



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Estudo, implementação e análise do sistema de comunicação OFDM

Weverton Domingos de Medeiros

Campina Grande, PB

Maio de 2021

Weverton Domingos de Medeiros

Estudo, implementação e análise do sistema de comunicação OFDM

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Telecomunicações

Orientador: Edson Porto da Silva

Campina Grande, PB

Maio de 2021

Weverton Domingos de Medeiros

Estudo, implementação e análise do sistema de comunicação OFDM

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, Campus Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Graduado em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado em: ____ / ____ / ____

Orientador: Prof. Dr. Edson Porto
Universidade Federal de Campina Grande -
UFCG

Convidado(a): Prof(a). Dr(a).

Campina Grande, PB
Maio de 2021

Dedico este trabalho aos meus pais, Francisca Silva de Medeiros e Washington Domingos de Medeiros, à meus irmãos Gabriel Domingos de Medeiros e Wemerson Kainan Andrade de Medeiros e a Mike, meu fiel amigo e companheiro.

Agradecimentos

Agradeço a minha família por todo apoio durante minha jornada acadêmica e de vida, me mostrando desde cedo a importância da educação em minha vida, um obrigado pelo apoio durante os anos de graduação. Muito obrigado a minha mãe e papai, Biel, Wemerson e Mike.

Aos meus professores por todo aprendizado e oportunidades que me foram proporcionadas. Agradecimento especial ao professor Edson, que me orientou nesse trabalho de conclusão de curso; ao professor Edmar que me acompanhou como orientador de pesquisa e como voluntário IEEE; ao professor Leocarlos pelos ensinamentos enquanto orientador de pesquisa; ao professor Raimundo Freire por ter me recebido em seu laboratório quando eu ainda estava no primeiro semestre de curso, pelas oportunidades e por todos os ensinamentos.

Aos meus amigos de curso, em sua maioria do mesmo semestre que o meu, gratidão pela parceria, companhia nos momentos difíceis e de muita felicidade que foram enfrentados ao longo da graduação. Aprendi muito com todos vocês. Agradeço às pessoas incríveis que encontrei nos grupos IEEE UFCG, principalmente o Ramo Estudantil IEEE UFCG, IEEE WIE UFCG e IEEE APS UFCG, que tornaram os dias mais fáceis, proporcionando a mim uma rede de suporte fundamental para o meu desenvolvimento pessoal e profissional. Muito obrigado a vocês: Wis, Alisa, Marianne Prin, Camila Abrantes, Vany, Camila Pereira meus eternos confidentes. Aos meus queridos amigos de curso e de vida: Andhré, Arllan, Taís, Silvia, Marília, Clarinha, Larissa Lima, Márcia Laís, Lara Rocha, Iago Batista. Foram muitas pessoas especiais que cruzaram meu caminho e por isso sou muito grato.

Agradeço também à Júnior por ter sido meu companheiro, apoio e fonte de forças, com quem pude dividir as adversidades e conquistas encontradas na minha jornada acadêmica. À Thayanna (vilage), minha comadre, obrigado por existir, não sei o que seria de mim sem nossos áudios 'podcasts' para desabafar e tirar onda sobre a vida. À Anna, Guigui, Lenny, Leon e Samu por serem os melhores amigos do mundo. À tia Gorete que sempre se mostrou presente em minha vida, me apoiando e feliz com minhas conquistas.

Resumo

A OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é uma técnica multi-portadora que permite realizar a transmissão paralela dos dados em múltiplas subportadoras moduladas, sendo aplicada em sistemas de comunicações digitais por ser eficiente na mitigação da interferência intersímbolo. Nessa técnica, cada subportadora transmitida possui taxa de transmissão mais baixa em cada subcanal quando comparada ao esquema de transmissão serial. Dessa forma o símbolo transmitido tem maior duração, tornando o sistema robusto contra a seletividade em frequência e facilitando a equalização do canal. Apesar da robustez, os símbolos OFDM podem apresentar distorções causadas pelo canal de comunicação, sendo necessária a aplicação de técnicas de estimação e equalização, inserção de subportadoras pilotos e intervalo de guarda para que haja detecção coerente do sinal transmitido. Foi proposto para este trabalho o estudo, implementação e análise do sistema OFDM com o objetivo de compreender essa técnica usada nos atuais sistemas de comunicações. Para isso, foi desenvolvido o sistema de comunicação OFDM para transmissão dos símbolos por um canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*). As simulações implementadas foram feitas em *software* utilizando a linguagem Python, em que foram levantadas curvas de desempenho teóricas e simuladas e, por meio delas e de toda a fundamentação teórica feita, foi possível observar a importância do uso da técnica OFDM.

Palavras-chave: OFDM, Subportadoras, Portadoras pilotos, AWGN.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Espectros de um sinal FDM e OFDM [Armstrong 2009]	15
Figura 2 – Diagrama de blocos de um sistema de comunicações OFDM, baseado em [Armstrong 2009].	16
Figura 3 – Prefixo cíclico no símbolo OFDM [Análise comparativa entre os sistemas ofdm e fbmc na transmissão de tv, author=Arndt, D., year=2012] . . .	19
Figura 4 – Em preto tem-se o canal real, em vermelho a função inversa do canal e em azul o produto do canal pela sua função inversa [Valentim 2010] .	20
Figura 5 – Ambiente com múltiplos percursos, baseado e adaptado de [Malta 2010]	21
Figura 6 – PDF da função com distribuição Rayleigh, baseado em [Proakis e Salehi 2008]	22
Figura 7 – Perfil de atraso para o Canal Brasil B na recepção do sistema, em [Guimarães e Gomes 2006]	23
Figura 8 – Método de arranjo de subportadora piloto <i>Comb type</i> , baseado em [Shen e Martinez 2006]	26
Figura 9 – Função de transferência do canal via interpolação [Malta 2010]	27
Figura 10 – Diagrama de blocos usado para a simulação desenvolvida. Adaptado de [Armstrong 2009].	30
Figura 11 – Espectro de frequências do ruído AWGN e da saída do canal AWGN. (Próprio autor).	32
Figura 12 – Curvas do sinal na saída do filtro formatador de pulso (sinal) e na saída do canal AWGN (sinal + ruído). SNR = 6dB. (Próprio autor).	33
Figura 13 – Curvas do sinal na saída do filtro formatador de pulso (sinal) e na saída do canal AWGN (sinal + ruído). SNR = 18dB. (Próprio autor).	33
Figura 14 – Curvas do sinal na saída do filtro formatador de pulso (sinal) e na saída do filtro casado. SNR = 6dB. (Próprio autor).	34
Figura 15 – Curvas do sinal na saída do filtro formatador de pulso (sinal) e na saída do filtro casado. SNR = 18dB. (Próprio autor).	34
Figura 16 – Constelação 64-QAM de todas as subportadoras após a demodulação dos símbolos OFDM no receptor. (Próprio autor).	37

Figura 17 – Constelação 64-QAM das subportadoras de informação útil na recepção. (Próprio autor).	37
Figura 18 – Curva de desempenho BER pela SNR de uma constelação 64-QAM para o sistema OFDM AWGN. (Próprio autor).	38
Figura 19 – Constelação 16-QAM de todas as subportadoras após a demodulação dos símbolos OFDM no receptor. (Próprio autor).	38
Figura 20 – Constelação 16-QAM das subportadoras de informação útil na recepção. (Próprio autor).	39
Figura 21 – Curva de desempenho BER pela SNR de uma constelação 16-QAM para o sistema OFDM AWGN. (Próprio autor).	39
Figura 22 – Filtro do cosseno levantado usado para formatar os símbolos transmiti- dos. $\alpha = 0.01$ e o número de coeficientes $N = 2048$. (Próprio autor).	40
Figura 23 – Espectro de frequência do filtro cosseno levantado para $\alpha = 0.01$ e $N =$ 2048 . (Próprio autor).	40
Figura 24 – Constelação 64-QAM das subportadoras no receptor após o filtro casado, para a taxa de amostragem de $SpS = 1$ amostra/símbolo. (Próprio autor). 41	41
Figura 25 – Constelação 64-QAM das subportadoras de informação útil na recepção após o filtro casado, para a taxa de amostragem de $SpS = 8$ amostras/ símbolo. (Próprio autor).	42
Figura 26 – BER \times SNR para uma constelação 64-QAM com implementação dos filtros para diferentes taxas de amostragens (SpS). (Próprio autor)	42
Figura 27 – Espectro em frequências do filtro formatador de pulso para $N = 1024$ e $\alpha = 0.01$. (Próprio autor).	43
Figura 28 – Espectro em frequências do filtro formatador de pulso para $N = 128$ e $\alpha = 0.01$. (Próprio autor).	43

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	12
1.1.1	Objetivo Geral	12
1.1.2	Objetivos Específicos	12
1.2	Organização do texto	12
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	OFDM (<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>)	15
2.1.1	Descrição do Sistema OFDM	16
2.1.2	Intervalo de Guarda e Prefixo Cíclico	18
2.1.3	Equalização	19
2.2	O canal de comunicação sem fio	20
2.2.1	Múltiplos percursos e modelo do canal móvel	21
2.2.2	Desvanecimento Seletivo em Frequência	23
2.3	Estimação de Canal	24
2.3.1	Definição e Distribuição das Portadoras Pilotos	25
2.3.2	Interpolação de Canal	27
2.4	Considerações	28
3	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	29
3.1	Algoritmo Simulado	29
3.1.1	Transmissão	30
3.1.2	Canal	32
3.1.3	Recepção	34
3.2	Resultados	35
3.2.1	Canal AWGN	36
3.2.2	Canal AWGN com Filtro Formatador de Pulso e Filtro Casado	39
4	CONCLUSÕES	45
4.1	Trabalhos Futuros	46

REFERÊNCIAS	47
ANEXOS	48
ANEXO A – FUNÇÕES E SISTEMA OFDM DESENVOLVIDO .	51

1 Introdução

O aumento na demanda por transmissão com alta taxa de *bits* nas comunicações digitais móveis tem motivado o desenvolvimento de novas técnicas para melhorar o desempenho dos sistemas de comunicação [Madhow 2008], o que motivou o surgimento da multiplexação por divisão de frequências ortogonais (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - OFDM). A técnica OFDM é a evolução da convencional técnica de multiplexação por divisão de frequência (*Frequency Division Multiplexing* - FDM), que possui pouca eficiência espectral e é caracterizada pela transmissão serial dos sinais [Bahai, Saltzberg e Ergen 2006, Pinto e Albuquerque 2002].

OFDM é uma técnica de modulação multi-portadora, cujo princípio básico é a transmissão paralela dos dados por meio de subportadoras em diferentes frequências, aplicando modulação em quadratura (*Quadrature Amplitude Modulation* - QAM) ou modulação de fase (*Phase Shift Keying* - PSK). Graças a ortogonalidade entre as subportadoras, a informação conduzida por cada uma delas pode ser identificada sem erro, fazendo uso de um filtro adequado [Pinto e Albuquerque 2002].

Esse método é amplamente utilizado em sistemas de comunicação *wireless* banda larga, pois, apesar da baixa taxa de símbolos das subportadoras, o tempo de duração do sinal é maior do que em sistemas seriais, sendo, portanto, menos susceptível à interferência inter-símbolo (*Intersymbol Interference* - ISI) causada por canais dispersivos [Armstrong 2009, Bahai, Saltzberg e Ergen 2006]. Por conta do período do símbolo ser maior, o processo de equalização se torna mais simples [Armstrong 2009].

O OFDM tem sido aplicado a diversas tecnologias tais como o padrão de WLAN IEEE 802.11a, além de tecnologias celulares como LTE (*Long Term Evolution*) e o novo padrão 5G-NR, ambos desenvolvidos pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) [3GPP 2020]. O OFDM é um dos pilares para a revolução da tecnologia 5G, pois, por meio da implementação de um OFDM dinâmico é possível criar um sistema de comunicação em alta frequência robusto à ruídos. Isso acontece a partir da divisão dinâmica do tempo, em que o *slot* de duração do símbolo pode ser dividido em *mini-slots* de durações variáveis, provendo assim uma comunicação de baixa latência e confiável [Campos et al. 2020].

Sendo utilizado no atual cenário de telecomunicações, o sistema OFDM conta com o desenvolvimento e aplicação de diferentes métodos para o sua eficácia na atenuação dos efeitos devido à natureza do canal, a exemplo da estimação e equalização do canal e o uso de intervalo de guarda [Armstrong 2009].

Neste trabalho são propostas a análise e a implementação da técnica OFDM, usada para mitigar a seletividade de canais de comunicação sem fio. O desenvolvimento e análise serão feitos numericamente e analiticamente - em *software*.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Estudar o funcionamento do sistema OFDM e implementá-lo em *software* para avaliação do desempenho do sistema ao transmitir símbolos em um canal AWGN.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar o sistema de comunicação OFDM;
- Entender a importância das técnicas utilizadas para o funcionamento do sistema na transmissão em canal ruidoso, sendo elas:
 - Estimação e equalização do canal;
 - Introdução do intervalo de guarda;
 - Aplicação do filtro formatador de pulso e do filtro casado.
- Implementar o sistema OFDM atribuindo-se o sincronismo entre o transmissor e o receptor;
- Avaliar o desempenho do sistema OFDM para um canal AWGN.

1.2 Organização do texto

O presente trabalho está organizado em 4 capítulos. No Capítulo 1 é feita uma introdução do sistema OFDM e da sua importância no atual cenário de telecomunicações.

