruído impulsivo combinado com ruído térmico.	22
Figura 4.1 – Cenário 1 – Desempenho em termos de BER das modulações OFDM e OTFS em um canal plano com um único percurso, comparando as condições sem mobilidade e com mobilidade (aproximadamente 133 km/h), utilizando modulação 64-QAM.	27
Figura 4.2 – Cenário 2 – Desempenho em termos de BER das modulações OFDM e OTFS em um canal plano sob condições de alta mobilidade (399 km/h), utilizando esquemas de modulação 16-QAM e 256-QAM.	28
Figura 4.3 – Cenário 3 – Desempenho em termos de BER das modulações OFDM e OTFS em um canal seletivo em frequência com três caminhos de propagação, sob alta mobilidade (399 km/h), utilizando esquemas de modulação 16-QAM e 256-QAM.	30
Figura 4.4 – Cenário 4 – Desempenho em termos de BER das modulações OFDM e OTFS sob presença de ruído impulsivo para $K = 0$, $K = 1$ e $K = 20$, representando ambientes com ruído impulsivo moderado e severo, respectivamente, em um canal plano estático utilizando modulação 64-QAM.	32
Figura 4.5 – Cenário 5 – Desempenho em termos de BER das modulações OFDM e OTFS sob ruído impulsivo com severidade fixa ($K = 10$) e diferentes intervalos médios entre impulsos ($\beta = 100$ e $\beta = 1000$), em um canal estático utilizando modulação 64-QAM.	34
Figura 4.6 – Cenário 6 – Desempenho em termos de BER das modulações OFDM e OTFS em um ambiente extremo, combinando modulação 256-QAM, mobilidade, seletividade em frequência (três caminhos de propagação) e ruído impulsivo com $K = 10$	36



Lista de Abreviaturas e Siglas

6G	Sexta Geração de sistemas de comunicação móvel
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BER	<i>Bit Error Rate</i>
BLER	<i>Block Error Rate</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
ICI	<i>Inter-Carrier Interference</i>
IDFT	<i>Inverse Discrete Fourier Transform</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
ISAC	<i>Integrated Sensing and Communication</i>
ISFFT	<i>Inverse Symplectic Finite Fourier Transform</i>
LMMSE	<i>Linear Minimum Mean Square Error</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
NR	<i>New Radio</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OTFS	<i>Orthogonal Time Frequency Space</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
SDR	<i>Software Defined Radio</i>
SFFT	<i>Symplectic Finite Fourier Transform</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>



Lista de Símbolos

$X[k]$	Símbolo modulado associado à k -ésima subportadora no sistema OFDM
$s[n]$	Amostra do sinal OFDM no domínio das amostras no índice discreto
n	
k	Índice discreto de subportadora
n	Índice discreto de tempo
x_{DD}	Grade bidimensional de símbolos OTFS no domínio atraso-Doppler
X_{TF}	Matriz no domínio tempo-frequência após a ISFFT
S	Matriz do sinal transmitido no domínio do tempo
s	Vetor do sinal transmitido, obtido pela vetorização de S
r	Vetor do sinal recebido no domínio do tempo
w	Vetor de ruído aditivo no receptor
Y_{TF}	Matriz do sinal recebido no domínio tempo-frequência
y_{DD}	Matriz de saída no domínio atraso-Doppler após a SFFT
F_M	Matriz DFT normalizada de dimensão $M \times M$
F_N	Matriz DFT normalizada de dimensão $N \times N$
H	Matriz equivalente do canal no domínio discreto
$h(\tau, \nu)$	Resposta ao impulso do canal com atraso τ e Doppler ν
h_i	Ganho complexo do canal para o i -ésimo caminho
τ_i	Atraso associado ao i -ésimo caminho de propagação
ν_i	Deslocamento Doppler associado ao i -ésimo caminho de propagação
l_i	Índice discreto de atraso do i -ésimo caminho
k_i	Índice discreto de Doppler do i -ésimo caminho
$\Delta\tau$	Resolução da grade OTFS no eixo de atraso
$\Delta\nu$	Resolução da grade OTFS no eixo de Doppler
$\delta(\cdot)$	Função delta de Dirac
P	Número total de caminhos de propagação
β	Intervalo médio entre ocorrências impulsivas
$f(t)$	Função densidade de probabilidade do intervalo entre impulsos
A	Média da amplitude dos impulsos de ruído impulsivo em dB μ V
B	Desvio padrão da amplitude dos impulsos em dB
Z	Variável aleatória gaussiana
z	Amplitude do ruído impulsivo em μ V
θ	Fase aleatória do ruído impulsivo
I	Componente em fase do ruído impulsivo
Q	Componente em quadratura do ruído impulsivo



K	Fator de severidade do ruído impulsivo $\left(K = \frac{\sigma_r^2}{\sigma_w^2}\right)$
σ_r^2	Variância do ruído impulsivo
σ_w^2	Variância do ruído térmico
M	Número de subportadoras
N	Número de subsímbolos por quadro
Δf	Espaçamento entre subportadoras
T	Duração de cada intervalo de tempo
f_c	Frequência de portadora
f_s	Frequência de amostragem

Sumário

1	Conceitos Introdutórios	12
1.1	Introdução	12
1.2	Problematização	12
1.3	Tema do Projeto	13
1.4	Objetivos	13
1.4.1	Objetivo Geral	13
1.4.2	Objetivos Específicos	13
1.5	Justificativas	14
2	Referencial Teórico	16
2.1	Modulação OFDM	16
2.1.1	Equacionamento da Modulação OFDM	17
2.2	Modulação OTFS	18
2.2.1	Equacionamento da Modulação OTFS	18
2.3	Ruído Impulsivo	21
2.4	Equacionamento do Ruído Impulsivo	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Métodos	23
4	Resultados e Análises	24
4.1	Parâmetros de Simulação	24
4.2	Cenários Avaliados	25
4.3	Comparação em Canais com e sem Mobilidade	26
4.4	Análise da Ordem de Modulação sob Alta Mobilidade	28
4.5	Análise em Canal Seletivo em Frequência com Alta Mobilidade	29
4.6	Desempenho sob Presença de Ruído Impulsivo	31
4.7	Influência do Parâmetro β no Ruído Impulsivo	33
4.8	Avaliação em Cenário Extremo	35
5	Conclusão	38
	ANEXOS	41
A	Código MATLAB utilizado no Cenário 1	41
B	Declaração Sobre o Uso de Inteligência Artificial	45



1 Conceitos Introdutórios

1.1 Introdução

A evolução dos sistemas de comunicação sem fio tem impulsionado o surgimento de novas gerações tecnológicas, e a sexta geração (6G) impõe requisitos extremos de desempenho para aplicações como veículos autônomos, comunicações holográficas e a Internet das Coisas em larga escala [1]. Esses requisitos incluem cenários de mobilidade extrema, como comunicações ferroviárias de alta velocidade, plataformas aéreas e enlaces não terrestres, nos quais a velocidade relativa pode ultrapassar os 1000 km/h.

Os esquemas de modulação tradicionais, como a Multiplexação por Divisão de Frequência Ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - OFDM), apresentam limitações importantes em ambientes com grande dispersão Doppler. Nesses cenários, as variações rápidas do canal comprometem a ortogonalidade entre as subportadoras, gerando interferência interportadora (*Inter-Carrier Interference* - ICI) e degradando a qualidade da comunicação [2]. Além disso, a necessidade de pilotos frequentes para estimação do canal reduz a eficiência espectral do sistema.

Diante dessas limitações, a modulação *Orthogonal Time Frequency Space* (OTFS) tem ganhado destaque como alternativa para canais duplamente seletivos [3, 4, 5, 6]. Diferentemente da OFDM, a OTFS mapeia os símbolos de informação no domínio atraso-Doppler, no qual o canal tende a ser esparso e aproximadamente invariante no tempo [7]. Essa característica permite explorar a diversidade total do canal e reduz a complexidade dos algoritmos de equalização [8].

A OTFS também é compatível com arquiteturas baseadas em OFDM, podendo ser inserida como camada adicional de pré e pós-processamento [7]. Estudos demonstram ganhos expressivos em termos de taxa de erro de bloco (*Block Error Rate* - BLER) mesmo sob altas velocidades e forte dispersão Doppler [9]. Em velocidades superiores a 500 km/h, o OTFS mantém estabilidade onde o OFDM falha [7].

Além disso, a esparsidade do canal no domínio atraso-Doppler favorece técnicas de estimação e equalização mais eficientes [10, 2]. Estudos recentes confirmam a superioridade do OTFS sobre o OFDM em cenários com múltiplas mobilidades, incluindo variantes como OTFS-IM e integração com superfícies inteligentes reconfiguráveis [11, 12].

1.2 Problematização

Embora os avanços nas técnicas de modulação sejam contínuos, as redes 6G expõem limitações importantes dos sistemas tradicionais. O OFDM, por exemplo, sofre degradação significativa em cenários com alta mobilidade, pois grandes deslocamentos Doppler rompem a ortogonalidade entre subportadoras e geram ICI [7]. Esse efeito não



pode ser mitigado simplesmente com o aumento de potência, o que representa um obstáculo concreto para aplicações de alta velocidade.

Outro fator relevante, mas frequentemente negligenciado, é o ruído impulsivo. Ao contrário do Ruído Branco Gaussiano Aditivo (*Additive White Gaussian Noise* - AWGN), o ruído impulsivo ocorre em picos de curta duração e alta energia, de forma esporádica e imprevisível [13]. Ele é encontrado em ambientes industriais, redes de distribuição elétrica e em equipamentos eletrônicos em geral. Sistemas projetados exclusivamente para canais gaussianos tendem a apresentar degradação severa quando submetidos a esse tipo de interferência.

Embora o OTFS demonstre robustez frente à dispersão Doppler, ainda há poucas investigações sobre seu comportamento em presença de ruído impulsivo [14]. Como o OTFS opera no domínio atraso-Doppler e concentra a energia do canal em um número reduzido de componentes dominantes, é plausível que técnicas específicas possam ser adaptadas para mitigar os efeitos de ruídos não gaussianos.

1.3 Tema do Projeto

Este Projeto Final de Curso tem como tema o estudo da modulação OTFS, com foco na análise de seu desempenho em canais de comunicação sem fio duplamente seletivos, caracterizados por elevada dispersão em atraso e Doppler, bem como pela presença de ruído impulsivo.

O trabalho contempla a modelagem, implementação e avaliação do sistema OTFS em diferentes condições de propagação, considerando métricas como taxa de erro de bits.

Além disso, será realizada uma análise comparativa com a modulação OFDM, visando investigar a robustez de ambas as modulações em cenários com alta mobilidade, multipercurso e interferência não gaussiana.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como o objetivo investigar e comparar o desempenho das modulações OTFS e OFDM em canais duplamente seletivos e com presença de ruído impulsivo, visando avaliar a robustez de ambas as técnicas em cenários de alta mobilidade e multipercurso, contribuindo para o melhor entendimento de soluções emergentes candidatas às futuras redes 6G.

1.4.2 Objetivos Específicos

As atividades desenvolvidas neste trabalho foram organizadas em duas etapas principais, a fim de viabilizar o cumprimento do objetivo geral proposto. Na Parte I do PFC,



foram realizadas as seguintes atividades de estudo e fundamentação teórica:

- a) Estudo dos fundamentos das modulações com múltiplas portadoras, com ênfase na modulação OFDM e na modulação OTFS, destacando suas estruturas, funcionamento e aplicações;
- b) Investigação dos efeitos do ruído impulsivo na transmissão de dados, abordando modelos clássicos e emergentes para representação do ruído, com destaque para cenários não-gaussianos;
- c) Análise comparativa teórica entre as modulações OTFS e OFDM em ambientes com presença de ruído impulsivo, considerando métricas como a probabilidade de erro de bit (*Bit Error Rate* - BER), robustez a desvanecimento e complexidade de implementação;
- d) Desenvolvimento de simulações computacionais no MATLAB para quantificar o desempenho das modulações OTFS e OFDM sob diferentes condições de canal e ruído impulsivo.

