



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
CAMPUS PATOS DE MINAS
FACULDADE DE ENGENHERIA ELÉTRICA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

THIAGO STEVANIN PANTANO

**UM ESTUDO COMPARATIVO DAS TÉCNICAS FBMC-OQAM E OFDM-CP
NO SISTEMA 5G**

Patos de Minas - MG
2019

THIAGO STEVANIN PANTANO

**UM ESTUDO COMPARATIVO DAS TÉCNICAS FBMC-OQAM E OFDM-CP
NO SISTEMA 5G**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Eletrônica e de
Telecomunicações na Universidade Federal de
Uberlândia como requisito de avaliação na
disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2.

Orientadora: Prof(a). Dra. Karine Barbosa
Carbonaro

Patos de Minas - MG
2019

THIAGO STEVANIN PANTANO

**UM ESTUDO COMPARATIVO DAS TÉCNICAS FBMC-OQAM E OFDM-CP
NO SISTEMA 5G**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Eletrônica e de
Telecomunicações na Universidade Federal de
Uberlândia como requisito de avaliação na
disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2.

Patos de Minas, 05 de julho de 2019.

Banca Examinadora

Profa. Dra. Karine Barbosa Carbonaro (FEELT/UFU)
Orientadora

Prof. Dr. André Luiz Aguiar da Costa (FEELT/UFU)

Profa. Dra. Priscila Crisfir Almeida Diniz (FEELT/UFU)

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me dado saúde e força para superar as dificuldades encontradas durante o curso.

Aos meus pais, José e Luzia, irmãos, Alexandre e Regina, sobrinhos, Pedro, Júlia, Luiza e Alice, cunhados, Paulinho e Ana e a minha namorada Lorena, pelo amor, incentivo e apoio incondicional.

A minha orientadora Profa. Dra. Karine Barbosa Carbonaro, pelo suporte, correções e incentivos.

A Universidade Federal de Uberlândia, por possuir um ensino de qualidade de forma gratuita, e ao seu corpo docente.

Ao meu amigo de bancada Lucas Borges e a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

RESUMO

Este trabalho de conclusão de curso apresenta a construção de diagramas de blocos, equacionamentos, resultados e trabalhos futuros para as modulações *Filter Bank Multi-Carrier* (FBMC) e *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). As modulações OFDM com prefixo cíclico (CP) e o FBMC com offset (OQAM) são analisadas comparativamente com o intuito de apresentar uma opção para a implementação do 5G. Todos os resultados obtidos para o estudo comparativo das modulações foi feito no software MATLAB.

Palavras chave: 5G, FBMC, FBMC-OQAM, OFDM E OFDM-CP.

ABSTRACT

This work presents the construction of block diagrams, equations, results and future work for Filter Bank Multi-Carrier (FBMC) and Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) modulations. The OFDM modulations with cyclic prefix (CP) and FBMC with offset (OQAM) are analyzed comparatively in order to present an option for the implementation of 5G. All the results obtained for the comparative study of the modulations were done in MATLAB software.

Keywords: 5G, FBMC, FBMC-OQAM, OFDM and OFDM-CP.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 2.1- Comunicação 5G.....	03
Figura 2.2 - Subportadoras Ortogonais	06
Figura 2.3 - Diagrama de blocos OFDM.	07
Figura 2.4 - Diagrama de blocos do transmissor OFDM.....	09
Figura 2.5 – Diagrama de blocos do receptor OFDM.	09
Figura 2.6 – Representação do OFDM-CP.....	10
Figura 2.7- Transmissor FBMC	13
Figura 2.8 - Receptor FBMC	13
Figura 3.1 – Geração da PSD.....	14
Figura 4.1 - PSD do OFDM e FBMC	20
Figura 4.2 – BER do OFDM-CP e FBMC-OQAM.	21
Figura 4.3 - Eficiência tempo-frequência do OFDM-CP e FBMC-OQAM.....	22
Figura 4.4- PSD de dois usuários OFDM-CP.....	23
Figura 4.5- PSD de dois usuários FBMC-OQAM.	24
Figura 4.6- SIR do OFDM-CP e FBMC-OQAM.	24
Figura 4.7- Modelo de canal Pedestre.....	25
Figura 4.8- Modelo de Canal Veicular.	26
 Quadro 2.1: Comparativo dos sistema 4G e 5G.	 04