No Capítulo 2 é feita a fundamentação teórica sobre quais os blocos de algoritmos são responsáveis por garantir a eficiência dessa técnica de modulação para sistemas com altas taxas de transmissão, como o uso de subportadoras pilotos e o intervalo de guarda. Além disso, é falado também sobre os canais de comunicação sem fio e como ocorrem algumas perdas no sinal geradas pelo canal.

No Capítulo 3 é feita a apresentação do sistema OFDM desenvolvido e simulado, além da discussão dos resultados de desempenho do sistema para diferentes situações.

No Capítulo 4 são feitas as considerações finais acerca do trabalho.

2 Fundamentação Teórica

2.1 OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*)

Proposta inicialmente em 1968, OFDM é uma técnica desenvolvida para os sistemas de telecomunicações que é empregada em radiodifusão, comunicação *wireless* locais e transmissão digital [Pinto e Albuquerque 2002]. OFDM compreende a técnica de realizar a transmissão paralela dos dados em múltiplas subportadoras moduladas, QAM ou PSK, estando em diferentes frequências, definidas como ortogonais entre si [Pinto e Albuquerque 2002]. Isso torna-a uma solução eficiente para o problema de interferência inter-símbolo (*Intersymbol Interference* - ISI), causado por canais dispersivos, isto é, mesmo que haja sobreposição das subportadoras, as informações dessas podem ser individualmente filtradas e separadas [Armstrong 2009].

Foi desenvolvida como sendo uma evolução da técnica FDM, que fazia uso da banda de segurança entre as frequências dos sinais, gerando desperdício espectral [Pinto e Albuquerque 2002]. Na técnica OFDM não se faz necessário inserir um intervalo de guarda entre as subportadoras, pois, mesmo que possuam sobreposição no espectro, podem ser demoduladas sem interferência [Armstrong 2009]. Conforme apresentado na Figura 1, essa é a razão pela vantagem da economia de banda ao aplicar a técnica OFDM, quando comparada à técnica FDM.

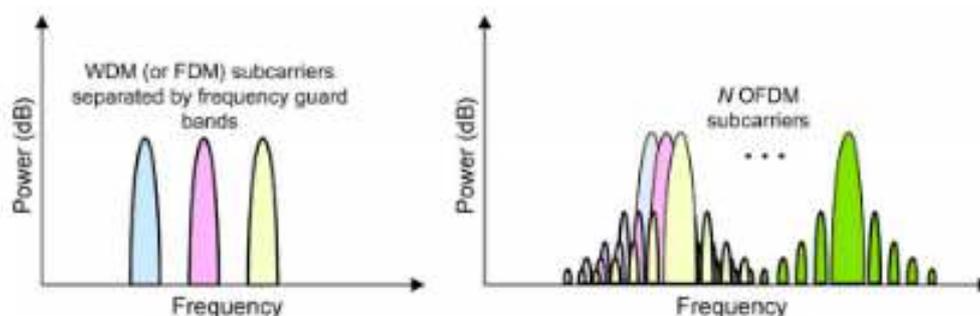


Figura 1 – Espectros de um sinal FDM e OFDM [Armstrong 2009]

Em relação a outras técnicas, OFDM apresenta melhor eficiência espectral que pode ser obtida estimando a taxa de transmissão do canal a partir do inverso do período do

símbolo OFDM. Com a finalidade de alcançar uma boa eficiência espectral, faz-se uso do pulso retangular para a transmissão dos símbolos OFDM, cuja representação em frequência é a função *sinc*. O espectro de uma subportadora OFDM tem a forma $|\frac{\sin x}{x}|^2$, possuindo lóbulos laterais significantes, o que ocasiona uma das principais desvantagens da técnica OFDM: alta sensibilidade para deslocamento em frequência e ruído de fase [Armstrong 2009].

Uma importante vantagem do OFDM é que há a transferência da complexidade dos transmissores e receptores do domínio analógico para digital. O desenvolvimento dos processadores de sinais digitais (*Digital Signal Processors* - DSP) simplificou o uso da técnica OFDM, pois passou a ser possível implementá-la digitalmente fazendo uso dos algoritmos da transformada rápida inversa de Fourier (*Inverse Fast Fourier Transform* - IFFT) na modulação e da transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* - FFT) na demodulação, desprezando o uso de osciladores.

2.1.1 Descrição do Sistema OFDM

A implementação do sistema de comunicação OFDM segue o diagrama de blocos apresentado na Figura 2.

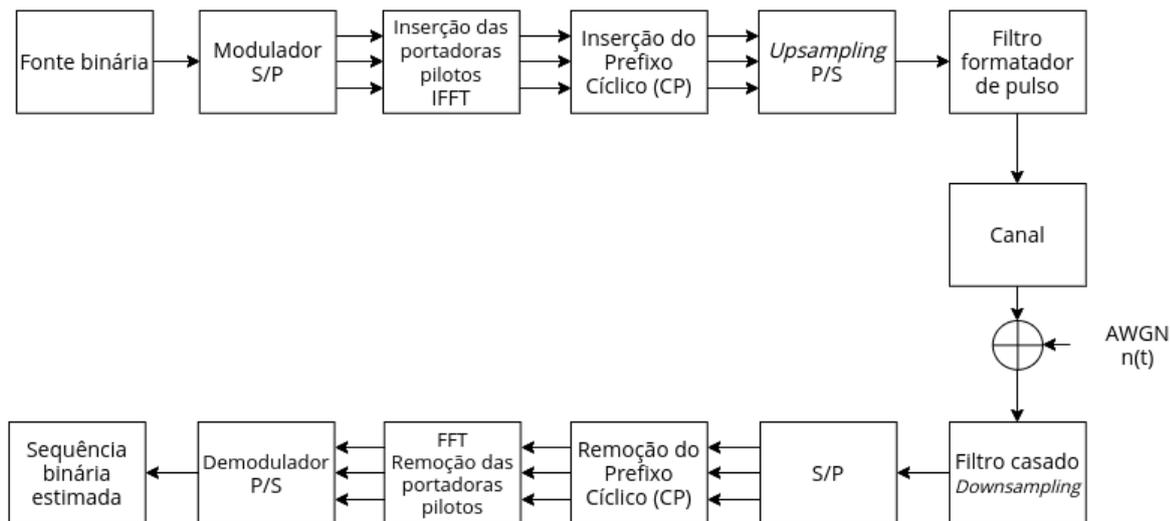


Figura 2 – Diagrama de blocos de um sistema de comunicações OFDM, baseado em [Armstrong 2009].

Inicialmente o fluxo de *bits* é modulado digitalmente seguindo um esquema de modulação específico, usualmente sendo PSK ou QAM. Neste trabalho será realizado o

estudo do sistema de comunicação OFDM com modulação QAM. Na saída do modulador tem-se a constelação composta por símbolos complexos, em que cada ponto da constelação corresponde a um símbolo OFDM, a partir dos *bits*, sendo a contagem de *bit* por ponto da constelação definida a partir do tipo de modulação aplicada [Lathi 1998]. Os pontos da constelação QAM são mapeados seguindo o código Gray em que os *bits* transmitidos por pontos da constelação adjacentes diferem por apenas 1 *bit*, tornando o sistema de transmissão menos susceptível a ruído [Lathi 1998].

Então, o vetor de símbolos \mathbf{X} portadores de informação, de tamanho N , é convertido de serial para paralelo (S/P) tornando-se $\mathbf{X} = [X_0 X_1 \dots X_{N-1}]^T$, sendo cada sinal $X_k, k = 0, 1, \dots, N$ uma subportadora. Os elementos do vetor \mathbf{X} representam a informação a ser carregada na correspondente subportadora. Pode-se ainda observar que cada elemento de \mathbf{X} é um ponto da constelação [Armstrong 2009]. A IFFT trata-se de uma implementação eficiente da transformada discreta inversa de Fourier (*Inverse Discrete Fourier Transform* - IDFT), sendo um dos blocos mais importantes no sistema de transmissão OFDM que, juntamente à FFT, difere OFDM de sistemas de portadora única [Bahai, Saltzberg e Ergen 2006]. Matematicamente a IFFT é definida por [Armstrong 2009]:

$$x_m = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=0}^{N-1} X_k \exp \frac{j2\pi km}{N} \quad (2.1)$$

para $0 \leq m \leq N - 1$, sendo $\mathbf{x}(k) = [x_0 x_1 \dots x_{N-1}]^T$ o vetor complexo no domínio do tempo discreto na saída da IFFT.

Logo após a geração do símbolo OFDM acontece a inserção do prefixo cíclico no início de cada símbolo OFDM no domínio do tempo, antes da transmissão. O prefixo cíclico compreende uma parcela das amostras do final do símbolo OFDM. Dessa forma, ao invés de transmitir $\mathbf{x}(k) = [x_0 x_1 \dots x_{N-1}]^T$, o que decorre é a transmissão de $\mathbf{x}_{CP}(k) = [x_{N-G} \dots x_{N-1} x_0 x_1 \dots x_{N-1}]^T$, sendo G o tamanho do CP. Na sequência é feita a conversão paralela-serial (P/S) e a transmissão do sinal pelo canal de comunicação com ruído aditivo Gaussiano branco (*Additive White Gaussian Noise* - AWGN).

Na recepção são realizadas as operações inversas daquelas feitas na transmissão. É aplicada a conversão S/P e a remoção do prefixo cíclico, tendo assim como resultado o vetor $y(k)$ de comprimento N , o mesmo do vetor $x(k)$ [Bahai, Saltzberg e Ergen 2006]. O sinal OFDM é finalmente transformado nas amostras de informação no domínio da

frequência por meio da aplicação da FFT, expressa matematicamente por [Armstrong 2009]:

$$Y_k = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=0}^{N-1} y_m \exp \frac{-j2\pi km}{N} \quad (2.2)$$

para $0 \leq m \leq N - 1$, sendo $\mathbf{Y} = [Y_0 Y_1 \dots Y_{N-1}]^T$ o vetor complexo no domínio da frequência discreto na saída da FFT, enquanto $\mathbf{y} = [y_0 y_1 \dots y_{N-1}]^T$ é o vetor das amostras do sinal no domínio do tempo discreto na recepção do sistema. Para o canal AWGN, o ruído aditivo Gaussiano branco, cujas amostras são representadas pelo vetor \mathbf{w}_m , é adicionado ao sinal, resultando em:

$$y_m = x_m + w_m \quad (2.3)$$

e portanto, após a demodulação o sinal na recepção do sistema pode ser descrito como

$$Y_k = X_k H_k + W_k. \quad (2.4)$$

H_k é a resposta em frequência do canal no domínio da frequência, que tem fundamental importância na eficiência de recuperação de dados do sistema [Armstrong 2009]. A seguir serão discutidos alguns pontos essenciais para o entendimento e funcionamento do sistema OFDM.

2.1.2 Intervalo de Guarda e Prefixo Cíclico

O prefixo cíclico compreende expandir ciclicamente o símbolo OFDM por um comprimento G , ao retirar amostras do final do símbolo OFDM e adicioná-las em seu início, como pode ser visto na Figura 3. O CP atenua a ocorrência de ISI. Os prefixos cíclicos são inseridos em cada símbolo OFDM de tal modo que suas componentes provenientes de multipercursos fiquem contidas nesse intervalo G , evitando interferência do final do símbolo atual com o início do símbolo subsequente [Armstrong 2009, Pinto e Albuquerque 2002]. Portanto, enquanto o espalhamento devido a atraso e ruído gerado pelo canal de multipercursos for menor que o prefixo cíclico, não ocorre ISI. Uma desvantagem é que ao usar o CP como intervalo de guarda, tem-se redução da eficiência espectral do sinal.

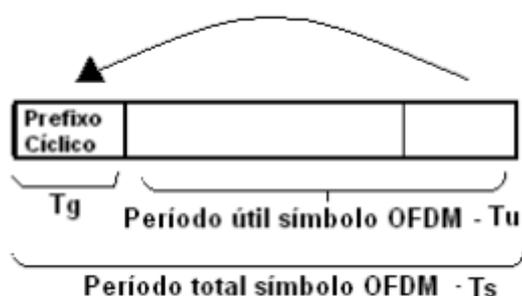


Figura 3 – Prefixo cíclico no símbolo OFDM [Análise comparativa entre os sistemas ofdm e fbmc na transmissão de tv, author=Arndt, D., year=2012]

2.1.3 Equalização

Além de eliminar a ISI e introduzir redundância no sistema, o prefixo cíclico é uma técnica importante para simplificar a equalização no sistema OFDM. Isso se dá pois, ao aplicar o CP, qualquer distorção causada por um canal dispersivo linear pode ser corrigida com um equalizador *single-tap* em cada subportadora [Armstrong 2009, Análise comparativa entre os sistemas ofdm e fbmc na transmissão de tv, author=Arndt, D., year=2012]. Graças a propriedade circular da IFFT e FFT, o uso do CP faz com que exista uma convolução circular entre o sinal transmitido e o canal [Armstrong 2009], sendo possível implementar um equalizador linear no domínio da frequência. Na Figura 4 é possível observar a equalização *zero-forcing*, em que basta multiplicar o sinal pela função inversa do canal.

Nos sistemas de comunicações digitais o sinal é transmitido em um canal que pode introduzir distorções, tal qual ruído, desvanecimento, interferência [Bahai, Saltzberg e Ergen 2006]. Por isso é importante entender bem o canal de comunicação. Na próxima seção será discutido sobre o canal de comunicação sem fio.