Na Parte II do trabalho, foi realizado o desenvolvimento computacional e as simulações de desempenho, compreendendo as seguintes atividades:

- a) Implementação, no ambiente de simulação *MATLAB*, de um sistema de transmissão e recepção utilizando a modulação OFDM, servindo como base comparativa consolidada nas comunicações com múltiplas portadoras;
- b) Implementação, no mesmo ambiente, de um sistema de transmissão e recepção baseado na modulação OTFS, considerando suas operações no domínio tempo-frequência;
- c) Desenvolvimento de simulações comparativas entre os sistemas OFDM e OTFS considerando o canal AWGN, com análise do desempenho em termos da BER em função da relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* - SNR);
- d) Avaliação do desempenho das modulações OFDM e OTFS em canais com ruído impulsivo, analisando a robustez de cada técnica frente à ocorrência de pulsos de alta energia em instantes aleatórios;
- e) Comparação dos resultados obtidos por meio de gráficos e métricas quantitativas, destacando os principais pontos fortes e limitações de cada abordagem sob diferentes condições de canal.

1.5 Justificativas

O avanço das redes de comunicação sem fio, impulsionado pelas demandas de aplicações com alta mobilidade, baixa latência e elevada confiabilidade, tem evidenciado limitações das técnicas de modulação tradicionais em cenários dinâmicos e sujeitos a interferências não gaussianas [14]. Nesse contexto, torna-se fundamental investigar alternativas capazes de manter desempenho satisfatório mesmo sob condições adversas de



propagação.

A modulação OTFS tem se destacado na literatura recente por sua capacidade de lidar de forma mais eficiente com variações no canal ao longo do tempo e da frequência, sendo considerada uma candidata promissora para sistemas de comunicação de próxima geração [9, 10, 14]. No entanto, sua avaliação em ambientes mais realistas, que incluem não apenas dispersão em atraso e Doppler, mas também a presença de ruído impulsivo, ainda demanda investigações mais aprofundadas.

Além disso, a comparação direta com técnicas amplamente consolidadas, como o OFDM, permite uma análise mais consistente das vantagens e limitações da OTFS, especialmente em termos de robustez e desempenho em cenários degradantes. Esse tipo de estudo é essencial para compreender o comportamento das diferentes modulações em condições práticas de operação.

Dessa forma, este trabalho se justifica pela necessidade de ampliar o entendimento sobre o desempenho de esquemas de modulação em ambientes complexos, contribuindo para o desenvolvimento de soluções mais robustas e alinhadas com os desafios impostos pelas futuras redes de comunicação sem fio, em especial aquelas associadas ao contexto do 6G.

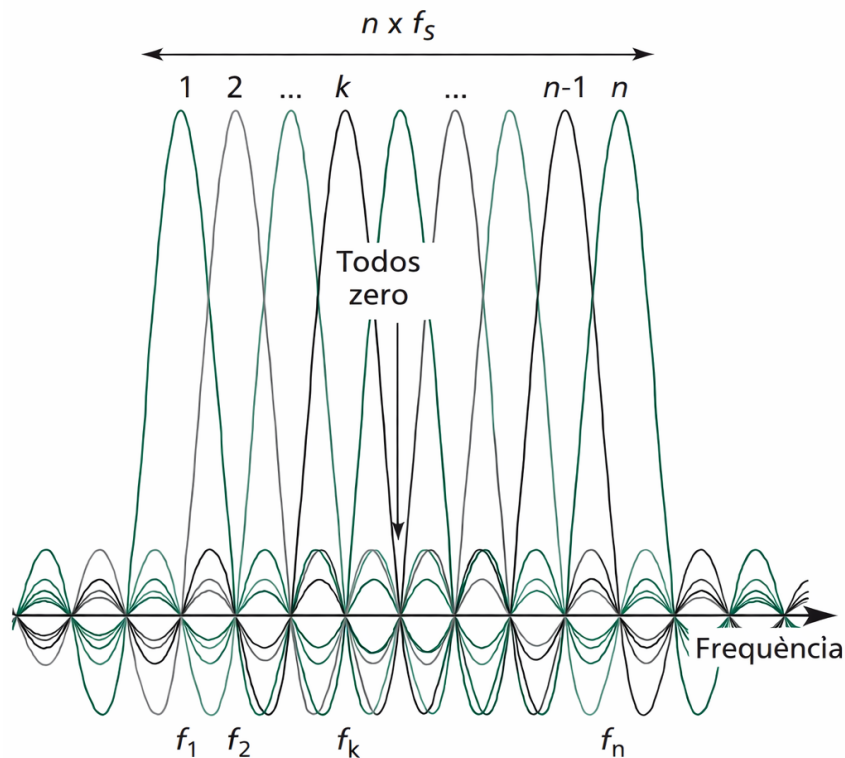
2 Referencial Teórico

Esta seção apresenta os fundamentos teóricos que sustentam o desenvolvimento deste trabalho, contemplando os principais conceitos relacionados às modulações OFDM e OTFS, à modelagem de canais duplamente seletivos e à caracterização do ruído impulsivo. Também são introduzidas as métricas de desempenho adotadas na análise comparativa, fornecendo a base necessária para a compreensão dos resultados obtidos.

2.1 Modulação OFDM

A modulação por Divisão de Frequência Ortogonal está presente em padrões como Wi-Fi, LTE e 5G. Seu princípio de funcionamento baseia-se na transmissão paralela de dados por meio de múltiplas subportadoras ortogonais [15], conforme ilustrado na Figura 2.1.

Figura 2.1: Subportadoras ortogonais na modulação OFDM.



Fonte: [16] (Adaptado).

Diferentemente da multiplexação por divisão de frequência convencional (*Frequency Division Multiplexing* - FDM), na qual os canais ocupam faixas distintas do espectro separadas por bandas, a OFDM permite a sobreposição espectral das subportadoras.



Essa sobreposição é possível devido à ortogonalidade entre elas, o que garante a separação correta dos símbolos no receptor e resulta em maior eficiência espectral [16].

Na modulação OFDM, o fluxo de dados é dividido em símbolos de menor taxa, que são transmitidos ao mesmo tempo em diferentes subportadoras. Apesar de suas vantagens, a modulação apresenta limitações importantes em cenários com alta mobilidade. A presença de desvio Doppler compromete a ortogonalidade entre as subportadoras, resultando em interferência interportadora e degradação do desempenho. A necessidade de estimativa de canal frequente em ambientes dinâmicos reduz a eficiência do sistema, motivando o estudo de técnicas alternativas mais robustas a essas condições.

2.1.1 Equacionamento da Modulação OFDM

O funcionamento da modulação OFDM pode ser descrito a partir da geração do sinal discreto no domínio das amostras. Esse sinal é formado pela superposição de várias subportadoras ortogonais, sendo que cada uma transporta um símbolo de informação proveniente de uma constelação digital, como a modulação de amplitude em quadratura (*Quadrature Amplitude Modulation* - QAM). Matematicamente, a sequência OFDM $s[n]$ é obtida por meio da Transformada Inversa de Fourier Discreta (IDFT), expressa por:

$$s[n] = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X[k] \cdot e^{j2\pi kn/N}. \quad (2.1)$$

Nessa expressão, $X[k]$ representa o símbolo modulado associado à k -ésima subportadora, enquanto N corresponde ao número total de subportadoras utilizadas na transmissão. O termo $s[n]$ denota a amostra do sinal OFDM no índice discreto n , associado ao instante $t = nT_s$, em que T_s é o período de amostragem. O fator $1/\sqrt{N}$ é empregado para normalizar a energia do sinal transmitido.

Cada termo da soma representa a contribuição de uma subportadora específica, resultando em um sinal composto no domínio das amostras. Na prática, essa operação é implementada de forma eficiente por meio de uma transformada inversa rápida de Fourier (*Inverse Fast Fourier Transform* - FFT), permitindo a geração do sinal OFDM com baixo custo computacional.

No receptor, o processo inverso é realizado por meio de uma transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT), recuperando os símbolos $X[k]$ transmitidos em cada subportadora. A correta recuperação desses símbolos depende da manutenção da ortogonalidade entre as subportadoras, condição que é atendida quando o canal apresenta variações lentas no tempo. Em cenários de alta mobilidade, essa condição deixa de ser válida, resultando em ICI e degradação do desempenho do sistema [15].



2.2 Modulação OTFS

A modulação OTFS é uma técnica recente que realiza a modulação da informação no domínio atraso-Doppler, também chamado de domínio *delay-Doppler*, em contraste com as abordagens convencionais baseadas no domínio tempo-frequência. Nessa representação, o eixo de atraso descreve os diferentes tempos de propagação associados aos múltiplos percursos do canal, enquanto o eixo Doppler descreve os deslocamentos de frequência causados pelo movimento relativo entre transmissor, receptor e espalhadores. Essa organização permite explorar de forma mais eficiente as características físicas do canal de propagação, especialmente em cenários com mobilidade elevada e presença de multipercurso [17, 14].

No OTFS, os símbolos de informação são definidos em uma grade bidimensional no domínio atraso-Doppler e, por meio de transformações adequadas, são mapeados para o domínio tempo-frequência antes da transmissão. Como resultado, cada símbolo é distribuído ao longo de toda a grade tempo-frequência, permitindo que experimente as variações do canal ao longo do tempo e da frequência.

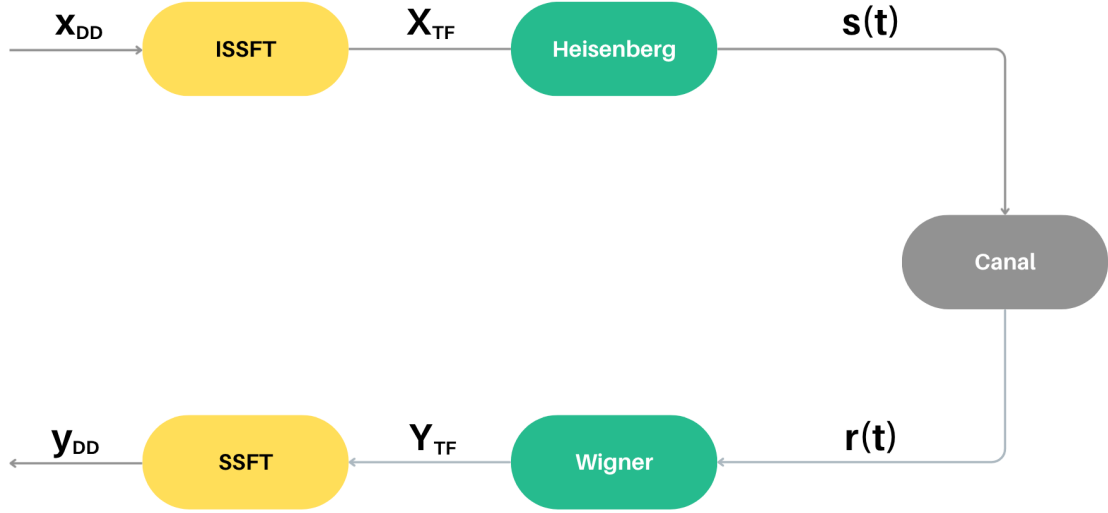
Dessa forma, a modulação OTFS apresenta potencial para maior robustez em canais duplamente seletivos, sendo particularmente relevante em cenários com alta dispersão em atraso e Doppler, bem como em ambientes sujeitos a interferências não gaussianas [14].