LISTA DE ABREVIATURAS

3G	<i>Third Generation Mobile Internet</i>	Terceira geração de internet móvel
4G	<i>Fourth Generation of Mobile Internet</i>	Quarta geração de internet móvel
5G	<i>Fifth Generation of Mobile Internet</i>	Quinta Geração de internet móvel
ADC	<i>Analog-to-digital converter</i>	Conversor analógico para digital
AWGN	<i>Additive Gaussian White Noise</i>	Ruído Branco Gaussiano Aditivo
BER	<i>Bit Error Rate</i>	Taxa de erro de bit
CP	<i>Cyclic Prefix</i>	Prefixo cíclico
DAC	<i>Digital to Analog Converter</i>	Conversor Digital para Analógico
DVB	<i>Digital Video Broadcasting</i>	Transmissão de Vídeo Digital
FBMC	<i>Filter Bank Multi-Carrier</i>	Banco Multi-Transportadora de Filtro
FFT	<i>Fast Fourier transform</i>	Transformação rápida de Fourier
GFDM	<i>Generalized Frequency Division Multiplexing</i>	Multiplexação por Divisão de Frequência Generalizada
GSM	<i>Global System for Mobile</i>	Sistema Global para Celular
ICI	<i>Interference inter-carrier</i>	Interferência entre portadoras
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IFFT	<i>Inverse fast Fourier transform</i>	Transformada rápida de Fourier inversa
IoE	<i>Internet of Everything</i>	Internet de tudo
IoT	<i>Internet of Things</i>	Internet das Coisas
ISDB	<i>Integrated Services Digital Broadcasting Terrestrial</i>	Serviço Integrado de Transmissão Digital Terrestre
ISI	<i>Inter Symbol Interference</i>	Interferência entre símbolos
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>	União Internacional de Telecomunicações
M2M	<i>Machine-to-Machine</i>	Máquina a Máquina
MIMO	<i>Multiple-input Multiple-output</i>	Múltiplas Entradas Múltiplas Saídas
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>	Multiplexação de Divisão de Frequência Ortogonal

P/S	<i>Parallel/Serial Converter</i>	Conversor Paralelo/Serial
PSD	<i>Power Spectral Density</i>	Densidade espectral de potência
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>	Modulação de Amplitude em Quadratura
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>	Chaveamento de mudança de fase em quadratura
RF	<i>Radio frequency</i>	Rádio Frequência
RoF	<i>Radio over fiber</i>	Rádio sobre fibra
S/P	<i>Serial / Parallel Converter</i>	Conversor Serial/Paralelo
SIR	<i>Signal Interference Rate</i>	Taxa de interferência de sinal
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>	Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo
UFMC	<i>Universal Filtered Multi-Carrier</i>	Multi-portadora Filtrada Universal
V2V	<i>Vehicle-to-Vehicle</i>	Veículo a Veículo

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	I
RESUMO.....	II
ABSTRACT.....	III
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	IV
LISTA DE ABREVIATURAS	V
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 TEMA.....	1
1.2 PROBLEMATIZAÇÃO.....	1
1.3 OBJETIVOS.....	2
1.4 JUSTIFICATIVA.....	2
2 REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1 TECNOLOGIA 5G	3
2.2 MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO DE FREQUÊNCIA ORTOGONAL	5
2.3 MÚLTIPLAS PORTADORAS BASEADO EM BANCO DE FILTROS	10
3 MATERIAIS E MÉTODOS	13
3.1 DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA	13
3.2 TAXA DE ERRO DE BIT.....	15
3.3 EFICIÊNCIA TEMPO-FREQUÊNCIA	16
3.4 TAXA DE INTERFERÊNCIA DO SINAL	16
4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS	19
4.1 DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA	19

4.2	TAXA DE ERRO DE BIT	20
4.3	EFICIÊNCIA TEMPO-FREQUÊNCIA	21
4.4	TAXA DE INTERFERÊNCIA DO SINAL.....	22
5	CONCLUSÃO GERAL E TRABALHOS FUTUROS	26
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	27

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com a necessidade de aplicações ininterruptas, a utilização de serviços como, *streaming*, jogos online, áudio, vídeo e *downloads* em geral vem se popularizando, com isso, iniciou-se uma busca por conexões em altas taxas de transmissão. A Quinta Geração de internet móvel (5G) possui tecnologia baseada em processamento na nuvem (*cloud computing*), o que permite aumento da velocidade de internet do usuário, alta eficiência energética, menor latência e aumento do número de usuários conectados à rede; Tornando-se uma tecnologia muito avançada quando comparada a terceira geração de internet móvel (3G) e a quarta geração de internet móvel (4G) [1].

Muitos estudos estão sendo feitos sobre o tipo de modulação a ser utilizada na tecnologia 5G tendo em vista que os sistemas de rede móvel atuais provavelmente não suportarão o avanço tecnológico para a internet das coisas (IoT - *Internet of Things*), pois algumas das aplicações exigem baixa latência e uma maior largura de banda [1]. As modulações candidatas são: multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM - *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), e Multi-portadora com banco de filtro (FBMC - *Filter Bank Multicarrier*) [1].

1.1 TEMA

O tema desta pesquisa é um estudo comparativo das técnicas de multiplexação FBMC e OFDM-CP em sistemas 5 G.

1.2 PROBLEMATIZAÇÃO

A rede 5G permite maior largura de banda, maior número de usuários, maior eficiência energética e menor latência, se tornando mais compatível ao IoT, onde permite controlar eletrodomésticos, drones, robôs e outros equipamentos com conexão à internet, remotamente. Porém, além de atender a todos esses requisitos, será necessária cobertura de 100% do território nacional [1].