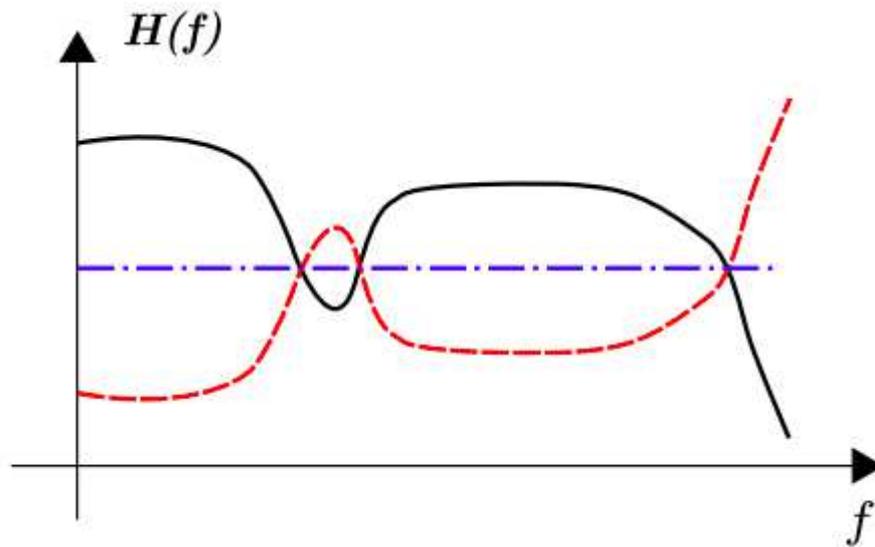


Figura 4 – Em preto tem-se o canal real, em vermelho a função inversa do canal e em azul o produto do canal pela sua função inversa [Valentim 2010]

2.2 O canal de comunicação sem fio

O sinal transmitido em um sistema de comunicação sem fio sofre várias perdas devido às características do canal, seja por efeitos de propagação, distorções, interferência ou ruído que, de forma não determinística, provocam uma variação na potência do sinal. Essa variação é conhecida como desvanecimento. Dessa forma, conhecer o comportamento do canal é importante para o desenvolvimento de um sistema sem fio que permita a possibilidade de altas taxas de transmissão.

O desvanecimento tem diferentes definições que dependem de como o ambiente aporta o sinal, podendo ser classificado como em larga escala ou pequena escala. O desvanecimento em pequena escala ocorre para distâncias relativamente pequenas entre o transmissor e o receptor, tendo como resultado rápidas flutuações da amplitude e fase do sinal recebido em um curto período de tempo [Rappaport 2010]. O desvanecimento em larga escala é devido à variação da potência média do sinal quando o transmissor e receptor estão separados por grandes distâncias. Ainda no percurso do sinal podem haver obstáculos que dificultem sua propagação, como o sombreamento, que ocasiona em espelhamento e difração do sinal, podendo reduzir drasticamente a potência recebida [Guimarães e Gomes 2006].

Um dos modelos mais simples é o canal com ruído aditivo, que descreve a degenera-

ção do sinal por um processo aleatório aditivo $n(t)$ [Proakis e Salehi 2008]. Fisicamente o canal aditivo surge a partir dos componentes eletrônicos e amplificados nos receptores do sistema de comunicação ou devido a interferências na transmissão. Estatisticamente, esse ruído pode ser caracterizado como um processo aleatório gaussiano e, portanto, o canal é conhecido como canal com ruído gaussiano aditivo. Esse ruído é intrínseco aos sistemas de comunicação e conhecido também como ruído térmico. Um modelo de ruído básico, mas que descreve o comportamento do ruído aditivo, é o ruído gaussiano branco aditivo (AWGN - *Additive White Gaussian Noise*). O ruído é aditivo pois é uma característica intrínseca do sistema, branco pois possui uma potência uniforme ao longo da banda de frequência do sistema e gaussiano porque tem uma distribuição normal no domínio do tempo, com o valor de média igual a zero [Proakis e Salehi 2008, Lathi 1998].

2.2.1 Múltiplos percursos e modelo do canal móvel

A propagação por múltiplos percursos acontece na transmissão do sinal por um sistema de comunicação sem fio via canal móvel. O percurso percorrido pelo sinal entre o transmissor e o receptor sofre mudanças devido a reflexão, difração graças aos obstáculos presentes no meio de comunicação, conforme pode-se observar na Figura 5. O sinal recebido será a soma das cópias do sinal de todos os percursos com diferença nos retardos de tempo, na potência do sinal, direção de chegada e outros fatores que acarretam em interferências destrutivas ou construtivas entre as cópias dos sinais por conta da diferença de fase resultada [Proakis e Salehi 2008, Guimarães e Gomes 2006]. Um fator de grande impacto nesse sistema é o espalhamento do retardo temporal dos sinais que levam oscilação na amplitude e na fase do sinal recebido, descrevendo o desvanecimento em pequena escala.

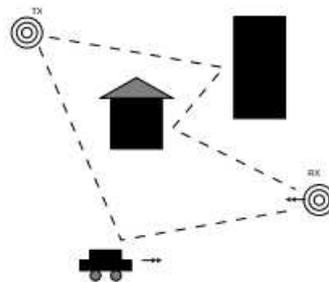


Figura 5 – Ambiente com múltiplos percursos, baseado e adaptado de [Malta 2010]

O canal de comunicação sem fio com propagação por múltiplos percursos pode ser modelado como um sistema variante no tempo descrito a partir da sua resposta ao

impulso:

$$r(t, \tau) = \sum_{i=1}^L \alpha_i(t) \delta(t - \tau_i(t)) \quad (2.5)$$

onde L é o número de múltiplos percursos, $\alpha_i(t)$ é o fator de atenuação complexo do sinal e $\tau_i(t)$ o atraso de propagação do sinal. Os fatores de atenuação e atraso de propagação do sinal devido aos múltiplos percursos variam de forma aleatória sendo possível, portanto, aplicar modelos estatísticos para descrever o comportamento do sinal recebido [Rappaport 2010, Malta 2010]. Para o caso de sistemas que não possuem uma linha de visada, ou seja, o receptor recebe apenas as componentes devido aos múltiplos percursos, o canal móvel é denominado com desvanecimento Rayleigh. Portanto, a resposta ao impulso do canal $h(t, \tau)$ é modelada a partir de um processo aleatório gaussiano complexo de média nula e variância σ^2 . A função densidade de probabilidade (PDF - *Probability Density Function*) da distribuição Rayleigh, vista na Figura 6, é dada por [Rappaport 2010]:

$$p(x) = \begin{cases} \frac{x}{\sigma^2} \exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right), & \text{se } x \geq 0. \\ 0, & x < 0. \end{cases} \quad (2.6)$$

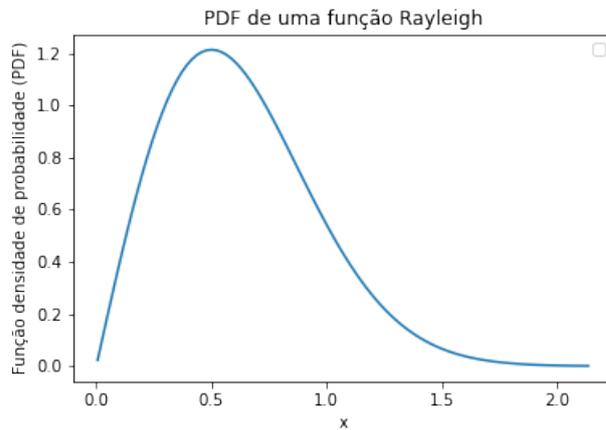


Figura 6 – PDF da função com distribuição Rayleigh, baseado em [Proakis e Salehi 2008]

Tem-se, portanto, que a envoltória $|h(t, \tau)|$ segue uma distribuição Rayleigh. Por meio da resposta ao impulso $h(t, \tau)$ é possível caracterizar e diferenciar os tipos de desvanecimentos existentes. Para este trabalho, por ser mais aplicado nos sistemas de comunicação com altas taxas de transmissão, será discutido o desvanecimento seletivo em frequência e quais os parâmetros que o define [Guimarães e Gomes 2006, Rappaport 2010].

2.2.2 Desvanecimento Seletivo em Frequência

Antes de detalhar o funcionamento e quais as exigências do sistema para que esse tenha desvanecimento seletivo em frequência, é feita uma introdução de alguns parâmetros que descrevem um canal de comunicação móvel, conforme apresentado em [Guimarães e Gomes 2006, Malta 2010].

- Tempo de Coerência e Espalhamento Doppler - O tempo de coerência é o intervalo em que a resposta ao impulso do canal pode ser considerada constante. O espalhamento Doppler é um fenômeno que indica o desvio de frequência devido ao movimento relativo entre o transmissor e o receptor;
- Banda de Coerência (b_c) - É a largura de banda onde as componentes de frequência do canal possuem ganho constante, o intervalo dentro do qual a resposta em frequência do canal pode ser considerada plana (magnitude e fase das respostas aproximadamente constante);
- Perfil de Atraso de Potência - O trem de pulsos associado a cada percurso decorrente do canal de múltiplos percursos (ver Figura 7). A partir desse perfil é possível observar o espalhamento da potência do sinal em função do atraso.

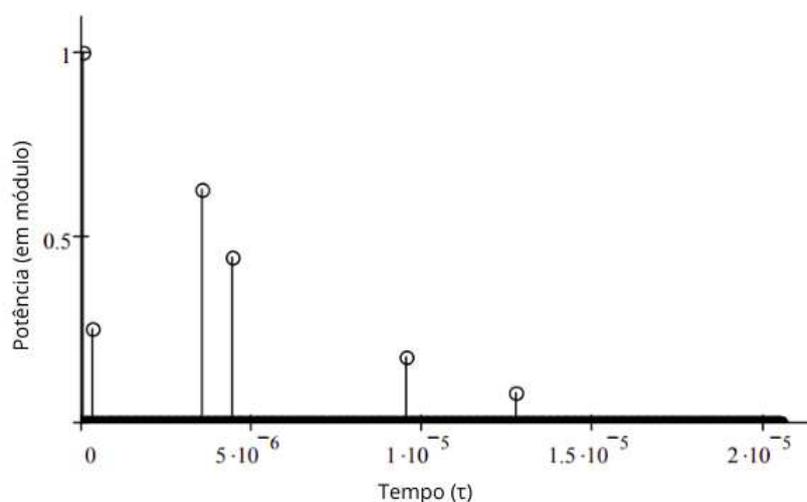


Figura 7 – Perfil de atraso para o Canal Brasil B na recepção do sistema, em [Guimarães e Gomes 2006]

A partir desses parâmetros é possível caracterizar e entender o funcionamento do sinal com transmissão em um canal com desvanecimento seletivo em frequência. O perfil de atraso é uma variável de canais com múltiplos percursos e a partir dela é possível obter o máximo espalhamento de atrasos (τ_m). τ_m é a diferença de tempo entre o primeiro e o último impulso recebidos. A dispersão temporal no sinal transmitido pode causar alteração da amplitude das componentes em frequência do sinal. Quando as componentes de frequência do sinal sofrem alterações diferentes, não uniformes, com distorção do sinal, o desvanecimento é denominado seletivo em frequência [Guimarães e Gomes 2006].

Para a ocorrência do desvanecimento seletivo em frequência é necessário, na recepção, realizar a amplificação e equalização do sinal recebido. A banda de coerência do canal determina qual o tipo de seletividade do canal, sendo esse parâmetro aproximadamente o inverso do máximo espalhamento de atraso. Resumidamente o desvanecimento seletivo em frequência ocorre quando [Guimarães e Gomes 2006]:

- Banda do sinal $>$ Banda de coerência do canal;
- Espalhamento de atraso $>$ Duração do símbolo.

A seletividade do canal acontece devido à dispersão temporal dos símbolos, que resulta na ISI, tendo como consequência o alargamento e sobreposição dos pulsos transmitidos adjacentes, os símbolos já transmitidos interferem nos símbolos atuais. Essa é uma das principais motivações para o uso de sistemas OFDM: mitigar a seletividade do canal.

Na seção seguinte será discutido com mais detalhes como é feita a estimação de canal, uma importante técnica aplicada para tornar possível a equalização do canal e recuperação do sinal transmitido.

2.3 Estimação de Canal

O prefixo cíclico é uma técnica fundamental para diminuir as perdas na transmissão em sistemas OFDM com canais móveis. Mas, apesar disso, os símbolos transmitidos ainda podem sofrer distorções ou atenuações impostas pelo canal e até perda da ortogonalidade das subportadoras devido ao espalhamento temporal na resposta ao impulso do canal. A estimação e equalização do canal são aplicadas para correção das perdas, ajudando

a amenizar o efeito dessas interferências que podem acarretar na rotação e desvio de amplitude da constelação. A estimação de canal é necessária para sistemas de comunicação com altas taxas de transmissão, em que o aumento da quantidade de *bits* por símbolo modulado diminui o desempenho do sistema. Isso porque a estimação do canal ajuda o sistema de recepção a encontrar as informações do sinal transmitido [Bahai, Saltzberg e Ergen 2006].

Por ser um sistema multi-portadora, cujas subportadoras possuem uma largura de banda menor, que depende da quantidade de subportadoras (N), cada subportadora do símbolo OFDM responde como um canal com desvanecimento plano e, portanto, pode-se fazer uso das técnicas de estimação de canal para sistemas com desvanecimento plano [Pinto e Albuquerque 2002]. Um método amplamente utilizado para realização da estimação de canal é o uso de portadoras pilotos [Pinto e Albuquerque 2002].