2.2.1 Equacionamento da Modulação OTFS

O sistema OTFS opera em uma largura de banda de $M\Delta f$ Hz e possui duração de quadro de NT segundos, onde M e N representam o número de subportadoras o número de subsímbolos por quadro, respectivamente, Δf é o espaçamento entre subportadoras e T é a duração de cada intervalo de tempo (subsímbolo OTFS). Esses parâmetros satisfazem a condição de ortogonalidade $\Delta f = 1/T$. A Fig. 2.2 apresenta o diagrama em blocos simplificado do sistema de modulação OTFS, composto pelas etapas de transmissão e recepção.



Figura 2.2: Diagrama de blocos da modulação OTFS.



Fonte: O autor.

Os símbolos de informação são inicialmente mapeados em uma grade bidimensional no domínio atraso-Doppler, representada pela matriz $\mathbf{x}_{DD} \in \mathbb{C}^{M \times N}$, cujos índices correspondem às posições discretas nos eixos de atraso e Doppler. A correspondente representação no domínio tempo-frequência, denotada por $\mathbf{X}_{TF} \in \mathbb{C}^{M \times N}$, é obtida por meio da Transformada Inversa Simplética de Fourier (*Inverse Symplectic Finite Fourier Transform* - ISFFT), definida como

$$\mathbf{X}_{TF} = \mathbf{F}_M \mathbf{x}_{DD} \mathbf{F}_N^H, \quad (2.2)$$

onde $\mathbf{F}_M$ e $\mathbf{F}_N$ são as matrizes normalizadas da Transformada Discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform* - DFT) de dimensões $M \times M$ e $N \times N$, respectivamente, e $(\cdot)^H$ denota a transformação transposta Hermitiana.

A matriz do sinal transmitido no domínio do tempo, $\mathbf{S} \in \mathbb{C}^{M \times N}$, é obtida por meio da transformada de Heisenberg, a qual, em implementações discretas e assumindo pulsos de transmissão ideais, corresponde à aplicação de uma transformada inversa de Fourier ao longo da dimensão de frequência, sendo dada por

$$\mathbf{S} = \mathbf{F}_M^H \mathbf{X}_{TF}. \quad (2.3)$$

O sinal transmitido no domínio do tempo é então obtido por meio da vetorização coluna



a coluna da matriz $\mathbf{S}$, resultando no vetor

$$\mathbf{s} = \text{vec}(\mathbf{S}). \quad (2.4)$$

O vetor $\mathbf{s}$ é então convertido para analógico, gerando o sinal de transmissão OTFS em banda base $s(t)$ ¹.

O canal de comunicação no domínio atraso-Doppler pode ser modelado como

$$h(\tau, \nu) = \sum_{i=1}^P h_i \delta(\tau - \tau_i) \delta(\nu - \nu_i), \quad (2.5)$$

onde $\delta(\cdot)$ representa a função delta de Dirac, P é o número de caminhos de propagação, e h_i , τ_i e ν_i correspondem, respectivamente, ao ganho complexo, ao atraso e ao deslocamento Doppler do i -ésimo caminho.

Os parâmetros de atraso e Doppler podem ser discretizados como

$$\tau_i = l_i \Delta\tau, \quad \nu_i = k_i \Delta\nu, \quad (2.6)$$

onde l_i e k_i representam os índices discretos de atraso e Doppler na grade OTFS, e as resoluções são dadas por

$$\Delta\tau = \frac{1}{M\Delta f}, \quad \Delta\nu = \frac{1}{NT}. \quad (2.7)$$

O sinal recebido no domínio do tempo é denotado por $r(t)$. A representação discreta do sinal recebido pode ser expressa por

$$\mathbf{r} = \mathbf{H}\mathbf{s} + \mathbf{w}, \quad (2.8)$$

onde $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{MN \times MN}$ é a matriz de canal equivalente e $\mathbf{w}$ representa o ruído aditivo, podendo incluir componentes gaussianas e impulsivas.

O vetor recebido $\mathbf{r}$ é então projetado no domínio tempo-frequência por meio da transformada de Wigner, que corresponde a uma operação de filtragem casada e é tipicamente implementada por meio de um receptor OFDM, resultando na matriz $\mathbf{Y}_{TF} \in \mathbb{C}^{M \times N}$.

Por fim, a representação no domínio atraso-Doppler é obtida por meio da Transformada Simplética de Fourier (*Symplectic Finite Fourier Transform* - SFFT), dada por

$$\mathbf{y}_{DD} = \mathbf{F}_M^H \mathbf{Y}_{TF} \mathbf{F}_N, \quad (2.9)$$

¹Na prática, um prefixo cíclico (cyclic prefix, CP) é adicionado a cada subsímbolo OTFS para evitar interferência intersimbólica. Neste trabalho, o CP é omitido para simplificação da notação.



a partir da qual os símbolos transmitidos podem ser estimados por técnicas de detecção apropriadas para a constelação utilizada no domínio atraso-Doppler.

2.3 Ruído Impulsivo

O ruído impulsivo é um tipo de interferência não gaussiana caracterizado por pulsos de alta energia, curta duração e ocorrência esporádica. Ele é frequente em ambientes industriais, redes elétricas, sistemas automotivos e áreas urbanas densas. Diferentemente do ruído AWGN, cuja distribuição é contínua e apresenta variância finita com baixa probabilidade de eventos extremos, o ruído impulsivo é caracterizado pela presença de amostras de alta amplitude que ocorrem de forma esporádica no tempo. Esse comportamento não é adequadamente descrito por modelos gaussianos, podendo causar degradações severas no desempenho de sistemas de comunicação projetados sob essa hipótese [18].

Sistemas como OFDM, que pressupõem canal com AWGN, são particularmente vulneráveis ao ruído impulsivo, pois os picos de energia podem afetar várias subportadoras simultaneamente. Modelar esse tipo de ruído de maneira realista é essencial para testes de robustez.

2.4 Equacionamento do Ruído Impulsivo

Neste trabalho, o ruído impulsivo é incorporado ao modelo de sinal recebido por meio da adição de um termo impulsivo ao ruído térmico. A perturbação resultante é modelada com base na abordagem estatística proposta em [13], na qual a ocorrência dos impulsos segue um processo de Poisson.

Sob essa hipótese, o intervalo de tempo entre dois eventos impulsivos consecutivos é descrito por uma distribuição exponencial, dada por

$$f(t) = \frac{1}{\beta} e^{-t/\beta}, \quad t \geq 0, \quad (2.10)$$

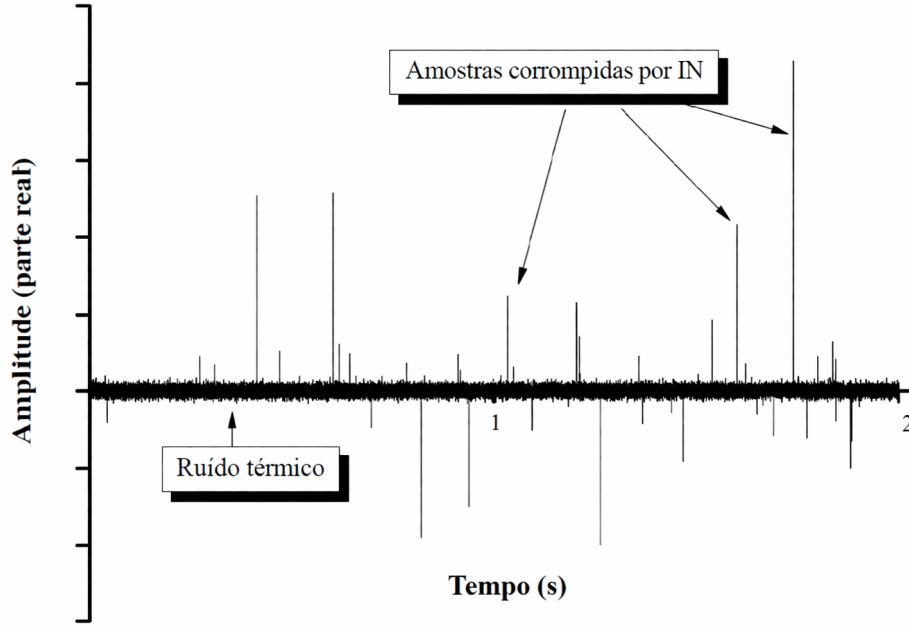
em que t representa o intervalo entre dois impulsos sucessivos e β corresponde ao valor médio de separação entre duas amostras. Na implementação em tempo discreto utilizada nas simulações, variáveis aleatórias exponenciais com média β amostras determinam o número de amostras entre ocorrências impulsivas consecutivas.

A amplitude de cada pulso impulsivo é modelada segundo uma distribuição log-normal, conforme descrito em [13]. Inicialmente, gera-se uma variável aleatória gaussiana Z com média A [dB μ V] e desvio padrão B [dB]. A amplitude correspondente em μ V é então obtida por meio de

$$z[\mu V] = 10^{\frac{Z[\text{dB}\mu V]}{20}}. \quad (2.11)$$



Figura 2.3: Ruído impulsivo combinado com ruído térmico.



A fase de cada componente impulsiva é modelada como uma variável aleatória θ , uniformemente distribuída no intervalo $(0, 2\pi]$. Dessa forma, as componentes em fase e em quadratura do ruído impulsivo podem ser expressas como

$$I = z \cos(\theta), \quad Q = z \sin(\theta). \quad (2.12)$$

Em cenários práticos, o ruído impulsivo afeta apenas uma parcela das amostras do sinal recebido, enquanto o ruído térmico está presente em todas elas. A Fig. 2.3 ilustra um exemplo de ruído impulsivo gerado de acordo com esse modelo.

Para controlar a intensidade do ruído impulsivo em relação ao ruído térmico nas simulações, foi introduzido o parâmetro K . Esse fator representa a razão entre as potências médias do ruído impulsivo e do ruído térmico, sendo definido como $K = \frac{\sigma_r^2}{\sigma_w^2}$, onde σ_r^2 corresponde à variância do ruído impulsivo e σ_w^2 representa a variância do ruído térmico.



3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Métodos

A metodologia adotada neste trabalho foi estruturada em três etapas principais: (i) estudo teórico e revisão bibliográfica, (ii) modelagem e implementação do sistema de comunicação, e (iii) realização de simulações e análise de resultados.

Inicialmente, foi conduzida uma revisão bibliográfica com base em artigos científicos recentes disponíveis na base IEEE Xplore, com o objetivo de consolidar os fundamentos das modulações OTFS e OFDM, bem como compreender os efeitos do desvanecimento em canais sem fio e as características do ruído impulsivo.

Foram analisados trabalhos relacionados à modelagem de canais com multipercorso e mobilidade, incluindo cenários com desvanecimento Rayleigh e Rician, além de modelos estatísticos para representação do ruído impulsivo. Essa etapa foi essencial para definir os parâmetros e modelos utilizados nas simulações.

Na etapa de desenvolvimento, foi implementado em ambiente MATLAB um sistema completo de transmissão e recepção para ambas as modulações.

No sistema OFDM, os símbolos de informação foram mapeados no domínio tempo-frequência e modulados por meio da IFFT, sendo recuperados no receptor via FFT.

Para a modulação OTFS, os símbolos foram inicialmente organizados no domínio atraso-Doppler e convertidos para o domínio tempo-frequência por meio da ISFFT. A transmissão foi realizada utilizando uma estrutura baseada em OFDM, e no receptor foi aplicada a SFFT para reconstrução dos símbolos no domínio atraso-Doppler.

O canal foi modelado considerando múltiplos percursos com atrasos e deslocamentos Doppler, representando cenários com seletividade em tempo e frequência. Além disso, foi incorporado um modelo de ruído impulsivo somado ao ruído branco gaussiano, cuja intensidade é controlada pelo parâmetro de severidade K , definido como a razão entre as variâncias dos ruídos impulsivo e térmico.