1.3 OBJETIVOS

O objetivo principal do trabalho é comparar as técnicas OFDM-CP e FBMC. Os objetivos gerais são:

- Apresentação da rede móvel 5G;
- Estudo as modulações OFDM, OFDM-CP e FBMC;
- Apresentação das métricas avaliativas PSD (*Power Spectral Density*), BER (*Bit Error Rate*) e SIR (*Signal Interference Rate*);
- Análise comparativa dos resultados obtidos nas simulações.

1.4 JUSTIFICATIVA

As novas tecnologias de multiplexação utilizam as técnicas de múltiplas portadoras que são indispensáveis para atender de forma eficaz a demanda por alta vazão de dados (taxa de 1Gbps em redes ultra densa) e latência muito baixa (aproximadamente 1 ms). Esses requisitos exigidos pela rede 5 G atenderam as aplicações IoT, (IoE - *Internet of Everything*), (M2M - *Machine-to-Machine*) e *Tactile Internet* [2].

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TECNOLOGIA 5G

Com o passar do tempo novas aplicações aparecem no mercado, com gráficos e funções inimagináveis, tais aplicações quando conectas a rede internet necessitam de uma alta taxa de transmissão de dados. A expectativa é que a sociedade se conecte cada dia mais, com isso, as empresas de telecomunicações se veem na obrigação de implementar uma nova tecnologia em que seria possível a criação de indústrias inteligentes, cidades inteligentes, (V2V - *Vehicle-to-Vehicle*), fazendas 4.0. Essas aplicações exigem tráfego de informações com alta confiabilidade, baixa latência e segurança. Os requisitos tornam o 5G uma promessa para o avanço da conectividade mundial, como apresentado na Figura 2.1 [3].

Figura 2.1 - Comunicação 5G.



Fonte: [3]

O espectro de frequência a ser utilizado pelo sistema 5G ainda não está padronizado pelo ITU, porém, a previsão para que o sistema 5G esteja disponível ao usuário, é a partir de 2020. Para

isso, é preciso avanços em relação à utilização do espectro de frequência e da eficiência energética porque o novo sistema possui latência menor ou igual a 10 vezes do sistema 4G, conforme as informações apresentadas no Quadro 2.1 [3] [4].

Quadro 2.1 - Comparativo dos sistemas 4G e 5G.

Parâmetros	4G	5G
Latência	10 ms	Menor que 1ms
Pico de taxas de dados	1 Gbps	20 Gbps
Número de conexões móveis	8 Bilhões em 2016	11 Bilhões em 2021
Largura de banda do canal	20 MHz	100 MHz below 6 GHz
Faixa de frequência	600 MHz até 5.925 GHz	Não definido pela ITU
Forma de onda <i>Uplink</i>	Acesso múltiplo por divisão de frequência de portadora única (SC-FDMA)	Opção para multiplexação de divisão de frequência ortogonal com prefixo cíclico (CP-OFDM)
Potência transmitida pelo equipamento do usuário (UE)	+23 decibel-milliwatts (dBm)	+ 26 dBm para menos de 6 GHz

Fonte: adaptado de [4].

Como observado no Quadro 2.1, a tecnologia 5G procura revolucionar a comunicação móvel diminuindo a latência, aumentando a eficiência de entrega dos pacotes de dados; visando a eficiência energética tanto para os dispositivos conectados quanto para o sistema de comunicação e a cobertura de 100% do território nacional [3] [4]. Para atender a esses altos requisitos têm-se avaliado a combinação de algumas tecnologias promissoras, MIMO de larga escala (*massive MIMO*), dispositivos inteligentes, ondas milimétricas (*mmWave*). A viabilidade de implementação dessas tecnologias baseia-se em formas de ondas alternativas, como a transmissão com múltiplas portadoras para as altas taxas de transmissão.

Nos últimos anos, uma das técnicas que tem sido utilizada é a multiplexação por divisão de frequência ortogonal – OFDM. Ela é utilizada em aplicações comerciais, tais como sistemas de comunicação sem fio (Wi-Fi 802.11), sistema de comunicação de vídeo digital terrestre (DVB-T *Digital Video Broadcasting - Terrestrial*), sistemas celulares 4G LTE, entre outras. Outra técnica candidata é o banco de filtros multiportadoras FBMC que é semelhante à técnica OFDM. Porém, o FBMC utiliza-se filtros digitais para a construção dos subcanais não ortogonais.

2.2 MULTIPLEXAÇÃO POR DIVISÃO DE FREQUÊNCIA ORTOGONAL

Esta técnica consiste em um esquema de transmissão e de recepção baseado em multiportadoras. Para alcançar maior eficiência espectral é necessária a sobreposição espectral das portadoras, sem introduzir interferências entre elas. Isso é possível se as portadoras forem ortogonais entre si, ou seja, se a condição definida na Equação (2.1) for atendida.

$$\frac{1}{T} \int_0^T \cos(\omega_1 t + \theta) \cos(\omega_2 t) dt = 0 \quad (2.1)$$