2.3.1 Definição e Distribuição das Portadoras Pilotos

As portadoras pilotos são informações definidas no transmissor e conhecidas pelo receptor do sistema. Esse método de estimação consiste em inserir essas portadoras entre os símbolos OFDM ainda na transmissão [Armstrong 2009, Pinto e Albuquerque 2002]. As portadoras pilotos não transportam informação útil e sim uma informação conhecida pelo receptor, de modo que seja possível estimar a função de transferência do canal [Bahai, Saltzberg e Ergen 2006, Armstrong 2009], viabilizando a aplicação do equalizador de canal. O processo de estimação acontece quando, na recepção, é possível estimar as alterações do sinal recebido, devido ao canal, e replicar esse processo para as subportadoras de informação útil.

Escolher adequadamente a forma de inserção das portadoras pilotos é uma das etapas mais importantes para a estimação correta do canal. Um dos métodos de inserção mais discutidos na literatura e que será discutido neste trabalho é a *Comb type*. Nesse método, as portadoras pilotos são distribuídas uniformemente, no domínio de frequência, conforme pode ser visto na Figura 8. O arranjo *comb type* possui bons resultados para estimativa de canais com desvanecimento com baixa seletividade em frequência e que precisam de equalização [Shen e Martinez 2006]. Outra técnica bastante usual é a *Block type*, que consiste na inserção das subportadoras pilotos em todas as frequências de alguns determinandos instantes de tempo específicos. Na técnica *comb type* a estimação deve

ser feita em duas etapas: estimação do símbolo piloto e por fim a interpolação do canal, na busca por sua resposta em frequência [Shen e Martinez 2006]. Diferentes técnicas de interpolação alteram o desempenho do sistema.

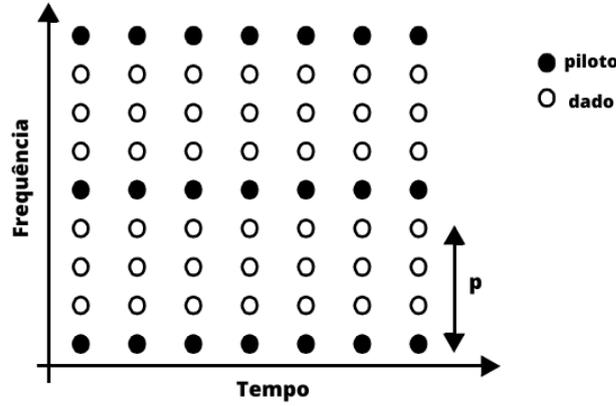


Figura 8 – Método de arranjo de subportadora piloto *Comb type*, baseado em [Shen e Martinez 2006]

No transmissor, após os N símbolos OFDM passarem pelo conversor S/P, são alocadas N_p subportadoras pilotos com um espaçamento uniforme no domínio da frequência definido por $p = N/N_p$. Sendo assim, tem-se que o sinal \mathbf{X}_k possui $N - N_p$ subportadoras de informação útil. Dessa forma pode-se definir, portanto, o sinal \mathbf{X}_k como:

$$\mathbf{X}(k) = X(mp - i) = \begin{cases} X_p(m), & \text{se } l = 0. \\ \text{Informação útil}, & l = 0, 1, \dots, p - 1. \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\mathbf{X}(k) = X(mp - i) = X_p(m) \quad (2.8)$$

sendo k a posição da subportadora, m o instante de tempo e p a posição da subportadora piloto. Após a FFT, incluindo o efeito do ruído, o sinal recebido pode ser escrito como [Armstrong 2009]:

$$Y_k = H_k X_k + W_k \quad (2.9)$$

A partir das técnicas de interpolação de H_p pode-se obter a resposta ao canal H_k referente a todas as subportadoras de dados. Fazendo uma equalização de forçagem a zero, um

equalizador linear que elimina a ISI, obtem-se uma estimativa do sinal transmitido corrigido, em que o sinal transmitido pode ser recuperado do sinal recebido apenas multiplicando X_k por $1/H_k$. Ou seja, cada subportadora pode ser recuperada por apenas uma multiplicação complexa [Armstrong 2009], isto é:

$$X_k = \frac{Y_k}{H_k} = X_k + \frac{W_k}{H_k} \quad (2.10)$$

Uma desvantagem desse tipo de equalização é que quando H_k é muito pequeno o ruído é amplificado.

2.3.2 Interpolação de Canal

É um método de aproximação de valores discretos, obtidos de um experimento ou amostragem, para constituir um novo conjunto de dados, resultando na construção de uma função que se encaixe no conjunto de dados obtido.

A interpolação fornece a resposta ao impulso do canal sobre todas as subportadoras transmitidas a partir das subportadoras pilotos (ver Figura 9). Diferentes técnicas de interpolação são implementadas na recepção dos sistemas de comunicação OFDM, podendo ser realizadas nos dados estando estes no domínio da frequência ou do tempo. Entretanto, para este trabalho serão discutidos os resultados a respeito da interpolação realizada nos dados no domínio da frequência.

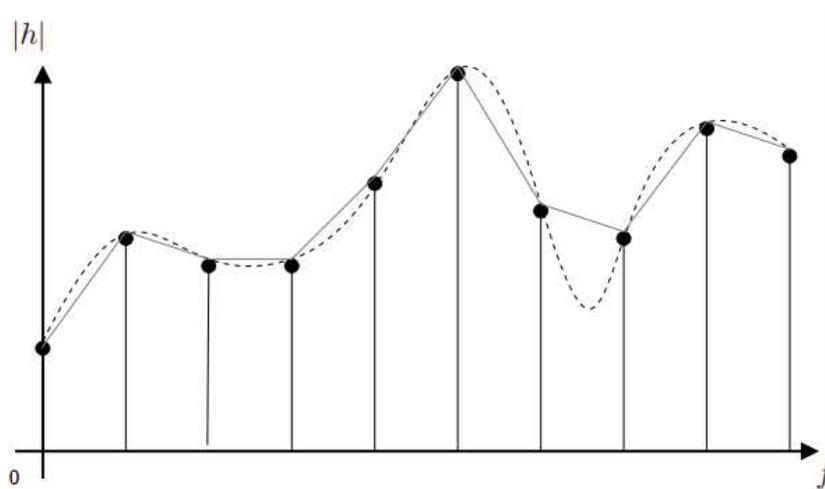


Figura 9 – Função de transferência do canal via interpolação [Malta 2010]

Na Figura 9 é possível observar o procedimento da interpolação: a linha pontilhada

é a função de transferência real do canal, enquanto os pulsos são os valores das amplitudes da resposta ao impulso do canal no domínio da frequência. A curva traçada entre os picos de amplitude dos pulsos é a resposta ao impulso do canal estimada via interpolação. A partir da resposta ao impulso estimada é possível realizar a equalização do canal.

2.4 Considerações

A partir desse capítulo foi possível compreender o funcionamento e importância do sistema OFDM para atenuar as perdas devido à transmissão do sinal pelo canal de comunicação. Isso se deve a aplicação de técnicas que auxiliam na mitigação da ISI. No próximo capítulo serão discutidos os blocos do sistema OFDM implementados e os resultados.

3 Simulações e Resultados

Esse capítulo tem por propósito discutir as simulações computacionais implementadas e seus respectivos resultados, cujo estudo foi feito baseado no arranjo comb type de subportadoras pilotos. As simulações foram feitas na ferramenta Jupyter Notebook, utilizando a linguagem Python (ver Anexo A). Para o desenvolvimento dos sistemas desse trabalho foi feito um levantamento dos modelos de um sistema de comunicação OFDM discutidos por Armstrong (2009) e Ernesto (2002).

Para diminuir a complexidade do modelo foram desconsiderados o codificador de canal, conversão analógico-digital e conversão digital-analógico utilizados na transmissão do sistema, e atribuiu-se sincronismo entre o transmissor e o receptor, cujo fundamento do trabalho foi o estudo e realização dos blocos de modulação/demodulação, de estimação/interpolação do canal e de transmissão/recepção. O modelo foi implementado para avaliar o desempenho do sistema OFDM a partir da determinação e das curvas da taxa de erro por *bit* (BER) para diferentes valores da relação sinal ruído (SNR).

Neste capítulo são apresentados a os blocos desenvolvidos e os parâmetros utilizados para as simulações. Os resultados apresentados pelo autor são referentes ao sistema OFDM implementado para transmissão dos símbolos por um canal AWGN.

3.1 Algoritmo Simulado

O algoritmo de simulação compreende um sistema OFDM generalizado, que pode ser visto na Figura 10.

O desenvolvimento do algoritmo, desde a geração dos *bits* de informação, à transmissão e à recepção do sinal é apresentado a seguir. O código é modularizado para facilitar sua manutenção, flexibilidade, legibilidade e confiabilidade. Ainda, foram criados dicionários contendo as relações entre uma sequência binária e um símbolo da constelação M-QAM para auxiliar nas etapas de modulação e demodulação. As constelações trabalhadas são 16-QAM e 64-QAM. Conforme será tratado adiante, nesse trabalho foram realizadas simulações para o sistema OFDM com canal AWGN, portanto, as etapas de estimação e equalização de canal não foram aplicadas e, por esse motivo, pode-se observar na Figura

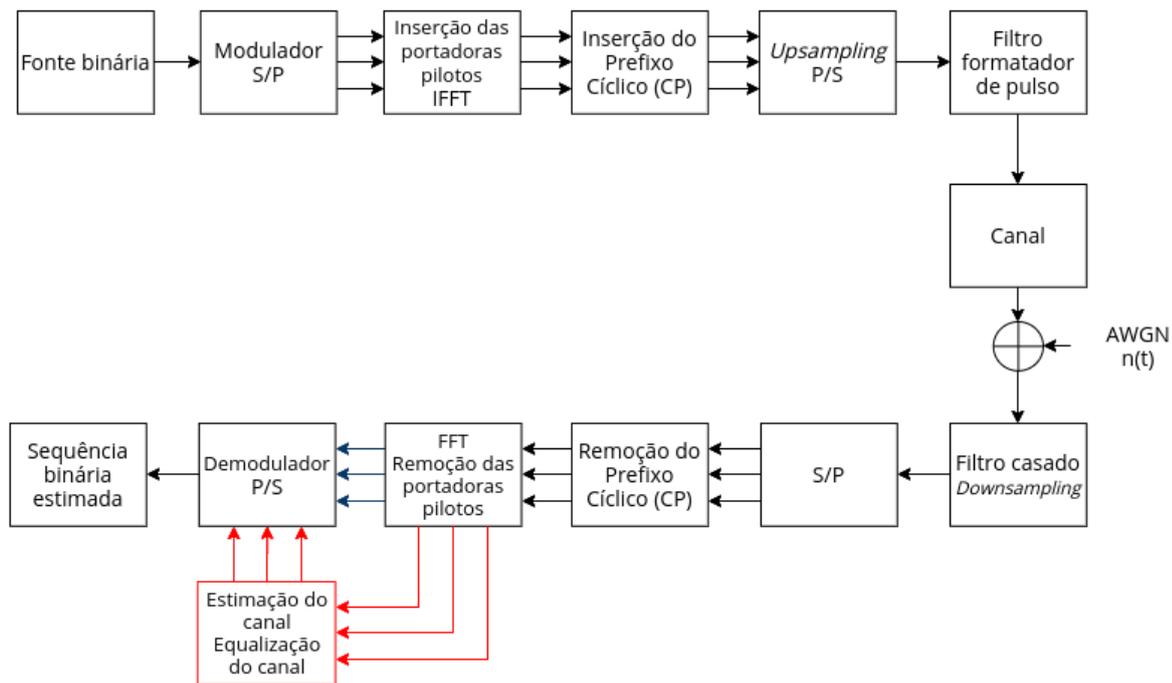


Figura 10 – Diagrama de blocos usado para a simulação desenvolvida. Adaptado de [Armstrong 2009].

10 que o bloco que faz menção a essas técnicas está na cor vermelha.

3.1.1 Transmissão

O primeiro passo tomado foi a definição da quantidade de símbolos OFDM e das quantidades, por símbolo OFDM, de subportadoras total, de subportadora piloto, além do comprimento do prefixo cíclico por símbolo OFDM.

```

number_of_datasymbols = 2**16 # nmero de smbolos QAM gerados
K = 64 # nmero de subportadoras
CP = K//4 # comprimento do prefixo cclico
P = 8 # nmero de portadora piloto
number_of_OFDMsymbols = number_of_datasymbols//K # nmero de smbolos OFDM a
    serem transmitidos
payloadBits = mu * number_of_datasymbols # quantidade total de bits gerados

```

Definidos os parâmetros iniciais da simulação é possível, portanto, implementar os blocos na sequência em que são apresentados no diagrama de blocos. Inicialmente é gerada uma sequência pseudo-aleatória de *bits* por símbolo OFDM a ser transmitido.

Posteriormente a sequência binária possui sua dimensão reajustada, passando de um vetor coluna para uma matriz cujo o número de colunas coincide com o número de símbolo QAM transmitido a cada símbolo OFDM, viabilizando a modulação dessas sequências binárias, agora paralelizadas. Cada subportadora transporta uma sequência binária que neste trabalho pode ser uma sequência de 4 ou 6 *bits* para uma constelação 16-QAM ou 64-QAM, respectivamente.