As simulações foram conduzidas variando parâmetros relevantes do sistema, como velocidade, a SNR, o fator de severidade do ruído impulsivo (K), os parâmetros estatísticos de amplitude do ruído e o intervalo médio entre impulsos.

Também foram consideradas diferentes ordens de modulação, permitindo avaliar o impacto da eficiência espectral no desempenho do sistema.

O desempenho das modulações foi avaliado por meio da BER. A análise comparativa entre OTFS e OFDM foi realizada sob diferentes condições de canal e níveis de interferência impulsiva, permitindo investigar a robustez de cada técnica em cenários adversos.

4 Resultados e Análises

Nesta seção, será avaliado o desempenho das modulações OTFS e OFDM por meio de simulações computacionais desenvolvidas no ambiente MATLAB. As análises concentram-se na comparação direta entre as duas técnicas sob diferentes condições de canal, incluindo cenários com mobilidade, seletividade em frequência e presença de ruído impulsivo, com o intuito de investigar a robustez de cada modulação em ambientes adversos.

4.1 Parâmetros de Simulação

As simulações foram realizadas em ambiente MATLAB, considerando a implementação de sistemas de comunicação baseados nas modulações OFDM e OTFS. A configuração adotada foi definida de forma a representar cenários realistas de comunicação sem fio, alinhando-se com parâmetros utilizados em sistemas 5G.

O espaçamento entre subportadoras foi definido como $\Delta f = 15$ kHz, valor correspondente à numerologia base do 5G NR especificada no padrão 3GPP TS 38.211 [19], onde $\Delta f = 15 \times 2^\mu$ kHz para $\mu = 0$. Essa escolha permite representar sistemas operando em bandas sub-6 GHz, sendo adequada para cenários com dispersão Doppler intermediária.

O sistema base foi configurado com $M = 64$ subportadoras e $N = 30$ subsímbolos por quadro tanto para o OTFS quanto para o OFDM. A escolha de M está associada a um compromisso entre resolução em atraso e complexidade computacional, enquanto N foi definido de modo a permitir a análise de efeitos Doppler ao longo do tempo, mantendo um custo computacional viável para as simulações.

A frequência de portadora foi definida como $f_c = 3,5$ GHz, valor típico de operação em bandas sub-6 GHz no 5G do Brasil. A frequência de amostragem foi calculada como $f_s = M\Delta f = 960$ kHz, garantindo a correta representação do sinal no domínio discreto. Foi adotado um prefixo cíclico de comprimento igual a 10 amostras, com o objetivo de mitigar os efeitos de interferência intersimbólica.

O canal de comunicação foi modelado como um canal multipercurso com atrasos e ganhos distintos, configuráveis, permitindo representar seletividade em frequência e efeitos de propagação realistas. Foram considerados diferentes perfis de canal, incluindo cenários com múltiplos caminhos e diferentes amplitudes relativas entre os percursos.

A modulação digital utilizada foi baseada em esquemas MQAM, com ordem configurável, permitindo avaliar o desempenho do sistema sob diferentes condições de eficiência espectral.

A análise de desempenho foi conduzida por meio de simulações de Monte Carlo, nas quais a SNR foi variada no intervalo de 0 a 30 dB. Para cada valor de SNR, foram transmitidos um mínimo de 10^8 bits independentes, sendo a BER estimada pela comparação



entre os bits transmitidos e recebidos.

Adicionalmente, foi incorporado ao modelo um ruído impulsivo somado ao ruído gaussiano, cuja intensidade é controlada pelo parâmetro K , que ajusta a potência do ruído impulsivo em relação ao ruído térmico. A ocorrência dos impulsos é modelada por meio de um processo de Poisson, sendo o intervalo médio entre eventos impulsivos determinado pelo parâmetro β , o qual controla a densidade temporal dos impulsos no sinal recebido. Essa modelagem permite avaliar o impacto conjunto da intensidade e da frequência dos impulsos no desempenho das modulações analisadas.

No receptor, a detecção foi realizada por meio de equalização por Estimativa de Erro Quadrático Médio Mínimo Linear (*Linear Minimum Mean Square Error* - LMMSE). No caso do OFDM, foi empregada equalização no domínio tempo-frequência com um único coeficiente por subportadora. Para o sistema OTFS, a equalização foi realizada no domínio do tempo por meio da matriz de canal equivalente, explorando a diversidade no domínio atraso-Doppler.

Os principais parâmetros base utilizados nas simulações são apresentados na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Parâmetros de Simulação

Parâmetro	Valor
Plataforma de simulação	MATLAB
Frequência de portadora (f_c)	3.5 GHz
Espaçamento entre subportadoras (Δf)	15 kHz
Número de subportadoras (M)	64
Número de subsímbolos (N)	30
Frequência de amostragem (f_s)	960 kHz
Prefixo cíclico	10 amostras
Modulação	M-QAM
Faixa de SNR	0–30 dB
Modelo de canal	Multipercurso com Doppler
Ruído	AWGN + impulsivo
Método de equalização	LMMSE

4.2 Cenários Avaliados

Com base nos parâmetros descritos anteriormente, foram realizadas as seguintes simulações:

- Comparação entre as modulações OFDM e OTFS em canais com e sem mobilidade, avaliando o impacto do deslocamento Doppler no desempenho de ambas as técnicas, por meio das curvas BER em função da SNR;
- Comparação entre as modulações OFDM e OTFS em um canal plano (*flat fading*) sob condições de alta mobilidade, considerando esquemas de modulação 16-QAM



e 256-QAM, com o objetivo de analisar a influência da ordem de modulação em cenários dinâmicos;

- Comparação entre as modulações OFDM e OTFS em um canal seletivo em frequência combinado com alta mobilidade, utilizando esquemas de modulação 16-QAM e 256-QAM, a fim de avaliar o desempenho das técnicas em ambientes com multipercurso e forte variação temporal;
- Comparação entre as modulações OFDM e OTFS em um canal com presença de ruído impulsivo, considerando diferentes níveis de severidade do ruído, caracterizados pelos parâmetros $K = 0$, $K = 1$ e $K = 20$, empregando um esquema de modulação 64-QAM;
- Análise da influência do parâmetro β , associado à potência e à frequência de ocorrência do ruído impulsivo, em um canal estático, mantendo-se fixa a severidade do ruído impulsivo ($K = 10$), utilizando modulação 64-QAM;
- Avaliação do desempenho das modulações OFDM e OTFS em um cenário extremo, combinando alta mobilidade, canal seletivo em frequência, ruído impulsivo e esquema de modulação de alta ordem (256-QAM), representando uma condição crítica de operação para sistemas de comunicação sem fio.

4.3 Comparação em Canais com e sem Mobilidade

A primeira análise realizada consistiu na comparação do desempenho das modulações OFDM e OTFS em um canal com desvanecimento simples, considerando cenários sem mobilidade e com mobilidade.

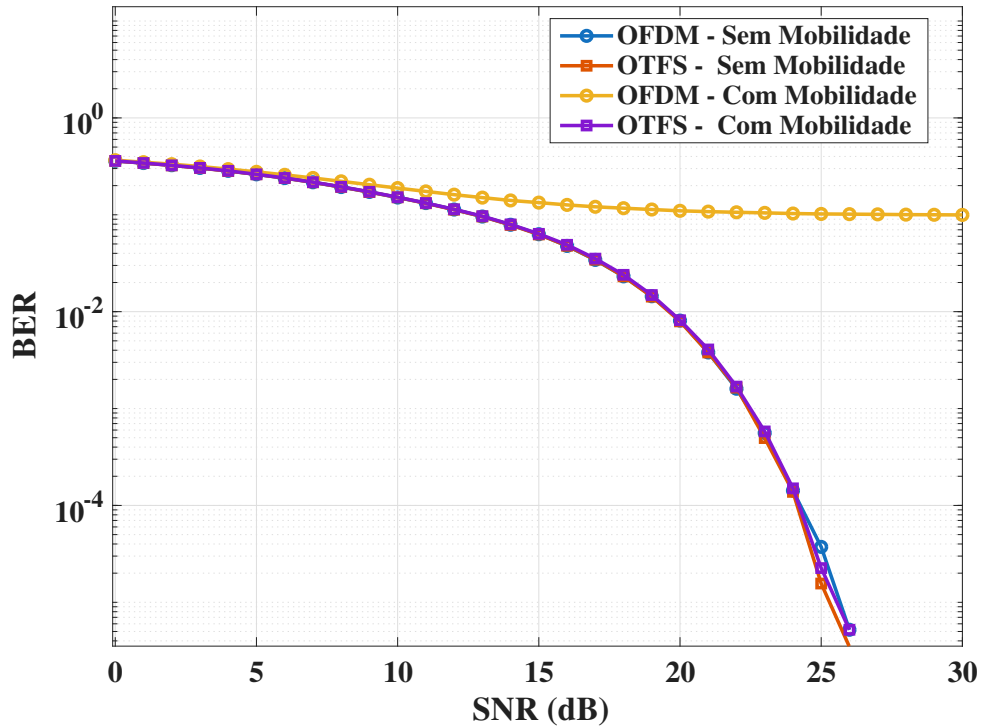
Para essa avaliação, foi adotado o esquema de modulação 64-QAM. O canal foi modelado com um único percurso e sem dispersão em atraso, de modo a isolar exclusivamente o efeito do deslocamento Doppler no sistema.

No cenário sem mobilidade, foi considerado Doppler nulo, representando uma condição estática. Já no cenário com mobilidade, foi utilizado um índice Doppler do canal unitário, o que, para os parâmetros adotados na simulação, corresponde a uma velocidade aproximada de 133 km/h.

Essa configuração permite analisar de forma direta o impacto do efeito Doppler no desempenho das modulações, sem a influência de multipercurso, evidenciando as diferenças estruturais entre OFDM e OTFS em cenários com mobilidade. O resultado desse experimento é apresentando na Figura 4.1.



Figura 4.1: Cenário 1 – Desempenho em termos de BER das modulações OFDM e OTFS em um canal plano com um único percurso, comparando as condições sem mobilidade e com mobilidade (aproximadamente 133 km/h), utilizando modulação 64-QAM.



Fonte: O autor.

Observa-se na Figura 4.1 que os cenários envolvendo a modulação OTFS, tanto com quanto sem mobilidade, bem como o cenário de OFDM sem mobilidade, apresentam desempenhos bastante semelhantes ao longo de toda a faixa de SNR analisada. Por outro lado, o cenário de OFDM sob condições de mobilidade passa a apresentar uma degradação significativa a partir de aproximadamente 10 dB de SNR.

Esse comportamento evidencia que, na ausência de mobilidade, a modulação OFDM é capaz de atingir desempenho comparável ao da OTFS. No entanto, em cenários com mobilidade, observa-se uma degradação acentuada do desempenho da OFDM, uma vez que, mesmo com o aumento da SNR, a taxa de erro de bits tende a se estabilizar, caracterizando a presença de um piso de erro elevado.

Esse fenômeno pode ser atribuído à ICI, causada pelo deslocamento Doppler. Em condições de alta mobilidade, a variação temporal do canal compromete a ortogonalidade entre as subportadoras da OFDM, resultando em interferência entre elas. Como essa interferência não é dependente apenas da potência do ruído, o aumento da SNR não é suficiente para mitigá-la.