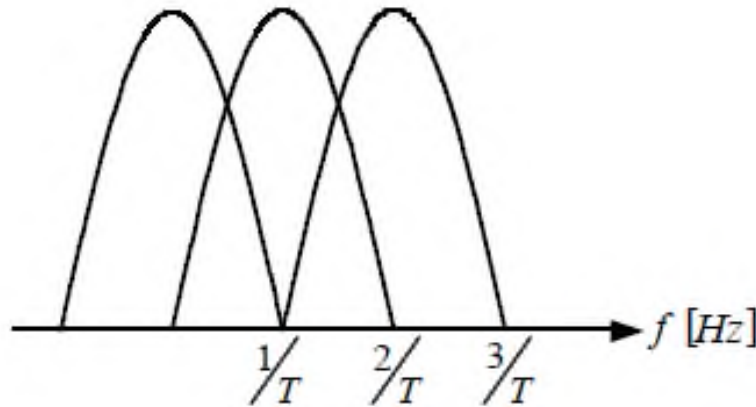
Em que, T é o período do sinal.

A ortogonalidade e a sobreposição espectral, ilustrada na Figura 2.2, são baseadas no espaçamento em frequência do símbolo OFDM definido na Equação 2.2.

$$\Delta f = \frac{1}{T_{OFDM}} \quad (2.2)$$

Em que, T_{OFDM} é o período do símbolo OFDM definido como o inverso da taxa de transmissão de cada subcanal (R_{sp}).

Figura 2.2 – Subportadoras ortogonais.



Fonte: O autor.

O OFDM não altera a taxa de transmissão do sistema global, mas, a sequência de dados serial a ser transmitida é dividida em N feixes paralelos. O número de subportadoras ortogonais é determinado conforme a Equação 2.3.

$$N = k \cdot \sigma_t \cdot R_s \quad (2.3)$$

Em que,

k - fator de correção (5 – 50%) e (50 – 90%);

σ_t - valor rms do atraso de propagação do canal;

R_s - taxa de transmissão dos símbolos;

O OFDM oferece transmissão de dados robusta porque divide a largura de banda disponível de um canal com desvanecimento seletivo na frequência, em várias sub-bandas estreitas com desvanecimento uniforme conforme a Equação (2.4).

$$BW_{sp} = \frac{BW_s}{N} \quad (2.4)$$

Em que,

BW_s - largura de banda de sistemas com portadora única;

N - número de subportadoras.

O desvanecimento seletivo ocorre porque uma mesma frente de onda, percorrendo caminhos diferentes (propagação multipercurso), atinge a antena de recepção em tempos diferentes. Em sistemas de faixa larga, ou altas taxas de transmissão, essas atenuações tem comportamento de um filtro rejeita faixa, apresentando um nulo dentro do espectro de frequências do sinal transmitido. As componentes espectrais do sinal transmitido são afetadas de maneira desigual. A distorção provocada contribui fortemente para o aumento da interferência intersimbólica, com consequente aumento da probabilidade de erro.

O OFDM utiliza a sobreposição espectral de várias portadoras para uma maior eficiência espectral. Na Equação 2.5 tem-se a definição da largura de faixa mínima para garantir a ortogonalidade e a sobreposição espectral.

$$BW_{OFDM} = \frac{N + 1}{N} BW_{sp} \quad (2.5)$$

Em que,

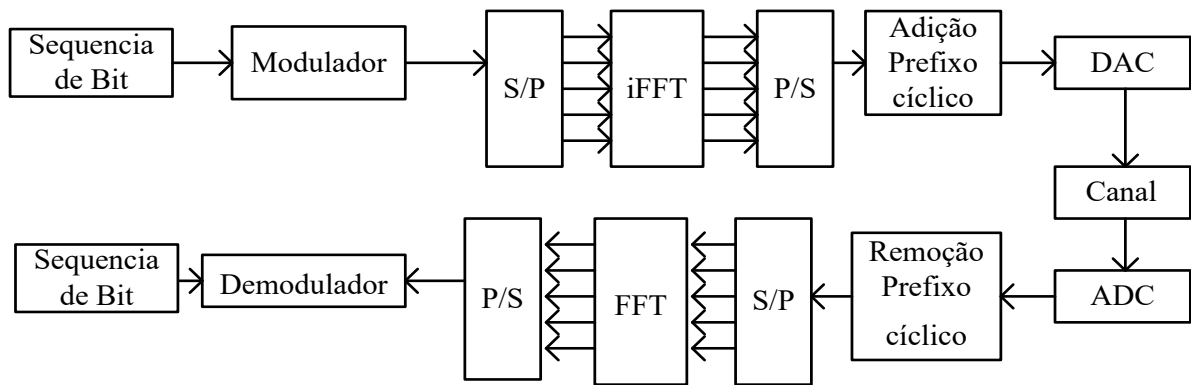
BW_{sp} - largura de banda das subportadoras;

N - número de subportadoras.