Posteriormente à paralelização e modulação das sequências binárias em símbolos M-QAM são definidas as subportadoras de informação e as subportadoras pilotos, em que estas últimas com o arranjo *comb type*, sendo que cada sinal paralelo modula uma subportadora, cuja soma resulta no símbolo OFDM a ser transmitido. Após a associação das subportadoras e os símbolos M-QAM, estes são convertidos do domínio da frequência para o domínio do tempo discreto através da operação da IFFT, que resulta em uma matriz de N linhas e M colunas, sendo o número de subportadoras do sistema e o número de símbolos OFDM que são transmitidos, respectivamente. Logo depois há a inserção do intervalo de guarda, o prefixo cíclico, que ocasiona no aumento do vetor de símbolos OFDM em $N + CP$, onde CP é o comprimento do prefixo cíclico.

```

QAM = Mapping(bits_SP)
OFDM_data = OFDM_symbol(QAM, K, pilotValue) # associacao dos smbolos QAM com as
subportadoras
OFDM_time = IDFT(OFDM_data)
OFDM_withCP = addCP(OFDM_time, CP)

```

A matriz de símbolos, ainda paralelo, tem sua taxa de amostragem aumentada para SpS amostras/símbolo. Finalmente, a matriz é serializada em vetores coluna, por meio da conversão paralelo-serial. Antes da transmissão, o sinal é passado por um filtro formatador de pulso que limita a largura de banda efetiva da transmissão, ajudando no controle da ISI.

Para a simulação foi usado o cosseno levantado como um filtro formatador de pulsos passa-baixas. É possível observar na Figura 11, os espectro de frequências do ruído aditivo gaussiano branco e da saída do canal. As ondulações no espectro de frequência do sinal formatado é devido a inserção do prefixo cíclico nos símbolos OFDM [Armstrong 2009].

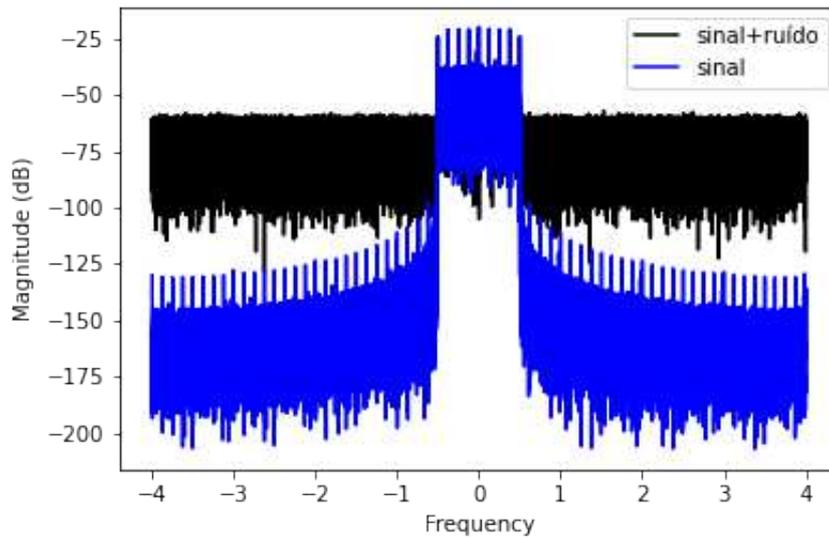


Figura 11 – Espectro de frequências do ruído AWGN e da saída do canal AWGN. (Próprio autor).

3.1.2 Canal

Por meio da função *channel*, disponível no Anexo A, foi possível simular um canal AWGN. O ruído aditivo gaussiano branco foi adicionado ao sinal na saída do filtro formatador de pulsos. O canal AWGN possui variância variável a depender do valor da SNR. Nas Figuras 14 e 15 pode-se observar um intervalo de amostras do sinais, no domínio do tempo, para diferentes valores de SNR.

O filtro casado é importante para filtrar cópias do sinal devido a reflexão ou difração que ocorrem no processo de transmissão. As cópias do sinal podem sobrepor um período do tempo do símbolos subjacente e, por conta da aplicação do filtro, há uma atenuação no início e final de cada período do símbolo, reduzindo a ISI. Antes de entrar para o sistema de recepção propriamente dito, o sinal transmitido passa pelo filtro casado, que ajuda a maximizar a relação sinal ruído na entrada do receptor no instante de tomada de decisão, minimizando a probabilidade de detecção de erro [Lathi 1998].

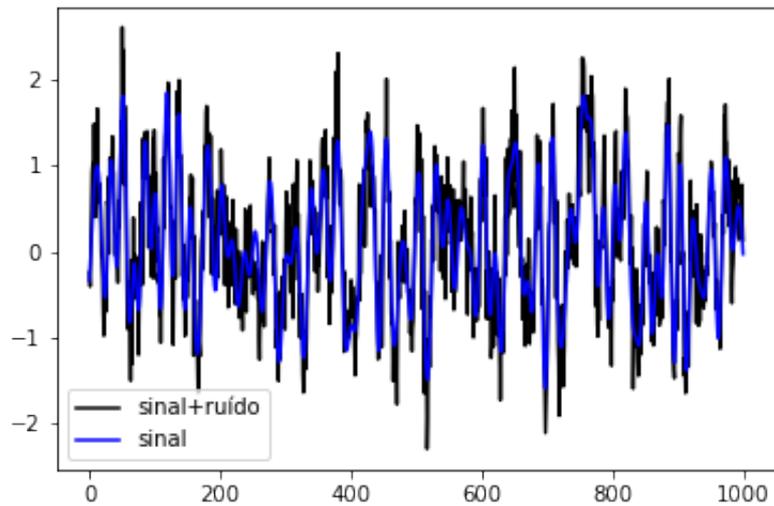


Figura 12 – Curvas do sinal na saída do filtro formatador de pulso (sinal) e na saída do canal AWGN (sinal + ruído). SNR = 6dB. (Próprio autor).

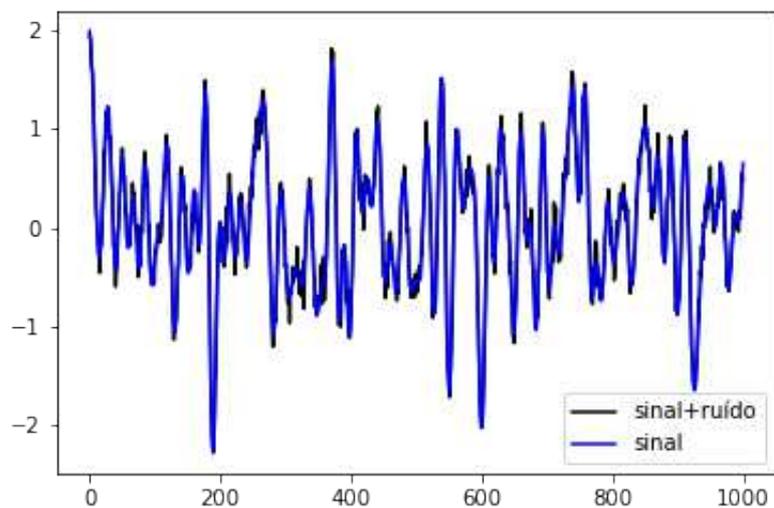


Figura 13 – Curvas do sinal na saída do filtro formatador de pulso (sinal) e na saída do canal AWGN (sinal + ruído). SNR = 18dB. (Próprio autor).

Percebe-se, portanto, que o filtro casado na saída do receptor atua como otimizador, devido a pré-deteção do sinal, visto que a saída do filtro casado é sua forma de onda em função do sinal de entrada e, como o ruído é descorrelacionado com o sinal, pode-se detectar o sinal transmitido de maneira mais fácil, aumentando a eficiência do sistema em combater a perda de informação devido a degradação do canal [Lathi 1998].

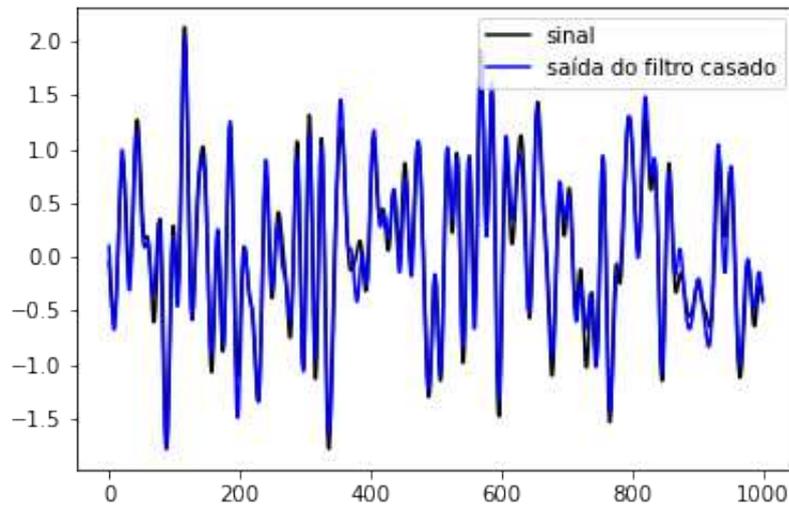


Figura 14 – Curvas do sinal na saída do filtro formatador de pulso (sinal) e na saída do filtro casado. SNR = 6dB. (Próprio autor).

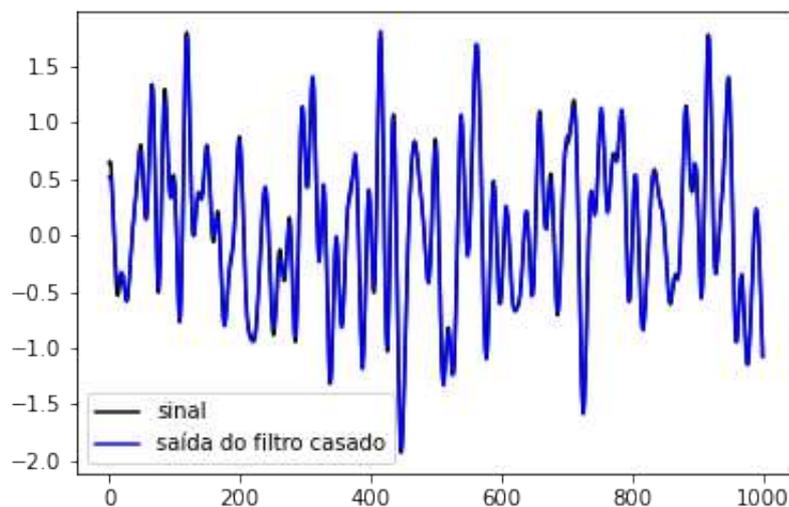


Figura 15 – Curvas do sinal na saída do filtro formatador de pulso (sinal) e na saída do filtro casado. SNR = 18dB. (Próprio autor).

3.1.3 Recepção

Na recepção, realiza-se a conversão serial-paralelo do sinal para ser possível reduzir a sua taxa de transmissão para 1 amostra/símbolo. Logo em seguida é retirado o prefixo cíclico do símbolo OFDM e, então, aplica-se a FFT, transformando o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. No domínio da frequência, é possível fazer a

estimação do canal, a partir das subportadoras pilotos transmitidas, fazendo uso das técnicas de equalização de forçagem a zero e interpolação para que seja possível demodular os símbolos OFDM recebidos. Após isso, são retiradas as subportadoras pilotos e é feita, finalmente, a demodulação dos símbolos, gerando uma matriz de sequências binárias. Ao fim, as sequências binárias são serializadas em um único vetor e realiza-se, portanto, a comparação *bit a bit* deste vetor com a sequência binária gerada pela fonte no transmissor, com a finalidade de avaliar o desempenho do sistema a partir da BER.

```
OFDM_RX_noCP[ofdm_symbol] = removeCP(OFDM_RX_paralelo[ofdm_symbol], CP)
OFDM_demod = DFT(OFDM_RX_noCP[ofdm_symbol])
Hest = np.ones(len(OFDM_demod)) # estimao da funo de transferencia do canal -
    interpolao
equalized_Hest = equalize(OFDM_demod, Hest) # equalizao dos smbolos OFDM
QAM_est = get_payload(equalized_Hest)
PS_est, hardDecision = Demapping(QAM_est)
bits_est[ofdm_symbol] = PS_est.reshape((-1,))
```

Como supracitado o sistema foi implementado para o canal AWGN e, devido ao fato desse canal não introduzir distorção em fase ou dispersão temporal, pode-se considerar o canal estimado como unitário para os cálculos de equalização. Para o sistema com canal Rayleigh com desvanecimento seletivo, a interpolação do canal é realizada e tem-se como resultado a função de transferência do canal estimada, *Hest*.

3.2 Resultados

Nesta seção são discutidos os resultados das simulações a partir da apresentação gráfica do desempenho da BER do sistema OFDM para um canal AWGN para diferentes valores de relação sinal-ruído (SNR). Para fazer levantamento dos valores da BER para cada SNR diferente é preciso comparar a sequência binária gerada aleatoriamente com a sequência binária após a demodulação no sistema receptor, de modo que seja possível calcular a taxa de erro por *bit* do sistema. A análise de desempenho da BER pela SNR é muito importante para entender de maneira quantitativa e qualitativa como o canal afeta o sinal transmitido. Serão apresentados também os símbolos das constelações QAM logo

após a demodulação e após a retirada das portadoras pilotos.

É importante comentar que para ambas as constelações 16-QAM e 64-QAM foi escolhido o valor da energia média do sinal. Então as portadoras pilotos tinham valor de $3.46 + 3.46j$ para a modulação dos *bits* em uma constelação 64-QAM e valor de $1.581 + 1.581j$ para a modulação dos *bits* em uma constelação 16-QAM.

3.2.1 Canal AWGN

Os resultados a seguir foram obtidos sem a utilização do filtro formatador de pulso e do filtro casado e para 1 amostra por símbolo. Para todas as simulações realizadas foram utilizados os parâmetros descritos a seguir:

- Número de subportadoras - 256;
- Número de subportadoras pilotos - 9;
- Número de subportadoras de informação útil - 247;
- Comprimento do prefixo cíclico - 64;
- Número de símbolos QAM gerados - 65.536, ou seja, para o esquema de modulação são gerados 262.144 *bits* e para a modulação 64-QAM são gerados 393.216 *bits*.