Por outro lado, a modulação OTFS mantém um desempenho robusto mesmo na presença de mobilidade, evidenciando sua maior capacidade de lidar com canais variantes no tempo. Isso ocorre porque, ao operar no domínio atraso-Doppler, o OTFS proporciona

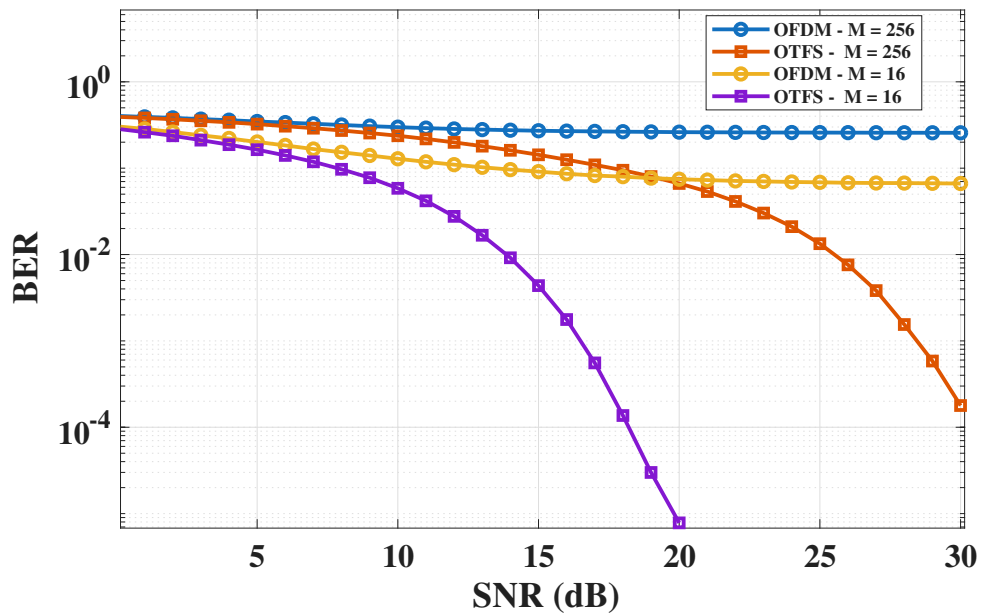
uma representação mais estruturada do canal, distribuindo os efeitos do Doppler de forma mais uniforme entre os símbolos transmitidos.

4.4 Análise da Ordem de Modulação sob Alta Mobilidade

Neste cenário, foi considerada a transmissão em um canal plano, composto por um único percurso e sem dispersão em atraso, sob condições de alta mobilidade. O deslocamento Doppler foi configurado a partir do índice Doppler discreto $k_\nu = 3$ utilizado na simulação, convertido para frequência Doppler por $f_D = k_\nu/(NT)$ e, em seguida, para velocidade relativa por $v = f_D c/f_c$. Com os parâmetros adotados ($f_c = 3,5$ GHz), essa configuração representa uma velocidade aproximada de 399 km/h, caracterizando um canal variante no tempo.

Adicionalmente, foi avaliado o impacto da ordem de modulação no desempenho dos sistemas OFDM e OTFS, adotando-se os esquemas 16-QAM e 256-QAM. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 4.2.

Figura 4.2: Cenário 2 – Desempenho em termos de BER das modulações OFDM e OTFS em um canal plano sob condições de alta mobilidade (399 km/h), utilizando esquemas de modulação 16-QAM e 256-QAM.



Fonte: O autor.

Por meio da análise dos resultados apresentados na Figura 4.2, observa-se que a ordem de modulação exerce impacto significativo no desempenho dos sistemas analisados, especialmente sob condições de alta mobilidade.

Inicialmente, nota-se que, para a modulação 16-QAM, o sistema OTFS apresenta desempenho superior ao OFDM em toda a faixa de SNR considerada. Enquanto o OTFS



apresenta redução contínua da taxa de erro de bits com o aumento da SNR, o OFDM tende a apresentar um comportamento de saturação, evidenciando a presença de um piso de erro.

Para a modulação 256-QAM, esse efeito torna-se ainda mais pronunciado. O sistema OFDM apresenta desempenho significativamente degradado, com a BER praticamente constante ao longo da faixa de SNR, indicando forte limitação imposta pelo canal variante no tempo. Por outro lado, o OTFS ainda mantém capacidade de redução da BER com o aumento da SNR, embora com desempenho inferior ao observado para 16-QAM, conforme esperado devido à maior sensibilidade de modulações de ordem elevada.

Esse comportamento pode ser explicado mais uma vez pelo impacto do deslocamento Doppler no sistema OFDM, que provoca a perda de ortogonalidade entre subportadoras e gera ICI. Como essa interferência não depende exclusivamente da potência do ruído, o aumento da SNR não resulta em melhoria significativa do desempenho, levando ao surgimento de um piso de erro.

Por outro lado, o OTFS demonstra maior robustez frente a esse tipo de canal, uma vez que sua representação no domínio atraso-Doppler o torna mais imune às variações temporais do canal. Dessa forma, mesmo sob condições severas de mobilidade e com modulações de ordem elevada, o OTFS mantém desempenho superior ao OFDM.

4.5 Análise em Canal Seletivo em Frequência com Alta Mobilidade

Nesta simulação, foi analisado o desempenho das modulações OTFS e OFDM em um canal seletivo em frequência sob condições de alta mobilidade. Diferentemente dos cenários anteriores, neste caso foi considerada a presença de múltiplos percursos com diferentes atrasos e ganhos, caracterizando um canal com dispersão em atraso.

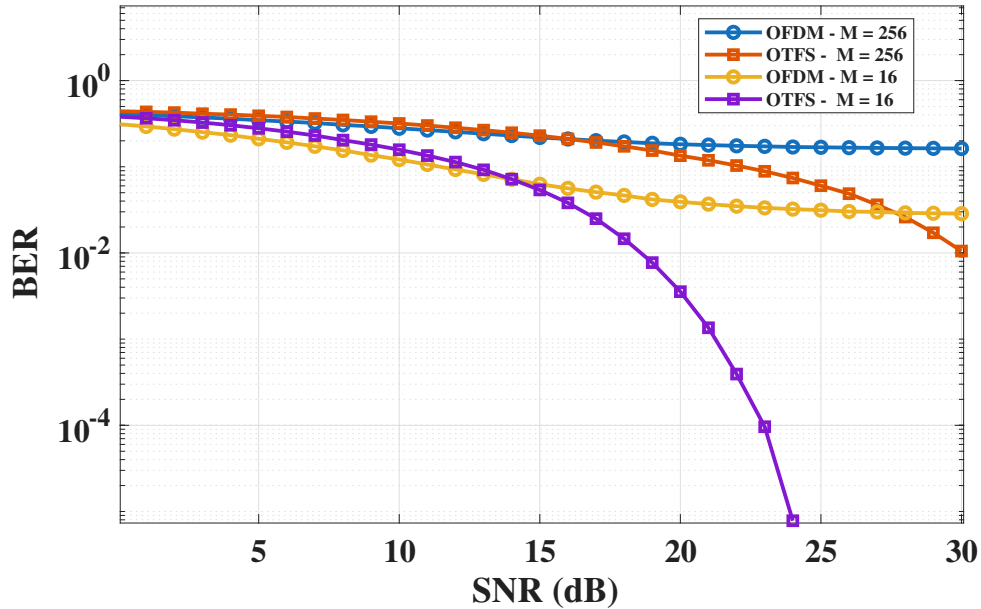
O canal foi modelado com três trajetórias de propagação, cujos atrasos discretos foram definidos como $[0, 1, 2]$ amostras, enquanto os ganhos relativos foram configurados como $[1, 0,7, 0,5]$. Essa configuração representa um cenário com multipercurso moderado, no qual o sinal recebido é composto por uma componente dominante e duas componentes refletidas com menor potência e atraso crescente, introduzindo seletividade em frequência no canal.

A mobilidade foi modelada por meio de um deslocamento Doppler correspondente a uma velocidade relativa de aproximadamente 399 km/h, sendo aplicado aos caminhos de propagação considerados. Esse cenário representa uma condição mais realista de comunicação sem fio, na qual coexistem efeitos de seletividade em frequência e variação temporal do canal.

Adicionalmente, foi avaliado o impacto da ordem de modulação no desempenho do sistema, considerando os esquemas 16-QAM e 256-QAM para ambas as modulações. Os

resultados da simulação são apresentados na Figura 4.3.

Figura 4.3: Cenário 3 – Desempenho em termos de BER das modulações OFDM e OTFS em um canal seletivo em frequência com três caminhos de propagação, sob alta mobilidade (399 km/h), utilizando esquemas de modulação 16-QAM e 256-QAM.



Fonte: O autor.

Por meio da análise dos resultados apresentados na Figura 4.3, observa-se que o canal seletivo em frequência sob condições de alta mobilidade ainda impõe degradação significativa no desempenho dos sistemas, especialmente para a modulação OFDM.

Para ambas as ordens de modulação, o OFDM apresenta um comportamento limitado em termos de redução da taxa de erro de bits. No caso da modulação 256-QAM, a BER permanece elevada e praticamente constante, acima de 10^{-1} , mesmo com o aumento da SNR, caracterizando a presença de um piso de erro. Para a modulação 16-QAM, observa-se uma leve melhoria no desempenho, com redução da BER em relação ao caso de maior ordem, porém ainda sem tendência significativa de decaimento com o aumento da SNR.

Ao comparar com o cenário da Figura 4.2, nota-se que o desempenho do OFDM apresenta uma leve melhora no caso do canal seletivo em frequência, especialmente para 16-QAM. Esse comportamento pode ser atribuído à diversidade introduzida pelo multipercursos, que permite ao sistema explorar diferentes componentes do sinal recebido. Ainda assim, o desempenho permanece limitado pelos efeitos combinados de seletividade em frequência e variação temporal do canal.

Por outro lado, a modulação OTFS apresenta desempenho significativamente superior em ambos os casos. Para 16-QAM, observa-se uma redução contínua da BER com o aumento da SNR, atingindo valores próximos de 10^{-5} para SNR inferiores a 25 dB. Para



256-QAM, embora o desempenho seja inferior ao de 16-QAM, o OTFS ainda mantém tendência consistente de melhora com o aumento da SNR, diferentemente do comportamento observado no OFDM.

A limitação do OFDM pode ser atribuída à sua elevada sensibilidade à combinação de seletividade em frequência e efeito Doppler. A presença de múltiplos caminhos, aliada à variação temporal do canal, compromete a ortogonalidade entre subportadoras, resultando na limitação de desempenho observada.

Em contraste, o OTFS, ao operar no domínio atraso-Doppler, permite uma representação mais adequada do canal, explorando de forma mais eficiente a diversidade introduzida pelo multipercurso e pelo Doppler. Como consequência, apresenta maior robustez em cenários adversos.

Assim, os resultados evidenciam que, embora o multipercurso possa introduzir ganhos limitados de diversidade para o OFDM, para a configuração considerada, o OTFS continua apresentando desempenho superior de forma consistente, especialmente em cenários caracterizados pela combinação de alta mobilidade e seletividade em frequência.