O diagrama de blocos generalizado do sistema de transmissão e recepção OFDM, ilustrado na Figura 2.3, é utilizado em sistemas de transmissão de rádio digital, TV digital, TV móvel e comunicação utilizando a linha de energia elétrica [5]. A sequência serial binária a ser transmitida é modulada digitalmente, geralmente em QPSK ou QAM, posteriormente a informação é

convertida para paralelo, para que seja realizado o processamento desses dados por meio da IFFT, transformando assim o sinal para o domínio do tempo. É adicionado então o prefixo cíclico (CP - *Cyclic Prefix*), que ameniza consideravelmente a interferência intersimbólica. O sinal modulado no domínio do tempo é convertido de digital para analógico e então serializado. Por fim, o sinal é transladado de banda-base para banda passante via multiplicação pela frequência da portadora para que seja transmitido.

Figura 2.3 - Diagrama de blocos do sistema OFDM.



Fonte: adaptado de [6].

Do lado do receptor, o sinal percorre o caminho contrário, passando por um conversor ADC e posteriormente o prefixo cíclico é removido. A FFT é utilizada no lugar da IFFT porque a informação original no transmissor encontra-se no domínio da frequência [6].

Para os efeitos do canal de múltiplos percursos e considerando o i -ésimo símbolo OFDM, o sinal transmitido $x_i(t)$ é definido na Equação (2.6) [5][7].

$$x_i(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_i[k] e^{j2\pi f_k(t-lT_{simb})} \quad (2.6)$$

Em que,

$X_i[k]$ - representa a sequência de bits;

k - número total de subportadoras;

l - número total de símbolos;

T_{simb} - duração do símbolo;

N - número de subportadoras de símbolos paralelos;

f_k - frequência da subportadora.

O sinal recebido $y_l(t)$ é escrito conforme a Equação (2.7) [7].

$$y_l(t) = x_l(t) * h_l(t) + z_l(t) = \int_0^{\infty} h_l(t)x_l(t - \tau)dt + z_l(t) \quad (2.7)$$

Em que,

$z_l(t)$ - ruído branco gaussiano aditivo (AWGN - *Additive Gaussian White Noise*);

$h_l(t)$ - resposta ao impulso do canal.

Aplicando a transformada de *Fourier* na Equação (2.7) obtém-se a Equação (2.8).

$$y_l[n] = x_l[n] * h_l[n] + z_l[n] = \sum_{m=0}^{\infty} h_l[m]x_l[n - m] + z_l[n] \quad (2.8)$$

Um dos grandes problemas do OFDM é a sobreposição dos símbolos durante a transmissão. Para evitar este problema utiliza-se o intervalo de guarda, ilustrado na Figura 2.6, que facilita a recuperação do sinal ao utilizar a transformada de *Fourier* [7].

O sinal recebido, definido na Equação (3), é reescrito na Equação (2.9).

$$Y_l[k] = \sum_{n=0}^{N-1} y_l[n] e^{-\frac{j2\pi kn}{N}} = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left\{ \left(\sum_{m=0}^{\infty} h_l[m] e^{-\frac{j2\pi i(n-m)}{N}} \right) X_l[i] \sum_{n=0}^{\infty} e^{-\frac{j2\pi i(k-i)}{N}} \right\} e^{-\frac{j2\pi i kn}{N}} + Z_l[k] \quad (2.9)$$

$$= H_l[k]X_l[k] + Z_l[k]$$

Em que,

$H_l[k]$ - frequência de subportadora;

$X_l[k]$ - resposta em frequência do canal;

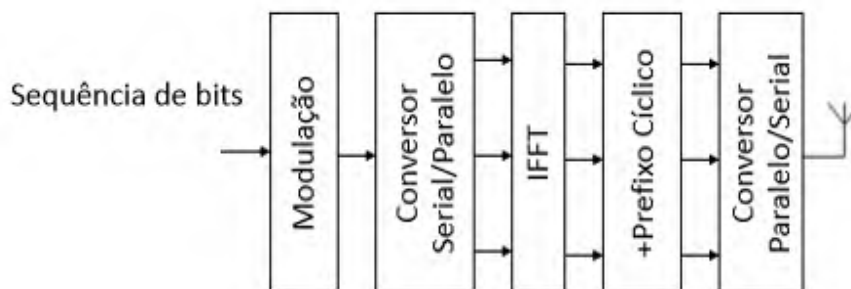
$Z_l[k]$ - ruído no domínio da frequência.

A Figura 2.4 ilustra o transmissor OFDM, onde uma sequência binária é modulada, convertida de uma sequência serial para várias sequencias em paralelo, que passam pela transformada inversa de Fourier, se adiciona o prefixo cíclico e converte de paralelo para serial para a transmissão do sinal [8].

No receptor OFDM, ilustrado na Figura 2.5, o sinal passa por um filtro onde se retira a extensão cíclica e a banda de guarda.

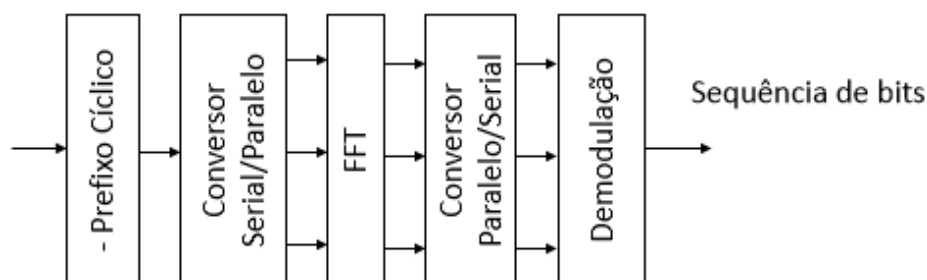
Posteriormente, aplica-se a Transformada Fourier (FFT), para obter uma aproximação dos símbolos originalmente transmitidos [8].