Nas Figuras 16 e 17 estão apresentadas as constelações QAM para uma modulação 64-QAM, transmissão de 6*bits*/símbolo, no receptor do sistema OFDM implementado para uma SNR de 18dB. Na Figura 16 tem-se os símbolos QAM antes da remoção das subportadoras pilotos. Pode-se observar que na Figura 16 há um conjunto de símbolos deslocados do restante dos símbolos da constelação OFDM, isso se dá devido a escolha do valor das subportadoras pilotos. Na Figura 17 tem-se a constelação QAM após a remoção das subportadoras pilotos, apenas com as subportadoras de informações úteis. Para os resultados apresentados nas Figuras 16 e 17, foi obtida uma taxa de BER de $5,3 \times 10^{-6}$ para valor de SNR de 18dB.

É possível observar na Figura 18 a taxa de erro por *bit* para o canal AWGN com a relação sinal ruído variando de 6dB a 21dB com um passo de 0.5dB para 256

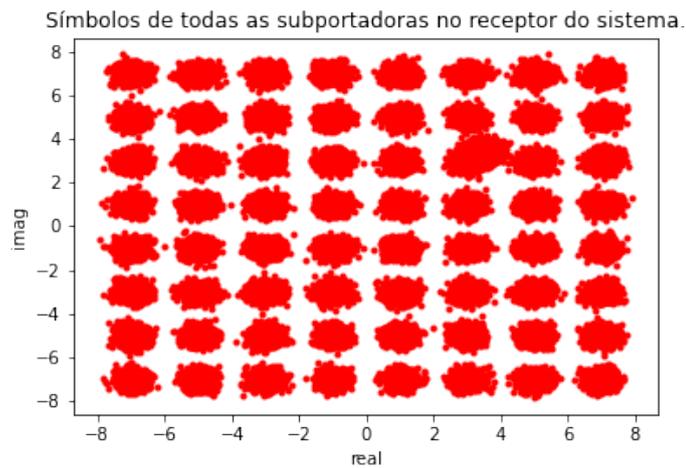


Figura 16 – Constelação 64-QAM de todas as subportadoras após a demodulação dos símbolos OFDM no receptor. (Próprio autor).

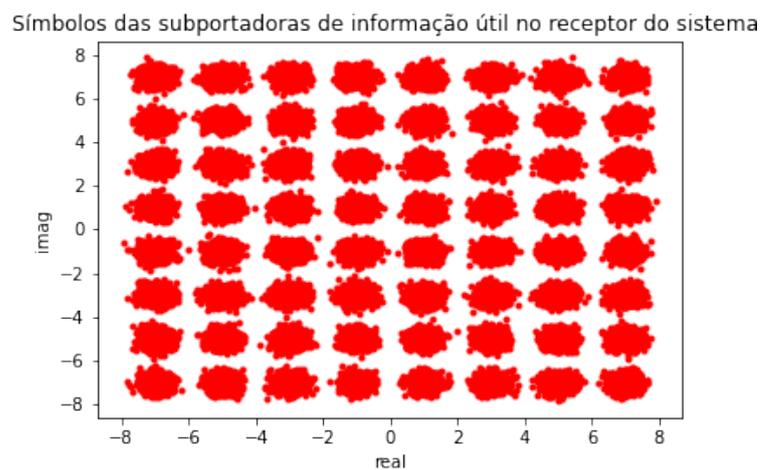


Figura 17 – Constelação 64-QAM das subportadoras de informação útil na recepção. (Próprio autor).

subportadoras por símbolos OFDM, sendo 9 destas como subportadoras pilotos e o restante como portadoras de informação útil.

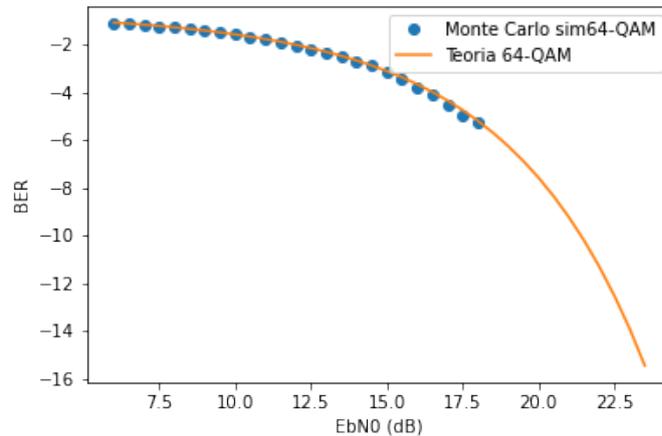


Figura 18 – Curva de desempenho BER pela SNR de uma constelação 64-QAM para o sistema OFDM AWGN. (Próprio autor).

Da mesma forma foi feita a simulação utilizando a modulação 16-QAM para se obter as constelações vistas nas Figuras 19 e 20, mas aqui a SNR utilizada foi de 15dB. Assim como apresentado para o sistema com modulação 64-QAM, na Figura 19 pode-se observar que a constelação 16-QAM após o bloco FFT, possui símbolos deslocados da constelação, esses são as subportadoras pilotos. Na Figura 20 pode-se observar apenas os símbolos da constelação, após a retirada das subportadoras pilotos.

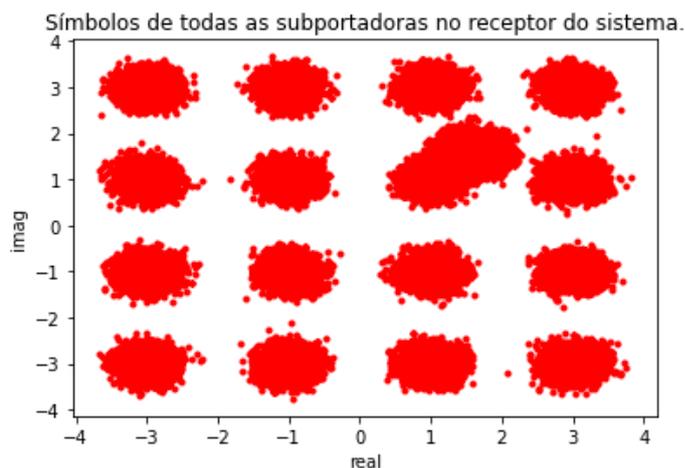


Figura 19 – Constelação 16-QAM de todas as subportadoras após a demodulação dos símbolos OFDM no receptor. (Próprio autor).

Para os resultados apresentados nas Figuras 19 e 20, foi obtida uma BER nula. Na Figura 21 é possível observar a curva de desempenho do sistema OFDM ao transmitir um sinal modulado em 16-QAM por um canal AWGN.

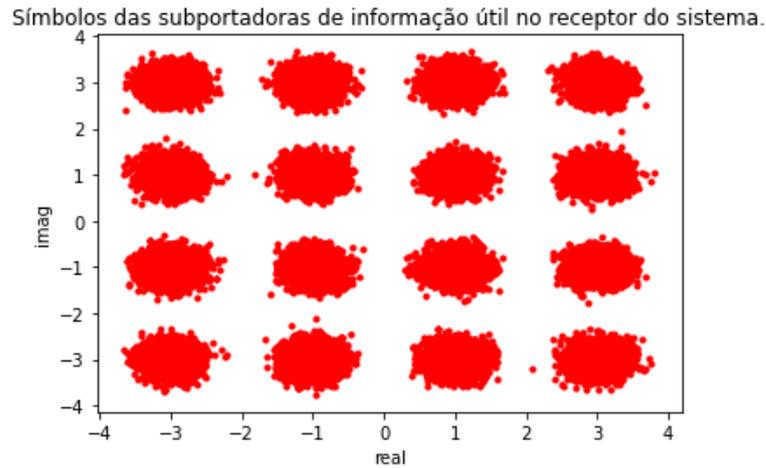


Figura 20 – Constelação 16-QAM das subportadoras de informação útil na recepção. (Próprio autor).

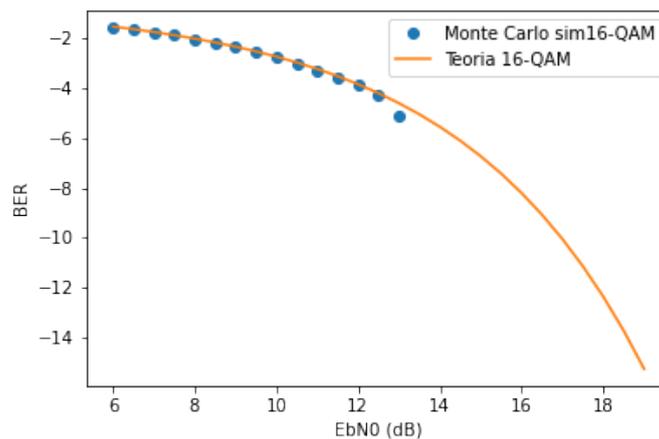


Figura 21 – Curva de desempenho BER pela SNR de uma constelação 16-QAM para o sistema OFDM AWGN. (Próprio autor).

3.2.2 Canal AWGN com Filtro Formatador de Pulso e Filtro Casado

A seguir serão apresentados os resultados do desempenho do sistema OFDM com canal AWGN após a implementação do filtro de formatação de pulso e o filtro casado. Além disso, foi realizado, na transmissão, o aumento da taxa de amostragem do sinal. Na recepção a taxa de amostragem foi reduzida a 1 amostra por símbolo.

O filtro formatador de pulso utilizado neste trabalho foi o cosseno levantado, descrito pela equação 3.1, visto na Figura 22, recorrente nas aplicações de comunicações digitais. O cosseno levantado é caracterizado pelo fator de decaimento (*roll-off*), que determina a largura de banda excedente do canal ideal, sendo esse um parâmetro definido

como $0 \leq \alpha \leq 1$, ou o grau de suavidade da resposta em frequência [Lathi 1998].

$$h(t) = \begin{cases} 1 - \alpha + \frac{4\alpha}{\pi}, & t = 0; \\ \frac{\alpha}{\sqrt{2}} \left[\left(1 + \frac{2}{\pi}\right) \sin \frac{\pi}{4\alpha} + \left(1 - \frac{2}{\pi}\right) \cos\left(\frac{\pi}{4\alpha}\right) \right], & t = \pm \frac{T_s}{4\alpha}; \\ \frac{\sin \frac{t(1-\alpha)\pi}{T_s} + 4\alpha \frac{t}{T_s} \cos \frac{t(1+\alpha)\pi}{T_s}}{\frac{\pi t}{T_s} \left(1 - \left(\frac{4\alpha t}{T_s}\right)^2\right)}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.1)$$

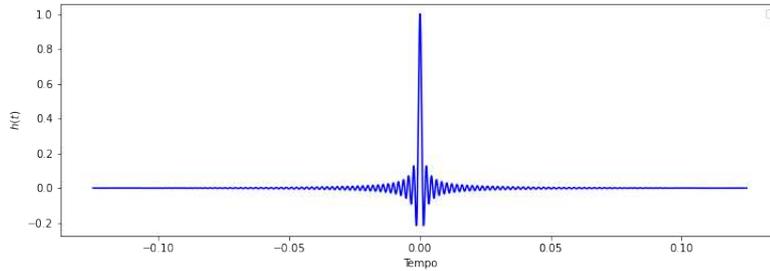


Figura 22 – Filtro do cosseno levantado usado para formatar os símbolos transmitidos. $\alpha = 0.01$ e o número de coeficientes $N = 2048$. (Próprio autor).

Na Figura 23 pode-se observar o espectro de frequências do filtro formatador de pulso cosseno levantado.

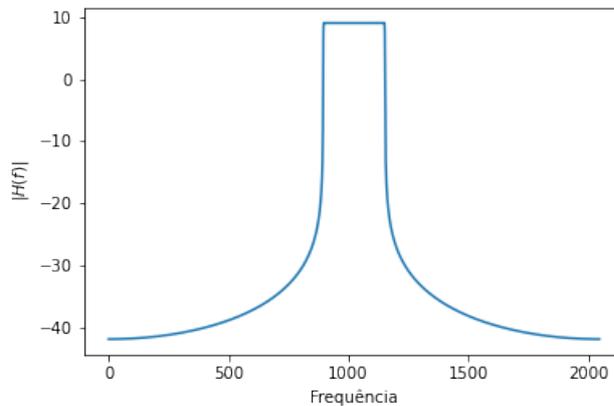


Figura 23 – Espectro de frequência do filtro cosseno levantado para $\alpha = 0.01$ e $N = 2048$. (Próprio autor).

O cosseno levantado possui algumas características importantes, podendo destacar o fato da função ter valores nulos nos instantes de amostragem e um rápido decaimento, além do fato do filtro cosseno levantado é realizável [Lathi 1998]. Os símbolos OFDM devem ser formatados para que após passarem pelo canal possuam uma forma adequada, gerando um sinal de tal modo que o período de duração dos símbolos não se sobreponha. O filtro

cosseno levantado é usado como formatador de pulso na transmissão e aplicado também como filtro casado, após o sinal passar pelo canal. Além disso, um dos parâmetros que caracteriza o filtro cosseno levantado, agora no contexto digital, é o número de coeficientes, que definem a resolução do filtro.

Tem-se como resultados de simulação do sistema com canal AWGN e implementação desses filtros conforme a seguir. Para o caso do sistema com filtragem, foi feita a demonstração das constelações e curva de desempenho para o sinal com modulação 64-QAM.