4.6 Desempenho sob Presença de Ruído Impulsivo

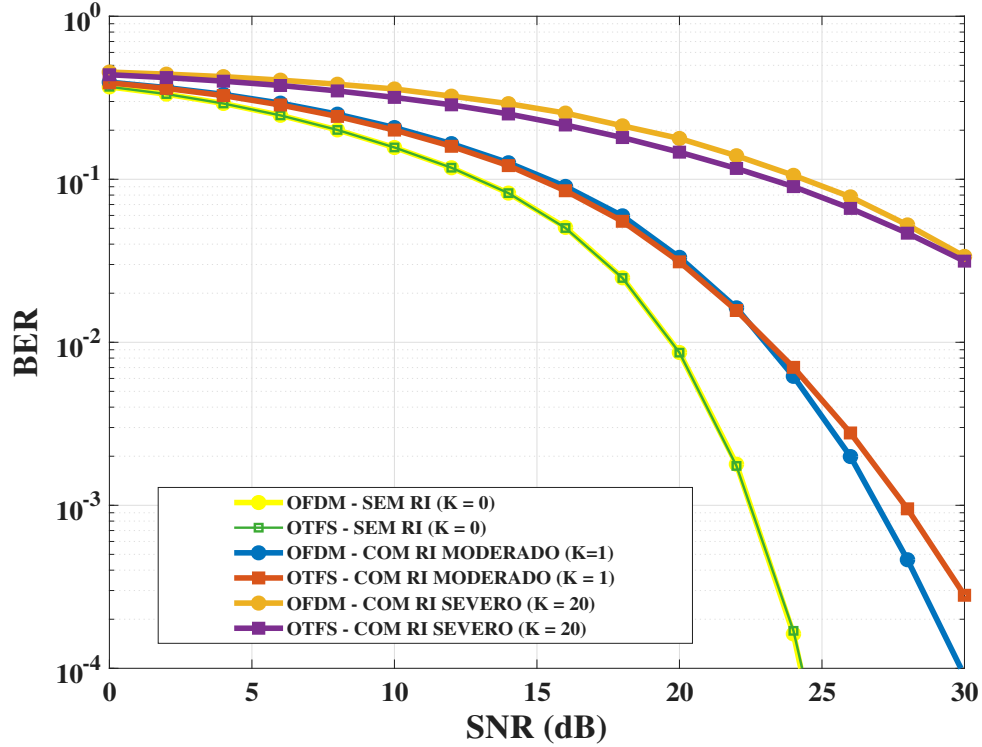
No quarto cenário analisado, foi avaliado o desempenho das modulações OTFS e OFDM na presença de ruído impulsivo, considerando um esquema de modulação 64-QAM. O canal foi modelado como um canal plano, composto por um único percurso com ganho unitário, sem dispersão em atraso e sem efeito Doppler, permitindo isolar exclusivamente o impacto do ruído impulsivo no sistema.

O parâmetro K , responsável por caracterizar a severidade do ruído impulsivo, foi variado entre os valores $K = 0$, $K = 1$ e $K = 20$. O caso $K = 0$ corresponde à ausência de ruído impulsivo, ou seja, apenas ruído gaussiano aditivo, enquanto os demais valores representam cenários com diferentes níveis de potência do ruído impulsivo em relação ao ruído térmico. O resultado das simulações está apresentado na Figura 4.4.

Essa configuração permite avaliar de forma controlada o impacto do ruído impulsivo no desempenho das modulações analisadas, evidenciando a degradação causada por interferências não gaussianas em sistemas de comunicação.



Figura 4.4: Cenário 4 – Desempenho em termos de BER das modulações OFDM e OTFS sob presença de ruído impulsivo para $K = 0$, $K = 1$ e $K = 20$, representando ambientes com ruído impulsivo moderado e severo, respectivamente, em um canal plano estático utilizando modulação 64-QAM.



Fonte: O autor.

Por meio da análise dos resultados apresentados na Figura 4.4, observa-se o impacto significativo do ruído impulsivo no desempenho das modulações OFDM e OTFS.

Inicialmente, no cenário sem ruído impulsivo ($K = 0$), ambas as modulações apresentam desempenho semelhante, com redução acentuada da BER à medida que a SNR aumenta, comportamento esperado para canais sujeitos apenas a ruído gaussiano aditivo.

No cenário com menor severidade do ruído impulsivo ($K = 1$), observa-se que as modulações OFDM e OTFS apresentam desempenhos bastante próximos, sendo possível notar uma leve vantagem do OFDM na região de SNR mais elevada. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que, para valores reduzidos de K , o sistema aproxima-se de um cenário dominado por ruído gaussiano, no qual o OFDM é naturalmente eficiente. Além disso, na ausência de efeitos de mobilidade e seletividade em frequência, as vantagens do OTFS tornam-se menos evidentes, podendo ocorrer leve penalização devido ao espalhamento dos efeitos do ruído ao longo dos símbolos.

Por outro lado, no cenário com maior severidade do ruído impulsivo ($K = 20$), observa-se uma degradação mais acentuada no desempenho de ambas as modulações, sendo que a modulação OTFS passa a apresentar desempenho superior ao OFDM em



toda faixa de SNR. Esse comportamento pode ser atribuído ao fato de que, em regimes dominados por ruído impulsivo, os picos de alta amplitude tendem a afetar de forma mais concentrada o sinal no OFDM, comprometendo diretamente múltiplas subportadoras. Em contrapartida, no OTFS, os efeitos do ruído são distribuídos ao longo da grade de símbolos, reduzindo o impacto localizado das perturbações impulsivas e contribuindo para um desempenho mais robusto.

De forma geral, os resultados indicam que, embora o OFDM possa apresentar desempenho ligeiramente superior em cenários com ruído impulsivo pouco severo, o OTFS demonstra maior robustez à medida que a intensidade do ruído impulsivo aumenta. Dessa forma, a severidade do ruído impulsivo exerce papel determinante no desempenho relativo entre as duas modulações.

4.7 Influência do Parâmetro β no Ruído Impulsivo

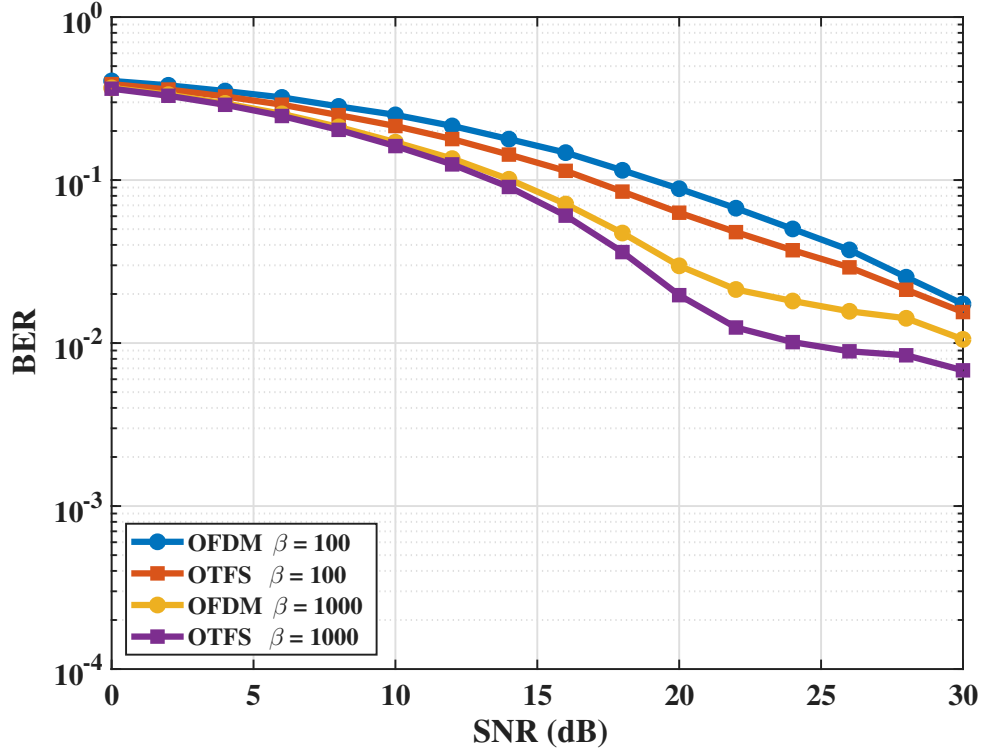
Na penúltima simulação realizada, foi analisado o comportamento das modulações OTFS e OFDM a partir da variação do parâmetro β , responsável por controlar o intervalo médio entre ocorrências impulsivas no modelo de ruído impulsivo. Para essa análise, foi considerado um ruído impulsivo com fator de severidade fixo $K = 10$, sendo avaliados dois valores distintos de β , iguais a 100 e 1000. A modulação considerada foi a 64-QAM.

O canal foi modelado mais uma vez como um canal plano estático sem dispersão em atraso e sem efeito Doppler, permitindo isolar exclusivamente o impacto da frequência de ocorrência dos impulsos no desempenho do sistema.

Como β representa o intervalo médio entre eventos impulsivos, valores menores de β indicam maior densidade de impulsos ao longo do tempo, enquanto valores maiores correspondem a ocorrências mais esparsas. Dessa forma, essa configuração permite avaliar como a frequência dos impulsos afeta o desempenho das modulações analisadas, mantendo constante a potência relativa do ruído impulsivo. Os resultados obtidos com a simulação estão apresentados na Figura 4.5.



Figura 4.5: Cenário 5 – Desempenho em termos de BER das modulações OFDM e OTFS sob ruído impulsivo com severidade fixa ($K = 10$) e diferentes intervalos médios entre impulsos ($\beta = 100$ e $\beta = 1000$), em um canal estático utilizando modulação 64-QAM.



Fonte: O autor.

Por meio da análise dos resultados apresentados na Figura 4.5, observa-se a influência direta do parâmetro β no desempenho das modulações OTFS e OFDM na presença de ruído impulsivo.

Valores menores de β , como $\beta = 100$, resultam em pior desempenho para ambas as modulações, uma vez que estão associados a maior frequência de ocorrência dos impulsos, aumentando a probabilidade de degradação do sinal recebido. Em contrapartida, para $\beta = 1000$, observa-se uma melhora significativa no desempenho, já que os impulsos tornam-se mais esparsos no tempo, reduzindo seu impacto médio sobre a transmissão.

Em todos os cenários analisados, a modulação OTFS apresenta desempenho superior ao OFDM, sendo essa diferença mais evidente em regimes de SNR mais elevados, o que indica maior robustez frente a perturbações impulsivas.

Dessa forma, os resultados evidenciam que a frequência de ocorrência do ruído impulsivo, controlada pelo parâmetro β na simulação, exerce influência no desempenho do sistema, sendo que cenários com impulsos mais espaçados apresentam melhores resultados. Além disso, o OTFS demonstra maior robustez em relação ao OFDM em todas as configurações avaliadas.



4.8 Avaliação em Cenário Extremo

Por fim, na última simulação realizada, foi avaliado o desempenho das modulações OTFS e OFDM em um cenário extremo de transmissão. Para essa análise, foi adotada uma modulação de alta ordem (256-QAM), em conjunto com um canal seletivo em frequência sob condições de alta mobilidade, além da presença de ruído impulsivo com fator de severidade $K = 10$.

O canal foi modelado como um canal multipercurso composto por três trajetórias de propagação, com atrasos discretos definidos como $[0, 1, 2]$ amostras e ganhos relativos $[1, 0,8, 0,6]$, representando um cenário com significativa dispersão em atraso e presença de componentes refletidas.