Figura 2.4 - Diagrama de blocos do transmissor OFDM



Fonte: O Autor.

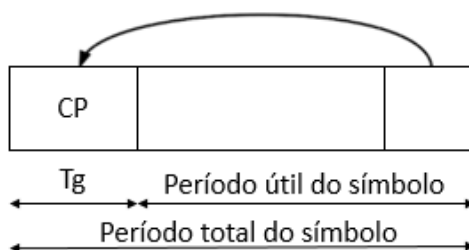
Figura 2.5 - Receptor OFDM.



Fonte: O autor.

A transmissão sem fio geralmente é realizada em um ambiente onde ocorre multipercursos, fazendo com que na recepção do sinal ocorra a interferência entre símbolos, proporcionando ao sinal além do ruído do próprio canal, distorção e perdas. Para amenizar a ISI e a ICI se adiciona intervalo de guarda e o prefixo cíclico, como mostrado na Figura 2.6 [9].

Figura 2.6 -Representação do OFDM-CP



Fonte: Adaptado de [9].

A Figura 2.6 apresenta o período total do símbolo OFDM e como ele é dividido, com o período útil do símbolo e o tempo de guarda, que é uma separação temporal entre um símbolo e outro transmitido. A escolha correta do tamanho do prefixo cíclico, faz com que as interferências entre os símbolos e entre portadoras sejam atenuadas significativamente. Na Equação 2.10 define-se período total do símbolo necessário.

$$T_{TOTAL} = N.T_{OFDM} + T_g \quad (2.10)$$

O valor do intervalo de guarda deve ser maior ou igual ao maior atraso provocado pelo canal ($T_g \geq \tau_{m\acute{a}x}$).

Na recepção do sinal, as amostras adicionadas ao intervalo de guarda são removidas, para que apenas o período de informação útil passe pela DFT, no intuito de obter a estimativa dos símbolos originalmente transmitidos [10].

Para um melhor entendimento, podemos destacar as vantagens e desvantagens do OFDM-CP. O sistema se torna mais robusto, tendo em vista que se pode utilizar os dados retransmitidos no tempo de guarda, reduz consideravelmente a interferência intersibólica ISI e a interferência entre portadoras ICI. Entretanto possui a desvantagem de ocupar uma banda maior, pois o sistema retransmite dados já sendo transmitidos [11][12].

2.3 MÚLTIPLAS PORTADORAS BASEADO EM BANCO DE FILTROS

A técnica de multiplexação FBMC é implementada em várias áreas das telecomunicações, como em rádio sobre fibra - *Radio over Fiber* (RoF) e TV Digital com padrões DVB-T e ISDB-T, sistemas multiportadoras para sistemas de televisão.

No sistema de múltiplas portadoras baseado em banco de filtros (FBMC - *Filter-bank based multi-carrier*) cada subcanal funciona com um filtro, que após ser projetado é replicado para os diferentes canais formando um banco de filtros. Cada subcanal possui banda estreita, alta eficiência espectral e taxa de dados elevada [13].

O sistema FBMC aceita qualquer tipo de modulação, desde que possua separação entre os subcanais. Os canais do FBMC são separados em dois: Par quando envolve apenas a parte real da entrada da IFFT e Ímpar quando envolve apenas a parte imaginária da entrada da IFFT;

Esses canais são utilizados separadamente quando modulados em QAM. Porém, quando se aplica a ortogonalização no QAM obtém-se o OQAM. Esta explora ambos os canais

simultaneamente resultando em um aumento da taxa de dados, desde que obedeça ao teorema de *Nyquist*.

O sinal FBMC-OQAM é definido na Equação (20) [14].

$$i(t) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} \sum_{m=0}^{N-1} a_{m,n} h(t - \frac{nT}{2}) e^{\frac{j2\pi}{T}mt} e^{j\varphi_{m,n}} \quad (2.11)$$

Em que,

N - número da subportadoras;

$a_{m,n}$ - símbolo real transmitido na m -subportadora e no instante $\frac{nT}{2}$;

$h(t)$ - resposta ao impulso do filtro;

$\varphi_{m,n}$ - fase representada pela Equação (21) [14].

$$\varphi_{m,n} = \frac{\pi}{2}(m + n) - \pi mn \quad (2.12)$$

A resposta ao impulso do filtro é definida na Equação (22) [14].

$$h(t) = \left\{ \frac{1}{\sqrt{A}} \left[1 + 2 \sum_{k=1}^{K-1} (-1)^k F_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{KT}\right) \right] \right\} \quad t \in [0, KT] \quad (2.13)$$

Em que,

A - constante de normalização;

k - fator de sobreposição (*overlapping*);

$L = KN$ - comprimento do filtro, para $k = 0, 1, \dots, L - 1$;

f_k - parâmetro de projeto do filtro.