Nas Figuras 24 e 25 estão apresentadas as constelações QAM para uma modulação 64-QAM e $\text{SNR} = 18\text{dB}$. A Figura 24 foi obtida para a simulação do sistema OFDM com aplicação do filtro a $\text{SpS} = 1$ amostra/símbolo. O período do símbolo foi definido $T_s = 1$ e, portanto, para a frequência de amostragem foi menor do que a frequência de Nyquist, ocasionando os erros. Enquanto na Figura 25 tem-se a constelação 64-QAM para $\text{SpS} = 8$ amostras/símbolo, sendo esse um valor de sobreamostragem, de tal modo que o sinal possa ser reconstruído sem erro.



Figura 24 – Constelação 64-QAM das subportadoras no receptor após o filtro casado, para a taxa de amostragem de $\text{SpS} = 1$ amostra/símbolo. (Próprio autor).

O filtro foi definido com um fator de roll-off de 0,01 e com 2048 coeficientes. Esse parâmetros foram escolhidos de tal forma que o espectro do filtro se aproximasse com o filtro ideal.

Na Figura 26 pode-se observar as curvas da BER para os símbolos OFDM sob modulação 64-QAM quando o sistema transmite o sinal com as taxas de amostragem

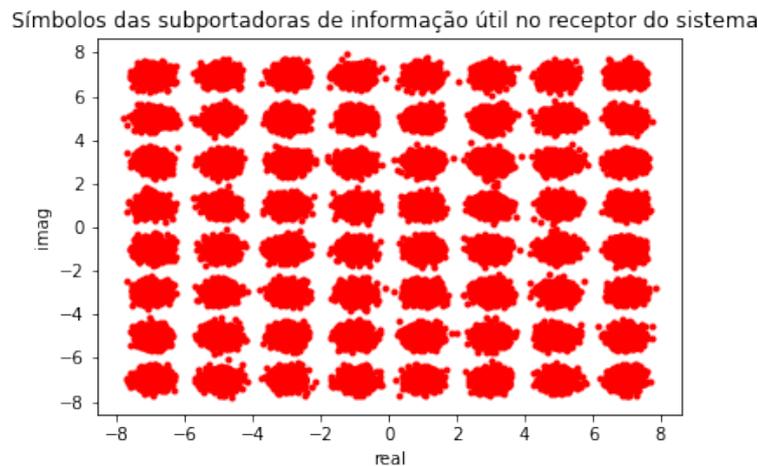


Figura 25 – Constelação 64-QAM das subportadoras de informação útil na recepção após o filtro casado, para a taxa de amostragem de $SpS = 8$ amostras/símbolo. (Próprio autor).

$SpS = 1, 2, 4$ e 8 . É possível perceber que quando não é realizado o aumento da taxa de amostragem, o sistema apresenta erro na detecção do sinal transmitido quando comparado a curva de desempenho da BER para as taxas de amostragem $SpS = 2, 4$ e 8 .

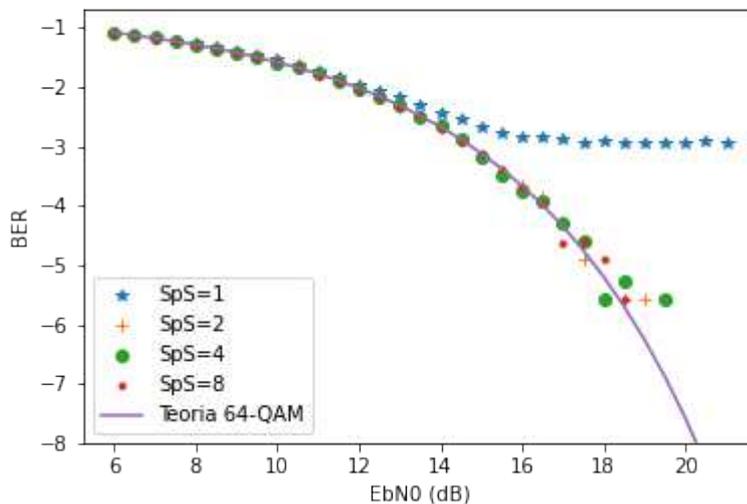


Figura 26 – BER \times SNR para uma constelação 64-QAM com implementação dos filtros para diferentes taxas de amostragem (SpS). (Próprio autor)

Uma importante observação é que se o número de coeficientes de definição do filtro influencia na sua aproximação em relação a função do cosseno levantado teórica. Isso pode implicar diretamente no desempenho do sistema em detectar erro. As Figuras 27 e 28 exemplificam essa questão. Percebe-se que o espectro de frequências da Figura 27 possui

um excesso de banda teórica menor do que o da Figura 28, ou seja, o corte em frequência do sinal é mais preciso. Dessa forma, como os filtros são usados para formatar e atenuar o início e o final de cada período do símbolo, tem-se que uma boa opção para o projeto do filtro é fazê-lo com um número de coeficientes suficiente para reduzir a ISI.

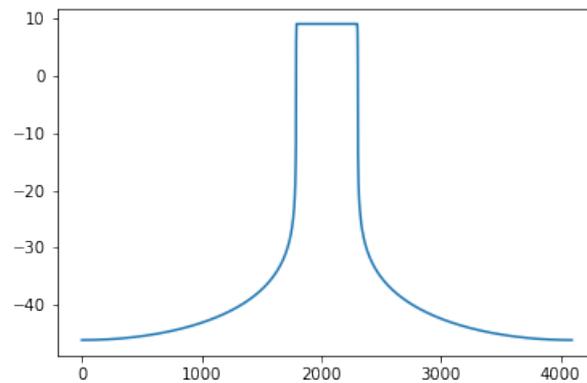


Figura 27 – Espectro em frequências do filtro formatador de pulso para $N = 1024$ e $\alpha = 0.01$. (Próprio autor).

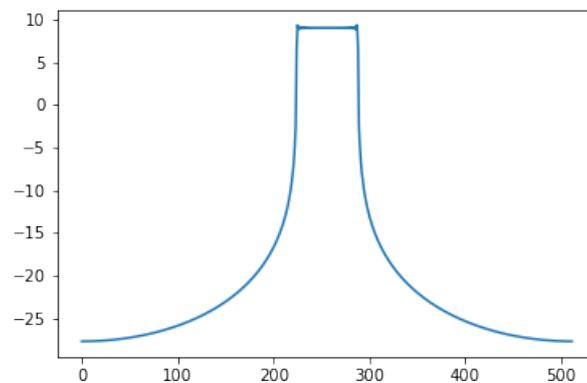


Figura 28 – Espectro em frequências do filtro formatador de pulso para $N = 128$ e $\alpha = 0.01$. (Próprio autor).

4 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo obter uma base teórica e prática a respeito da importância da técnica OFDM para melhoria do desempenho dos sistemas de comunicação móvel, a partir da aplicação de técnicas de estimação e equalização, eficazes na diminuição das degradações devido a natureza do canal. Pôde-se comprovar o funcionamento do sistema OFDM implementado em *software* para a transmissão dos símbolos OFDM por um canal AWGN, de acordo com o diagrama de blocos proposto por [Armstrong 2009].

No Capítulo 2 foi feita a fundamentação teórica do trabalho, o estudo sobre canais de comunicação sem fio assim como uma discussão de como eles podem degradar o sinal transmitido; Foi discutido sobre o sistema OFDM, apresentada uma descrição das técnicas fundamentais para o bom funcionamento desse sistema contra ISI. Ainda nesse capítulo foi feita uma análise sobre a importância da estimação do canal a partir de subportadoras pilotos, sendo visto o arranjo *comb type* para a inserção uniformizada das subportadoras pilotos ao longo do símbolo OFDM e da sua importância para, aliada à técnica de interpolação, estimar o canal.

No Capítulo 3 foi apresentado o sistema implementado, com explicação detalhada dos sistemas de transmissão e recepção por meio da discussão dos trechos de códigos apresentados. Além disso, foram feitas simulações para o sistema OFDM implementado para um canal AWGN e uma breve discussão sobre os resultados apresentados. As simulações com canal AWGN foram bem sucedidas visto que o sistema se comportou tal qual está descrito teoricamente, isso devido a uma correta implementação do sistema OFDM proposto. Infelizmente não foi possível simular o sistema com canal com desvanecimento seletivo em frequência em tempo hábil. Sendo assim, conclui-se que o objetivo do trabalho foi proporcionar maior entendimento sobre os sistemas OFDM a partir do estudo e análise dos resultados e bibliografia e, apesar de não ter implementado o restante do sistema, foi possível entender a importância das técnicas de inserção de subportadoras pilotos, uso do intervalo de guarda, das técnicas de interpolação e estimação de canal para aumentar a eficiência da detecção do sinal na recepção. Principalmente, foi possível ao longo do trabalho, por meio de investigação, discussão com o professor orientador e as simulações realizadas, aprender mais sobre o sistema de comunicação OFDM, muito importante para o cenário

de telecomunicações e que não é discutido ou estudado durante o curso de graduação.

4.1 Trabalhos Futuros

Seria importante para trabalhos futuros realizar a implementação do modelo do canal com desvanecimento seletivo em frequência Rayleigh além da discussão e aplicação de outras técnicas de interpolação de canal, conforme as sugestões a seguir:

- Implementação do canal Rayleigh;
- Estudo e implementação da estimação de canal em outro popular arranjo, o *Block type*;
- Estudo e implementação de técnicas de interpolação além da linear, como a de segunda ordem e FFT.

Referências

- 3GPP. *3rd Generation Partnership Project*. 2020. Disponível em: <<http://www.3gpp.org/>>. Citado na página 11.
- ANÁLISE comparativa entre os sistemas ofdm e fbmc na transmissão de tv, author=Arndt, D., year=2012. In: . [S.l.: s.n.]. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 19.
- ARMSTRONG, J. *OFDM for Optical Communications*. *Journal of Lightwave Technology*, v. 27, n. 3, p. 189–204, 2009. Citado 14 vezes nas páginas 7, 11, 12, 15, 16, 17, 18, 19, 25, 26, 27, 30, 31 e 45.
- BAHAI, A.; SALTZBERG, B.; ERGEN, M. *Multi-Carrier Digital Communications: Theory and Applications of OFDM*. Springer US, 2006. (Information Technology: Transmission, Processing and Storage). ISBN 9780387225760. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=wnbkBwAAQBAJ>>. Citado 4 vezes nas páginas 11, 17, 19 e 25.
- CAMPOS, J. et al. *Engineering the 5G World: Design and Test Insights*. Keysight Technologies, 2020. ISBN 9781734492330. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=2Dk4zQEACAAJ>>. Citado na página 11.
- GUIMARÃES, D. A.; GOMES, G. G. R. de. Caracterização do canal para o mi-sbvtvda. 2006. Citado 6 vezes nas páginas 7, 20, 21, 22, 23 e 24.
- LATHI, B. P. *Modern Digital and Analog Communication Systems 3e Osece*. 3rd. ed. USA: Oxford University Press, Inc., 1998. ISBN 0195110099. Citado 5 vezes nas páginas 17, 21, 32, 33 e 40.
- MADHOW, U. *Fundamentals of digital communication*. [S.l.]: Cambridge University Press, 2008. Citado na página 11.
- MALTA, V. Estimation of the number of multipath components in a delay-dispersive environment for lte ofdm downlink. 2010. Citado 5 vezes nas páginas 7, 21, 22, 23 e 27.
- PINTO, E. L.; ALBUQUERQUE, C. P. de. A técnica de transmissão ofdm. 2002. Citado 4 vezes nas páginas 11, 15, 18 e 25.
- PROAKIS, J.; SALEHI, M. *Digital Communications*. McGraw-Hill, 2008. (McGraw-Hill International Edition). ISBN 9780071263788. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=ksh0GgAACAAJ>>. Citado 3 vezes nas páginas 7, 21 e 22.
- RAPPAPORT, T. S. *Wireless Communications: Principles And Practice, 2/E*. Pearson Education, 2010. ISBN 9788131731864. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=VmPT8B-5_tAC>. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 22.
- SHEN, Y.; MARTINEZ, E. Channel estimation in ofdm systems. *Freescale semiconductor application note*, p. 1–15, 2006. Citado 3 vezes nas páginas 7, 25 e 26.
- VALENTIM, B. L. Equalização para sistemas ofdm óptico. In: . [S.l.: s.n.], 2010. Citado 2 vezes nas páginas 7 e 20.