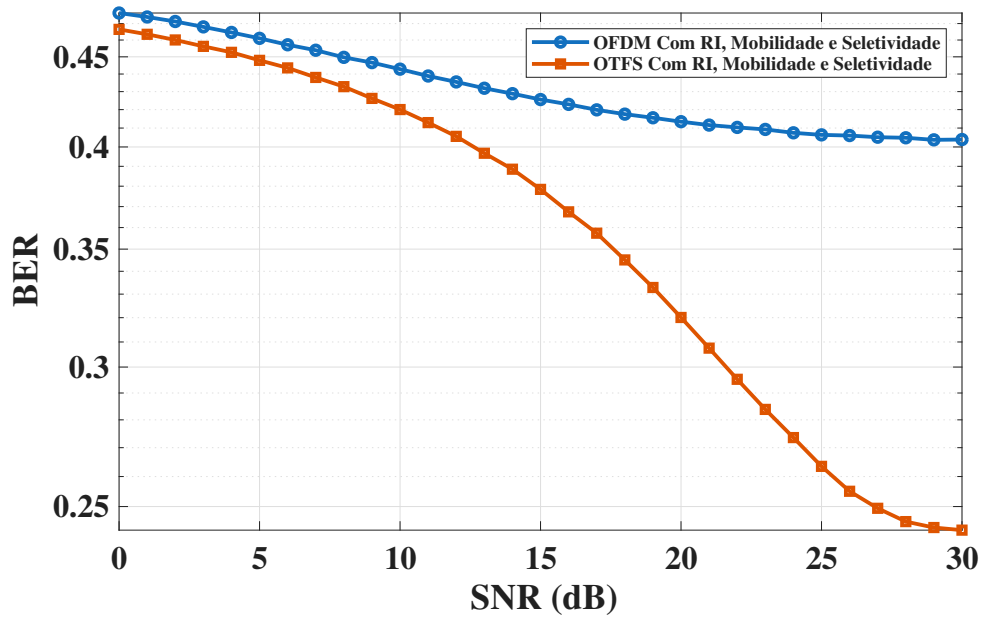
A mobilidade foi incorporada por meio de deslocamentos Doppler distintos para cada caminho de propagação, sendo considerados índices Doppler correspondentes a aproximadamente 399 km/h, caracterizando um canal fortemente variante no tempo.

Adicionalmente, a presença de ruído impulsivo introduz perturbações não gaussianas de alta amplitude, tornando o ambiente ainda mais desafiador para a transmissão.

Essa configuração combina simultaneamente múltiplos fatores críticos: (i) alta ordem de modulação, (ii) dispersão em atraso, (iii) variação temporal do canal e (iv) ruído impulsivo; caracterizando um cenário altamente adverso. Dessa forma, esse caso permite avaliar o desempenho das modulações em condições extremas, nas quais os efeitos degradantes atuam de forma conjunta e intensificada. Os resultados obtidos para ambas as técnicas avaliadas estão apresentados na Figura 4.6.



Figura 4.6: Cenário 6 – Desempenho em termos de BER das modulações OFDM e OTFS em um ambiente extremo, combinando modulação 256-QAM, mobilidade, seletividade em frequência (três caminhos de propagação) e ruído impulsivo com $K = 10$.



Fonte: O autor.

Por meio da análise dos resultados apresentados na Figura 4.6, observa-se o desempenho das modulações OFDM e OTFS em um cenário extremo, no qual coexistem alta mobilidade, seletividade em frequência, modulação de alta ordem e presença de ruído impulsivo.

Inicialmente, nota-se que ambos os sistemas apresentam alta BER em toda a faixa de SNR analisada, o que era esperado devido à combinação simultânea de múltiplos fatores adversos. No entanto, verifica-se uma diferença significativa no comportamento das modulações à medida que a SNR aumenta.

O sistema OFDM apresenta desempenho limitado, com redução relativamente lenta da BER, tendendo a um comportamento de saturação mesmo em valores elevados de SNR. Esse resultado indica que o sistema não consegue explorar adequadamente o ganho de SNR em um ambiente caracterizado pela presença simultânea de multipercursos, variação temporal do canal e ruído impulsivo.

Por outro lado, a modulação OTFS demonstra desempenho significativamente superior. Observa-se uma redução contínua da BER com o aumento da SNR, atingindo valores consideravelmente inferiores aos do OFDM, mesmo sob condições severas. Essa diferença torna-se mais pronunciada em regimes de SNR mais elevados, evidenciando a maior capacidade do OTFS de lidar com cenários altamente degradantes.

Esse comportamento decorre da capacidade do OTFS de manter desempenho consistente mesmo quando múltiplos efeitos degradantes atuam simultaneamente. Enquanto



o OFDM sofre limitações impostas pela combinação de perda de ortogonalidade, multipercurso e ruído impulsivo, o OTFS consegue aproveitar de forma mais eficiente a informação distribuída no sinal recebido, resultando em melhor desempenho global.

Dessa forma, os resultados evidenciam que, em condições extremas de transmissão, o OTFS apresenta vantagens substanciais em relação ao OFDM, sendo capaz de manter desempenho superior mesmo quando múltiplos efeitos degradantes atuam simultaneamente.



5 Conclusão

Este trabalho apresentou uma análise comparativa entre as modulações OFDM e OTFS em diferentes cenários de comunicação sem fio, considerando condições progressivamente mais desafiadoras, incluindo mobilidade, seletividade em frequência e presença de ruído impulsivo. As avaliações foram realizadas por meio de simulações computacionais em ambiente MATLAB, permitindo investigar de forma sistemática o impacto desses fatores no desempenho das modulações analisadas.

Nos cenários iniciais, caracterizados por canais planos e sem mobilidade, ambas as modulações apresentaram desempenhos semelhantes, evidenciando que, na ausência de efeitos degradantes significativos, o OFDM permanece como uma solução eficiente. Entretanto, com a introdução de mobilidade, observou-se degradação acentuada no desempenho do OFDM, associada principalmente à perda de ortogonalidade entre subportadoras e à consequente interferência interportadora.

A análise em canais seletivos em frequência mostrou que a presença de multipercurso pode introduzir ganhos limitados de diversidade para o OFDM, resultando em leve melhoria em relação ao caso puramente Doppler. Ainda assim, seu desempenho permanece significativamente limitado em cenários com variação temporal do canal.

Nos cenários com ruído impulsivo, verificou-se que tanto a intensidade quanto a frequência de ocorrência dos impulsos exercem influência direta na taxa de erro de bits. O aumento do parâmetro K resultou em degradação significativa do desempenho, enquanto valores mais elevados de β , associados a impulsos mais esparsos, proporcionaram melhores resultados. Nesses casos, observa-se que o desempenho relativo entre OTFS e OFDM depende da severidade do ruído impulsivo, sendo que o OFDM pode apresentar leve vantagem em regimes menos severos, enquanto o OTFS demonstra maior robustez à medida que a intensidade do ruído aumenta.

No cenário extremo, caracterizado pela combinação simultânea de alta ordem de modulação, seletividade em frequência, mobilidade elevada e presença de ruído impulsivo, os resultados evidenciaram de forma clara as limitações do OFDM, que apresentou comportamento de saturação da BER. Em contraste, o OTFS manteve capacidade de redução da taxa de erro com o aumento da SNR, mesmo sob condições severas.

De forma geral, os resultados obtidos indicam que o OTFS apresenta maior robustez em cenários adversos, sendo especialmente vantajoso em ambientes com alta mobilidade, multipercurso e interferências não gaussianas de alta intensidade. Esses resultados contribuem para o melhor entendimento do comportamento dessas modulações em condições realistas de operação, destacando o potencial do OTFS como alternativa ao OFDM em sistemas de comunicação sem fio de próxima geração, como as redes 6G.

Como continuidade deste trabalho, destacam-se as seguintes direções de pesquisa:

- Investigação de técnicas de detecção mais avançadas para o OTFS, incluindo méto-



dos não lineares e abordagens baseadas em aprendizado de máquina, com o objetivo de melhorar o desempenho em cenários severos;

- Avaliação do sistema em ambientes mais realistas, considerando imperfeições de hardware, erros de estimação de canal e validação experimental por meio de plataformas de rádio definido por software (*Software Defined Radio* - SDR);
- Extensão da análise para cenários com múltiplas antenas, explorando a combinação entre diversidade espacial e a representação no domínio atraso-Doppler;
- Exploração da integração entre comunicação e sensoriamento utilizando OTFS, investigando seu potencial em sistemas ISAC (Integrated Sensing and Communication), nos quais a mesma forma de onda pode ser utilizada simultaneamente para transmissão de dados e percepção do ambiente.



Referências

- [1] A. Chaoub, M. Giordani, B. Lall, V. Bhatia, A. Kliks, L. Mendes, K. Rabie, H. Sarnisaari, A. Singhal, N. Zhang, S. Dixit, and M. Zorzi, “6g for bridging the digital divide: Wireless connectivity to remote areas,” *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 29, no. 1, pp. 160–168, 2022.
- [2] Y. Chen, L. Zhao, Y. Jiang, W. Li, H. Gao, and C. Liu, “OtfS waveform based on 3-d signal constellation for time-variant channels,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 27, no. 8, pp. 1999–2003, 2023.
- [3] Z. Wang, H. Wang, Q. Tang, Q. Peng, Y. Zhang, and M. Cao, “Spectrally efficient optical OTFS with enhanced joint delay-doppler index modulation,” *IEEE Photonics Technology Letters*, 2025.
- [4] M. Bayat, S. P. S., and A. Farhang, “Time and frequency synchronization for multi-user OTFS in uplink,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. PP, no. 99, pp. 1–17, 2025.
- [5] Y. Liu, C. Dong, H. Liang, W. Li, X. Xu, and P. Zhang, “Semantic communication for high-speed mobility scenarios: A semantic-OTFS scheme,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. PP, no. 99, pp. 1–15, 2026.
- [6] B. M. Lee, “OTFS with emerging technologies for high-mobility IoT networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. PP, no. 99, pp. 1–7, 2026.
- [7] R. Hadani, S. Rakib, M. Tsatsanis, A. Monk, A. J. Goldsmith, A. F. Molisch, and R. Calderbank, “Orthogonal time frequency space modulation,” in *2017 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2017, pp. 1–6.
- [8] P. Raviteja, E. Viterbo, and Y. Hong, “Interference cancellation and iterative detection for orthogonal time frequency space modulation,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 10, pp. 6501–6515, 2018.
- [9] K. R. Murali and A. Chockalingam, “On ofts modulation for high-doppler fading channels,” in *2018 Information Theory and Applications Workshop (ITA)*, 2018, pp. 1–10.
- [10] W. Shen, L. Dai, J. An, P. Fan, and R. W. Heath, “Channel estimation for orthogonal time frequency space (otfs) massive mimo,” *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 67, no. 16, pp. 4204–4217, 2019.



- [11] V. Yogesh, V. S. Bhat, S. R. Mattu, and A. Chockalingam, “On the bit error performance of ofts modulation using discrete zak transform,” in *ICC 2023 – IEEE International Conference on Communications*, 2023, pp. 741–746.
- [12] V. S. Bhat and A. Chockalingam, “Ris-aided ofts with index modulation,” in *2024 IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*, 2024, pp. 1–6.
- [13] P. Torío and M. García Sánchez, “Generating impulsive noise [wireless corner],” *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 52, no. 4, pp. 168–173, 2010.
- [14] W. Yuan, S. Li, Z. Wei, Y. Cui, J. Jiang, H. Zhang, and P. Fan, “New delay doppler communication paradigm in 6g era: A survey of orthogonal time frequency space (otfs),” *China Commun.*, vol. 20, no. 6, pp. 1–25, 2023.
- [15] N. LaSorte, W. J. Barnes, and H. H. Refai, “The history of orthogonal frequency division multiplexing,” in *2008 IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM)*, 2008, pp. 1–5.
- [16] F. Buchali, R. Dischler, and X. Liu, “Optical ofdm: A promising high-speed optical transport technology,” *Bell Labs Technical Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 125–146, 2009.
- [17] R. Hadani, S. Rakib, S. Kons, M. Tsatsanis, A. Monk, C. Ibars, J. Delfeld, Y. Hebron, A. J. Goldsmith, A. F. Molisch, and R. Calderbank, “Orthogonal time frequency space modulation,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 4, pp. 2583–2598, 2018.
- [18] R. R. Davis and O. Clavier, “Impulsive noise: A brief review,” *Hearing Research*, vol. 349, pp. 34–36, 2017.
- [19] 3GPP, “NR; Physical Channels and Modulation,” 3rd Generation Partnership Project, Technical Specification TS 38.211, 2024.