Normalizando o espectro de energia do sinal, obtem-se a seguinte Equação (23) [14].

$$X_n(k) = \frac{X(k)}{\max[X(k)]} \quad (2.14)$$

Em que,

$X(k)$ - espectro de energia unilateral do sinal no N -ésimo ponto;

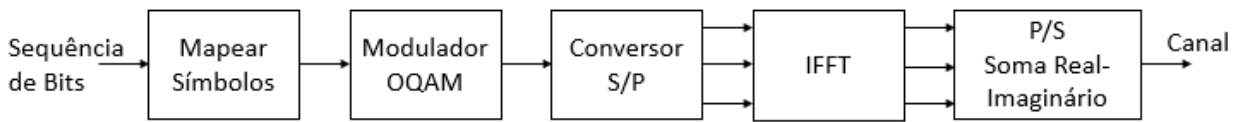
$\max[X(k)]$ - máximo valor do espectro de $X_n(k)$ considerando $k = 1 \sim \frac{N}{2} X_n(k)$.

A modulação utilizada dentro do sistema FBMC foi a OQAM e é representada pela Equação (24) [20].

$$r(t) = \sqrt{P_t} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} a_n p(t - nT) \right] \cos(\omega_c t + \theta) - \sqrt{P_t} \left[\sum_{n=-\infty}^{\infty} b_n p(t - (n + \frac{1}{2})T) \right] \sin(\omega_c t + \theta) + n(t) \quad (2.15)$$

A Figura 2.7 ilustra o diagrama de blocos do transmissor FBMC.

Figura 2.7 - Transmissor FBMC.

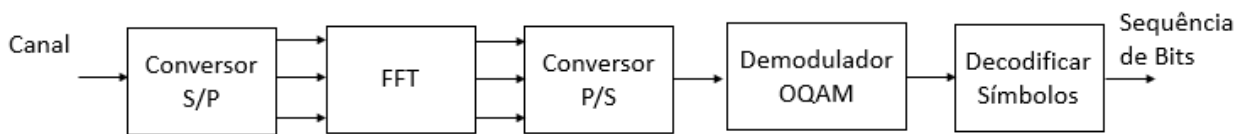


Fonte: Adaptado de [15].

A Figura 2.7 apresenta uma sequência de entrada que é mapeada, modulada, convertida para uma sequência paralelo e aplicadas à transformada inversa de *Fourier*, posteriormente a parte real é somada a parte imaginária defasada de meio período de símbolo, e o sinal é transmitido.

A Figura 2.8 ilustra o diagrama de blocos do receptor FBMC.

Figura 2.8 - Receptor FBMC.



Fonte: Adaptado de [15].

A figura 2.8 mostra como se dá a recepção de um sinal no FBMC, em que o sinal serial de entrada é convertido em paralelo, por um conversor serial/paralelo em n sinais, que são filtrados e aplicados a transformada rápida de *Fourier*, as informações resultantes são convertidas em serial, onde a sequência é demodula e decodificada, obtendo a sequência original de bits.

O Capítulo 2 apresenta o funcionamento e equacionamentos dos sistemas OFDM-CP e FBMC. Com o intuito de complementar o estudo e criar uma métrica avaliativa, no Capítulo 3 são apresentados os materiais e métodos utilizados, assim como a modelagem matemática utilizada para a comparação das multiplexações.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

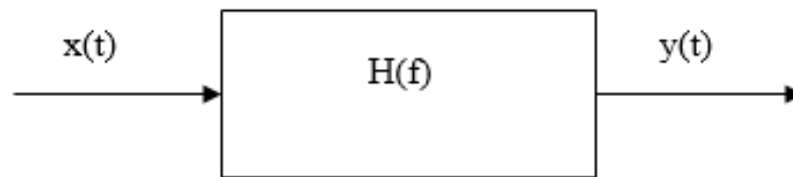
Neste trabalho adotou-se a metodologia fundamentada em um estudo teórico do assunto seguido por uma simulação em MATLAB de equações matemáticas. O estudo para a escrita do referencial teórico foi feito em livros de comunicações móveis, comunicações digitais e artigos publicados no IEEE (Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos). Após a leitura de diversos artigos, para fazer a comparação entre as técnicas OFDM-CP e FBMC-OQAM, foram escolhidas as métricas avaliativas apresentadas nas subseções a seguir.

3.1 DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA

A densidade espectral de potência (PSD - *Power Spectral Density*) relaciona a energia do sinal com sua frequência e a sua unidade de medida é Watt por radiano por segundo (W/rad/s) ou Watt por Hertz (W/Hz)[16]. Ela apresenta o valor de magnitude, mas não o valor da fase. A PSD é uma medida importante para os sistemas práticos tanto o sinal sendo determinístico ou aleatório.

A Figura 3.1 ilustra um sinal aleatório $x(t)$ passado por um filtro invariante no tempo com resposta de frequência $H(f)$, o sinal resultante $y(t)$.