Anexos

ANEXO A – Funções e Sistema OFDM

Desenvolvido

```
#!/usr/bin/env python
# coding: utf-8

# In[1]:

from comppy.utilities import upsample
from comppy.utilities import signal_power
from comppy.filters import rrcosfilter
from scipy.signal import lfilter as firFilter
from scipy.signal import filtfilt
from numpy.random import randint
from numpy.random import randn
import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
from scipy.interpolate import interp1d
from scipy import interpolate
from scipy.special import erfc
from scipy import special as sp

##### FUNES

def mapping_tab(mu):
    if mu == 2:
        mapping_table = {
            (0,0) : -1 - 1j,    (0,1) : -1 + 1j,    (1,1) : 1 + 1j,    (1,0) : 1 -
                1j
        }
    elif mu == 4:
```

```

mapping_table = {
    (0,0,0,0) : -3-3j, (0,0,0,1) : -3-1j, (0,0,1,0) : -3+3j, (0,0,1,1)
        : -3+1j, (0,1,0,0) : -1-3j,
    (0,1,0,1) : -1-1j, (0,1,1,0) : -1+3j, (0,1,1,1) : -1+1j, (1,0,0,0)
        : 3-3j, (1,0,0,1) : 3-1j,
    (1,0,1,0) : 3+3j, (1,0,1,1) : 3+1j, (1,1,0,0) : 1-3j, (1,1,0,1)
        : 1-1j, (1,1,1,0) : 1+3j,
    (1,1,1,1) : 1+1j
}
elif mu == 6:
    mapping_table = {
        (0,0,0,0,0,0) : 7 + 7j, (0,0,0,0,0,1) : 7 + 5j, (0,0,0,0,1,0) : 5 +
            7j, (0,0,0,0,1,1) : 5 + 5j,
        (0,0,0,1,0,0) : 7 + 1j, (0,0,0,1,0,1) : 7 + 3j, (0,0,0,1,1,0) : 5 +
            1j, (0,0,0,1,1,1) : 5 + 3j,
        (0,0,1,0,0,0) : 1 + 7j, (0,0,1,0,0,1) : 1 + 5j, (0,0,1,0,1,0) : 3 +
            7j, (0,0,1,0,1,1) : 3 + 5j,
        (0,0,1,1,0,0) : 1 + 1j, (0,0,1,1,0,1) : 1 + 3j, (0,0,1,1,1,0) : 3 +
            1j, (0,0,1,1,1,1) : 3 + 3j,
        (0,1,0,0,0,0) : 7 - 7j, (0,1,0,0,0,1) : 7 - 5j, (0,1,0,0,1,0) : 5 -
            7j, (0,1,0,0,1,1) : 5 - 5j,
        (0,1,0,1,0,0) : 7 - 1j, (0,1,0,1,0,1) : 7 - 3j, (0,1,0,1,1,0) : 5 -
            1j, (0,1,0,1,1,1) : 5 - 3j,
        (0,1,1,0,0,0) : 1 - 7j, (0,1,1,0,0,1) : 1 - 5j, (0,1,1,0,1,0) : 3 -
            7j, (0,1,1,0,1,1) : 3 - 5j,
        (0,1,1,1,0,0) : 1 - 1j, (0,1,1,1,0,1) : 1 - 3j, (0,1,1,1,1,0) : 3 -
            1j, (0,1,1,1,1,1) : 3 - 3j,
        (1,0,0,0,0,0) : -7 + 7j, (1,0,0,0,0,1) : -7 + 5j, (1,0,0,0,1,0) : -5
            + 7j, (1,0,0,0,1,1) : -5 + 5j,
        (1,0,0,1,0,0) : -7 + 1j, (1,0,0,1,0,1) : -7 + 3j, (1,0,0,1,1,0) : -5
            + 1j, (1,0,0,1,1,1) : -5 + 3j,
        (1,0,1,0,0,0) : -1 + 7j, (1,0,1,0,0,1) : -1 + 5j, (1,0,1,0,1,0) : -3
            + 7j, (1,0,1,0,1,1) : -3 + 5j,
        (1,0,1,1,0,0) : -1 + 1j, (1,0,1,1,0,1) : -1 + 3j, (1,0,1,1,1,0) : -3
            + 1j, (1,0,1,1,1,1) : -3 + 3j,
    }

```

```

(1,1,0,0,0,0) : -7 - 7j, (1,1,0,0,0,1) : -7 - 5j, (1,1,0,0,1,0) : -5
    - 7j, (1,1,0,0,1,1) : -5 - 5j,
(1,1,0,1,0,0) : -7 - 1j, (1,1,0,1,0,1) : -7 - 3j, (1,1,0,1,1,0) : -5
    - 1j, (1,1,0,1,1,1) : -5 - 3j,
(1,1,1,0,0,0) : -1 - 7j, (1,1,1,0,0,1) : -1 - 5j, (1,1,1,0,1,0) : -3
    - 7j, (1,1,1,0,1,1) : -3 - 5j,
(1,1,1,1,0,0) : -1 - 1j, (1,1,1,1,0,1) : -1 - 3j, (1,1,1,1,1,0) : -3
    - 1j, (1,1,1,1,1,1) : -3 - 3j,

}

return mapping_table

def Mapping(bits):
    return np.array([mapping_table[tuple(b)] for b in bits])

def OFDM_symbol(QAM_payload, K, pilotValue):
    symbol = np.zeros(K, dtype = complex) # todas as K subportadoras
    symbol[pilotCarriers] = pilotValue # aloca as subportadoras piloto
    symbol[dataCarriers] = QAM_payload # aloca as subportadoras de dados
    return symbol

def IDFT(OFDM_data):
    return np.fft.ifft(OFDM_data*np.sqrt(len(OFDM_data)))

def addCP(OFDM_time, CP):
    cp = OFDM_time[-CP:] # pega as ltimas amostras do CP ...
    return np.hstack([cp, OFDM_time]) # ... e as adiciona no inicio dos dados

def channel(signal, type_channel, snr, M, SpS):

```

```

if type_channel == 'awgn':

    snrdB    = snr + 10*np.log10(np.log2(M)) # snrdB a relao entre Es/NO
    avg_energy = SpS*sum(abs(signal)**2) / len(signal) # potencia mdia do
        sinal transmitido

    NO        = avg_energy/(10**(snrdB/10)) # variancia do rudo
        = np.sqrt(NO)

    noise     = np.random.normal(0, , len(signal)) + 1j*np.random.normal(0, ,
        len(signal))
    noise     = 1/np.sqrt(2)*noise
    return signal + noise

def removeCP(signal, CP):
    return signal[CP:len(signal)]

def DFT(OFDM_RX):
    return np.fft.fft(OFDM_RX*np.sqrt(len(OFDM_RX)))

def channelEstimate(OFDM_demod):
    pilots = OFDM_demod[pilotCarriers] # extrair os valores piloto do sinal RX
    Hest_at_pilots = pilots / pilotValue # divide pelo valor do piloto
        transmitido

    # Interpolao entre as portadoras piloto para realizar a estimao do canal
        nas portadoras de dados

    Hest_abs = interp1d(pilotCarriers, abs(Hest_at_pilots), kind =
        'linear')(allCarriers)

```

```
Hest_phase = interp1d(pilotCarriers, np.angle(Hest_at_pilots), kind =
    'linear')(allCarriers)
Hest = Hest_abs * np.exp(1j * Hest_phase)

return Hest

def equalize(OFDM_demod, Hest):
    return OFDM_demod / Hest

def get_payload(equalized): # apenas os smbolos OFDM de portadoras de dados
    return equalized[dataCarriers]

def Demapping(QAM_est):
    # pontos da constelao
    constellation = np.array([x for x in demapping_table.keys()])

    # calcula a distancia entre cada ponto recebido
    dists = abs(QAM_est.reshape((-1,1)) - constellation.reshape((1,-1)))

    # para cada elemento no QAM, escolher o ndice na constelao
    # que pertence ao ponto de constelao mais proximo
    const_index = dists.argmax(axis=1) # argmin(axis = 1) porque vai pegar o
        ndice do menor valor em cada linha

    # obter de volta o ponto real da constelao
    hardDecision = constellation[const_index]

    # converte o smbolo da constelao em sequencia de bits
    return np.vstack([demapping_table[C] for C in hardDecision]), hardDecision
```

```
def Qfunc(x):
    return 0.5-0.5*sp.erf(x/np.sqrt(2))

def theoryBER_MQAM(M, EbN0):

    EbN0lin = 10**(EbN0/10)
    L = np.sqrt(M)
    Pb = 2*(1-1/L)/np.log2(L)*Qfunc(np.sqrt(3*np.log2(L)/(L**2-1)*(2*EbN0lin)))

    return Pb

def filterNoDelay(h, x):
    """
    h: impulse response (symmetric)
    x: input signal
    y: output signal
    """
    N = h.size
    x = np.pad(x, (0, int(N/2)), 'constant')
    y = firFilter(h,1,x)

    return y[int(N/2):y.size]

##### SISTEMA OFDM

number_of_datasymbols = 2**16 # nmero de smbolos QAM gerados

# mu = 4; mu = 6
mu = 4 # quantidade de bits/smbolo

# M = 16; M = 64
M = 2**mu # quantidade de pontos da constelao M-QAM

SpS = 2 #taxa de amostragem amostras/smbolo
```

```

#           Parmetros do filtro formatador de pulso
Ts = 1          # Perodo de smbolo em segundos
Fa = 1/(Ts/SpS) # Frequncia de amostragem do sinal (amostras/segundo)
alpha = 0.01    # Rolloff do filtro RRC
N      = 4*1024  # Nmero de coeficientes do filtro RRC

K = 256 # nmero de subportadoras
CP = K//4 # comprimento do prefixo cclico
P = 8 # nmero de portadora piloto

number_of_OFDMsymbols = number_of_datasyms//K # nmero de smbolos OFDM a
serem transmitidos
payloadBits = mu * number_of_datasyms # quantidade total de bits gerados

allCarriers = np.arange(K) # ndices das subportadoras ([0, 1, ... K-1])

#           Portadoras piloto a cada K/P portadora
pilotCarriers = allCarriers[::K//P]
pilotCarriers = np.hstack([pilotCarriers, np.array([allCarriers[-1]])])
P = P+1

#   16-QAM: pilotValue = 2.236 ; 1.581+1.581j
#   64-QAM: pilotValue = ; 3.46+3.46j
pilotValue = 1.581+1.581j # 0 valor das portadoras piloto

dataCarriers = np.delete(allCarriers, pilotCarriers) # portadora de informao
payloadBits_per_OFDMsymbol = len(dataCarriers) * mu # quantidade de bits de
informao transmitido por smbolo OFDM

mapping_table = mapping_tab(mu)
demapping_table = {v : k for k, v in mapping_table.items()}

```

```

EbN0dB_ = np.arange(1,16.5,0.5)+5
BER      = np.zeros(EbN0dB_.shape)

for indSNR in range(EbN0dB_.size):
    OFDM_TX = []
    OFDM_RX_noCP = []
    bits = []
    bits_est = []
    EbN0dB = EbN0dB_[indSNR]

    for ofdm_symbol in range(number_of_OFDMsymbols):
        OFDM_TX.append([])
        bits.append([])

        bits_load = np.random.randint(2, size = payloadBits_per_OFDMsymbol) #
            gerao dos bits por smbolo OFDM
        bits_SP = bits_load.reshape(len(dataCarriers), mu) # paralelizao da
            sequencia de bits
        bits[ofdm_symbol] = bits_load # array de bits para realizar comparao no
            final

        QAM = Mapping(bits_SP) # mapeamento do fluxo de bits em smbolos QAM
        OFDM_data = OFDM_symbol(QAM, K, pilotValue) # associao dos smbolos QAM
            com as portadoras

        OFDM_time = IDFT(OFDM_data) # IFFT
        OFDM_withCP = addCP(OFDM_time, CP) # adio do prefixo cclico

#         Aumenta a taxa de amostragem do sinal para SpS amostras/smbolo
        OFDM_TX_up = upsample(OFDM_withCP, SpS)
        OFDM_TX[ofdm_symbol] = OFDM_TX_up

```

```

OFDM_TX_ps = np.array(OFDM_TX) # Serializando o vetor de amostras a serem
    transmitidas
OFDM_TX_serial = OFDM_TX_ps.reshape((-1,))

#     filtro formatador de pulso
tindex, rrcFilter = rrcosfilter(N, alpha, Ts, Fa)
sig = filterNoDelay(rrcFilter, OFDM_TX_serial)
sig = sig/np.sqrt(signal_power(sig))

#     canal AWGN
OFDM_RX = channel(sig, 'awgn', EbN0dB, M = 16, SpS = 2)

#     Filtro casado
sig_rx = filterNoDelay(rrcFilter, OFDM_RX)
sig_rx = sig_rx/np.sqrt(signal_power(sig_rx))

OFDM_RX_paralelo = sig_rx.reshape(number_of_OFDMsymbols, (K+CP)*SpS) #
    paralelizao da sequencia de bits

for ofdm_symbol in range(number_of_OFDMsymbols):
    bits_est.append([])

#     downsampling para uma amostra por smbolo
OFDM_rx_down = OFDM_RX_paralelo[ofdm_symbol][0::SpS]

OFDM_RX_noCP = removeCP(OFDM_rx_down, CP) # remover o prefixo cclico

OFDM_demod = DFT(OFDM_RX_noCP) # FFT

#     Hest = channelEstimate(OFDM_demod)
Hest = np.ones(len(OFDM_demod))
equalized_Hest = equalize(OFDM_demod, Hest)
QAM_est = get_payload(equalized_Hest)/80

```

```

    PS_est, hardDecision = Demapping(QAM_est)
    bits_est[ofdm_symbol] = PS_est.reshape((-1,))

bits_tx = np.array(bits)
bits_tx = bits_tx.reshape((-1,))
bits_rx = np.array(bits_est)
bits_rx = bits_rx.reshape((-1,))

discard = 100
numBits = bits_tx.size;

#     Clculo da taxa de erro por bit
ERR = np.logical_xor(bits_tx[discard:numBits-discard],
    bits_rx[discard:numBits-discard])
BER[indSNR] = BER[indSNR] + ERR.sum()/ERR.size
print('EbN0: %3.2f, BER: %3.1e ' %(EbN0dB, BER[indSNR]))

OFDM_TX = OFDM_TX.clear()
bits = bits.clear()
bits_est = bits_est.clear()

##### CURVAS BER

BERtheory = theoryBER_MQAM(M, EbN0dB_)

plt.plot(EbN0dB_, np.log10(BER), 'o');
plt.plot(EbN0dB_, np.log10(BERtheory))
plt.legend(['Monte Carlo sim', "Teoria "+ str(M) + "-QAM"])
plt.xlabel('EbN0 (dB)');
plt.ylabel('BER');
plt.grid()

```