ANEXOS

A Código MATLAB utilizado no Cenário 1

```
1 %% CENARIO 1 - OFDM vs OTFS
2 % Canal plano com um unico percurso
3 % Comparacao entre:
4 %   - sem mobilidade
5 %   - com mobilidade (~133 km/h)
6 % 64-QAM
7 %
```



```
8 % Requer no path:
9 %   helperOTFSmod
10 %   helperOTFSdemod
11 %   dopplerChannel
12 %   getG
13 %   ofdmmod
14 %   ofdmdemod
15
16 clear; close all; clc;
17 rng(1,'twister');
18
19 %% Parametros gerais
20 M      = 64;
21 N      = 30;
22 df     = 15e3;
23 fc     = 3.5e9;
24 fsamp  = M*df;
25 padLen = 10;
26 padType = 'CP';
27
28 if strcmp(padType,'CP')
29     offset = padLen;
30 else
31     offset = 0;
32 end
33
34 Meff    = M + padLen;
35 numSamps = Meff*N;
36 T       = (M + padLen)/(M*df);
37
38 Morder  = 64;
39 k_bits  = log2(Morder);
40
41 SNRdB_vec = 0:1:30;
42 numIter  = 250;
43
44 dopplerCases = [0 1];
45 caseNames    = {'Sem Mobilidade','Com Mobilidade'};
46
47 BER_OFDM = zeros(length(dopplerCases), length(SNRdB_vec));
48 BER_OTFS = zeros(length(dopplerCases), length(SNRdB_vec));
49
50 %% Loop nos casos de mobilidade
51 for c = 1:length(dopplerCases)
52
53     chanParams.pathDelays = [0];
54     chanParams.pathGains  = [1];
55     chanParams.pathDopplers = [dopplerCases(c)];
56     chanParams.pathDopplerFreqs = chanParams.pathDopplers * 1/(N*T);
57
58     [chanEst, Hofdm] = estimate_channels(M,N,padLen,padType,offset,fsamp,chanParams);
59     G = getG(M,N,chanEst,padLen,padType);
60     Gt = G';
61     GtG = Gt*G;
62
63     fprintf('\n=====\\n');
64     fprintf('Caso: %s\\n', caseNames{c});
65     fprintf('Doppler index = %d\\n', dopplerCases(c));
66     fprintf('=====\\n');
67
```



```
68     for idxSNR = 1:length(SNRdB_vec)
69
70         SNRdB = SNRdB_vec(idxSNR);
71         n0     = 1/(10^(SNRdB/10));
72
73         Eq_Matrix = (GtG + n0*eye(Meff*N)) \ Gt;
74
75         bitErrOFDM = 0;
76         bitErrOTFS = 0;
77         totalBits = 0;
78
79         for iter = 1:numIter
80
81             TxBits = randi([0 1], k_bits*M*N, 1);
82             txSym = bi2de(reshape(TxBits, k_bits, []).', 'left-msb');
83             txQAM = qammod(txSym, Morder, 'gray', 'UnitAveragePower', true);
84             Xgrid = reshape(txQAM, M, N);
85
86             %% OFDM
87             txOfdm = ofdmmod(Xgrid, M, padLen);
88             chOfdm = dopplerChannel(txOfdm, fsamp, chanParams);
89             rxOfdm = awgn(chOfdm, SNRdB, 'measured');
90
91             Yofdm = ofdmmod(rxOfdm(1:(M+padLen)*N), M, padLen);
92             Xhat_ofdm = conj(Hofdm).*Yofdm ./ (abs(Hofdm).^2 + n0);
93
94             rxSym_ofdm = qamdemod(Xhat_ofdm(:), Morder, 'gray', 'UnitAveragePower', true);
95             rxBits_ofdm = de2bi(rxSym_ofdm, k_bits, 'left-msb');
96             rxBits_ofdm = reshape(rxBits_ofdm.', [], 1);
97
98             %% OTFS
99             txOtfs = helperOTFSmod(Xgrid, padLen, padType);
100            chOtfs = dopplerChannel(txOtfs, fsamp, chanParams);
101            rxOtfs = awgn(chOtfs, SNRdB, 'measured');
102
103            y_otfs = Eq_Matrix * rxOtfs(1:numSamps);
104            Xhat_otfs = helperOTFSdemod(y_otfs, M, padLen, offset, padType);
105
106            rxSym_otfs = qamdemod(Xhat_otfs(:), Morder, 'gray', 'UnitAveragePower', true);
107            rxBits_otfs = de2bi(rxSym_otfs, k_bits, 'left-msb');
108            rxBits_otfs = reshape(rxBits_otfs.', [], 1);
109
110            bitErrOFDM = bitErrOFDM + nnz(TxBits ~= rxBits_ofdm);
111            bitErrOTFS = bitErrOTFS + nnz(TxBits ~= rxBits_otfs);
112            totalBits = totalBits + length(TxBits);
113        end
114
115        BER_OFDM(c,idxSNR) = bitErrOFDM/totalBits;
116        BER_OTFS(c,idxSNR) = bitErrOTFS/totalBits;
117
118        fprintf('SNR = %2d dB | OFDM = %.4e | OTFS = %.4e\n', ...
119            SNRdB, BER_OFDM(c,idxSNR), BER_OTFS(c,idxSNR));
120    end
121 end
122
123 %% Plot final
124 figure('Color','w');
125 semilogy(SNRdB_vec, BER_OFDM(1,:), '-o', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize', 5);
126 hold on;
127 semilogy(SNRdB_vec, BER_OTFS(1,:), '-s', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize', 5);
```



```
128 semilogy(SNRdB_vec, BER_OFDM(2,:), '-o', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize', 5);
129 semilogy(SNRdB_vec, BER_OTFS(2,:), '-s', 'LineWidth', 1.8, 'MarkerSize', 5);
130 grid on; box on;
131 set(gca,'YScale','log');
132 xlabel('SNR (dB)');
133 ylabel('BER');
134 legend('OFDM - Sem Mobilidade', ...
135        'OTFS - Sem Mobilidade', ...
136        'OFDM - Com Mobilidade', ...
137        'OTFS - Com Mobilidade', ...
138        'Location','southwest');
139 title('BER vs SNR - Cenario 1');
140 xlim([0 30]);
141 ylim([1e-5 1]);
142
143 %% Funcao local de estimacao de canal
144 function [chanEst, Hofdm] = estimate_channels(M,N,padLen,padType,offset,fsamp,chanParams)
145
146     if strcmp(padType,'CP') || strcmp(padType,'ZP')
147         Meff = M + padLen;
148         numSamps = Meff*N;
149     else
150         Meff = M;
151         numSamps = M*N + padLen;
152     end
153
154     SNR_est = 1000;
155     n0_est = 1/(10^(SNR_est/10));
156
157     % Estimacao OTFS
158     pilotBin = floor(N/2) + 1;
159     Pdd = zeros(M,N);
160     Pdd(1,pilotBin) = M*N*exp(1i*pi/4);
161
162     txPilotOtfs = helperOTFSmod(Pdd, padLen, padType);
163     chPilotOtfs = dopplerChannel(txPilotOtfs, fsamp, chanParams);
164     rxPilotOtfs = awgn(chPilotOtfs, SNR_est, 'measured');
165
166     Ydd = helperOTFSdemod(rxPilotOtfs(1:numSamps), M, padLen, offset, padType);
167     Hdd = Ydd * conj(Pdd(1,pilotBin)) / (abs(Pdd(1,pilotBin))^2 + n0_est);
168
169     [lp,vp] = find(abs(Hdd) >= 0.05);
170     chanEst.pathGains = diag(Hdd(lp,vp));
171     chanEst.pathDelays = lp - 1;
172     chanEst.pathDopplers = vp - pilotBin;
173
174     % Estimacao OFDM
175     txpilot = exp(1i*pi/4) * ones(M,N);
176     txPilotOfdm = ofdmmod(txpilot, M, padLen);
177     chPilotOfdm = dopplerChannel(txPilotOfdm, fsamp, chanParams);
178     rxPilotOfdm = awgn(chPilotOfdm, SNR_est, 'measured');
179
180     Yofdm = ofdmmod(rxPilotOfdm(1:(M+padLen)*N), M, padLen);
181     Hofdm = Yofdm * conj(txpilot(1,1)) / (abs(txpilot(1,1))^2 + n0_est);
182 end
183
```



B Declaração Sobre o Uso de Inteligência Artificial



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações - Patos de Minas



ANEXO I - Declaração sobre o Uso de Inteligência Artificial

Aluno (a): Breno César Cortez Martinez
Matrícula: 41911ETE017
Título PFCII: COMPARAÇÃO DE DESEMPENHO ENTRE AS MODULAÇÕES OTFS E OFDM EM C
ANAIS DE ALTA MOBILIDADE COM ADIÇÃO DE RUÍDO IMPULSIVO

Eu, aluno(a) com nome e matrícula supracitados, e com o respectivo trabalho de PFCII, declaro para os devidos fins que as informações prestadas a seguir refletem de forma verídica e completa o uso ou não uso de ferramentas de Inteligência Artificial neste trabalho, em conformidade com a Resolução COLCGETPM N° 19, DE 17 DE DEZEMBRO DE 2025.

SELECIONE UMA DAS OPÇÕES A SEGUIR:
☐ NÃO HOUVE USO DE FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL <i>(Se marcar esta opção, não é necessário preencher os campos 1 a 4)</i> Declaro que não utilizei, em nenhuma etapa do desenvolvimento do presente trabalho, ferramentas de Inteligência Artificial para qualquer finalidade e assumo integral responsabilidade pelo conteúdo.
☒ HOUE USO DE FERRAMENTAS DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL <i>(Preencher os campos obrigatórios abaixo, assinalando obrigatoriamente os itens 3 e 4)</i> Declaro que utilizei, durante o desenvolvimento do presente trabalho, as seguintes ferramentas de Inteligência Artificial e informações descritas nos itens de 1 a 4.

1. Ferramenta(s) e Chat-GPT (Openla)
versão(ões) predominante(s): GPT Thinking

2. Propósito(s) (marque todos os que se aplicam):

- ☐ Exploração inicial de ideias.
- ☒ Busca de referências bibliográficas.
- ☒ Revisão de linguagem (por exemplo, melhoria de gramática ou correção de ortografia).
- ☐ Tradução técnica (conversão do texto ou partes dele para outro idioma).
- ☐ Geração automatizada de tabelas, gráficos ou figuras a partir de dados previamente analisados pelos autores.
- ☒ Programação: sugestão, depuração e documentação de códigos computacionais.
- ☐ Outros (especificar): _____



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações - Patos de Minas



3. Autoria e validação humana:

☒ Informo que a autoria intelectual do manuscrito, bem como sua supervisão e validação, são de minha responsabilidade e que o uso de ferramentas de IA foi exclusivamente para os propósitos acima declarados.

4. Princípios éticos:

☒ Declaro que a utilização das ferramentas de IA seguiu práticas éticas, não incluindo atividades que comprometam a integridade científica tais como a geração de conteúdo original, manipulação de dados, plágio, interpretações ou análises pela IA.

☒ Declaro que respeitei direitos autorais, licenças, confidencialidade e políticas editoriais.

☒ Declaro que não enviei dados inéditos ou sensíveis à serviços que utilizam conteúdos para treinamento de modelos, exceto em plataformas institucionais ou com garantias contratuais de confidencialidade e não retenção, assegurando conformidade com a LGPD (Lei nº 13.709/2018) e demais normas de proteção de dados.

Data: 12/04/2026

Documento assinado digitalmente
 BRENO CESAR CORTES MARTINEZ
Data: 12/04/2026 12:22:57-0300
Verifique em <https://validar.jbs.gov.br>

Assinatura do(a) Discente