Figura 3.1 – Geração da PSD.



$$S_y(f) = S_x(f)|H(f)|^2$$

Fonte: Adaptado de [17]

Observando a Figura 3.1, a PDS do sinal é a média da magnitude da transformada de Fourier ao quadrado, durante um intervalo de tempo grande. A densidade espectral de potência é definida na Equação (3.1) [17].

$$S_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} E \left[\frac{1}{2T} \left| \int_{-T}^T x(t) e^{-j2\pi f t} dt \right|^2 \right] \quad (3.1)$$

Em que,

E – Média

T – Período do sinal

$x(t)$ – Sinal a ser analisado

A PSD é a transformada de Fourier da função de autocorrelação $[R_x(\tau)]$ conforme definido nas Equações (3.2) e (3.3) [17].

$$S_x(f) = \int_{-T}^T R_x(\tau) e^{-j2\pi f \tau} d\tau \quad (3.2)$$

$$R_x(\tau) = E\{x(t)x^*(t + \tau)\} \quad (3.3)$$

O cálculo da potência de um sinal aleatório em uma determinada faixa de frequência, ou largura de banda, segue os seguintes passos [17]:

Passo 1 – Cálculo da potência total conforme a Equação (3.4).

$$P = \int_{-\infty}^{+\infty} S_x(f) df = R_x(0) \quad (3.4)$$

Passo 2 – Cálculo da potência no intervalo de f_1 e f_2 conforme a Equação (3.5).

$$P = \int_{f_1}^{f_2} S_x(f) df = R_x(0) \quad (3.5)$$

Para os sistemas OFDM e FBMC tem-se que a PSD é definida conforme a Equação (3.6) [18].

$$|PSD|_j = \sum_{i=0}^{KL-1} |[W_N G U \sqrt{\Lambda}]_{j,i}|^2 \quad (3.6)$$

Em que, W_N é a matriz DFT de tamanho N , U e Λ são obtidos da composição própria de $R_x = U \Lambda U^H$ e, em muitos casos tem-se R_x é uma matrix identidade conduzindo a $U \sqrt{\Lambda} = I_{LK}$. A

matriz de transmissão é definida como $G = [g_{1,1} \dots g_{L,1} g_{1,2} \dots g_{L,K}]$ e o índice j representa a frequência definida como $\Delta f = \frac{f_s}{N}$, L é o número de subportadoras e K é o número de símbolos no tempo.

3.2 TAXA DE ERRO DE BIT

A taxa de erro de bit (BER - *Bit Error Rate*) analisa possíveis falhas de transmissão do bit que causam degradação de desempenho do sistema. A BER é representada de forma geral na Equação (3.7).

$$BER = \frac{\text{Número de bits errados}}{\text{Número de bits transmitidos}} \quad (3.7)$$

São vários os fatores que influenciam no erro do bit, tais como: falhas de sincronização entre o transmissor e o receptor, defeitos de componentes, ruído, indução eletromagnética e, outros. [19]

O ruído influencia os demoduladores QAM e OQAM. A modulação OQAM é considerado como um caso especial QAM porque separa um símbolo QAM em dois símbolos. Portanto, para a modulação I-ary QAM retangular ou para o símbolo OQAM a expressão BER é a mesma e definida na Equação (3.8) [20].

$$P_b \approx \frac{\sqrt{I} - 1}{\sqrt{I} \log_2 \sqrt{I}} \operatorname{erfc} \left[\sqrt{\frac{3 \log_2 I}{2(I-1)}} \sqrt{\frac{E_b}{N_0}} \right] \quad (3.8)$$

Em que,

E_b – energia do bit;

erfc - função erro complementar;

N_0 – PSD do ruído branco gaussiano aditivo;

I – número de símbolos da constelação QAM.

Com a constante exigência de alta taxa de dados, a BER dos sistemas de comunicação tende a diminuir cada vez mais, com isso, uma taxa de erro de bit aceitável está em potência de 10.

A simulação da BER no *software* MATLAB é feita usando simulações computacionais estocásticas, conhecida como Monte Carlo, entretanto, se assumir um modelo de canal de

transmissão simples e um modelo de fonte de dados ideal, a BER também pode ser calculada analiticamente [21].

3.3 EFICIÊNCIA TEMPO-FREQUÊNCIA

A métrica avaliativa eficiência tempo-frequência é utilizada para mostrar qual formato de modulação utiliza os recursos disponíveis tanto no domínio tempo, quanto no da frequência.

A eficiência tempo-frequencia é definida, para os sistemas na Equação (3.9). [18]

$$\rho = \frac{KL}{(KT + T_G)(FL + F_G)} \quad (3.9)$$

Em que,

T_G – tempo de guarda;

F_G – banda de guarda;

T – espaçamento no tempo;

F – espaçamento em frequência;

K – número de símbolos no tempo;

L – número de subportadoras.

No caso limite tem-se o número de símbolos $K \rightarrow \infty$ e o número de subportadoras $L \rightarrow \infty$ e, portanto, a eficiência definida na equação anterior será reescrita na forma:

$$\rho = \frac{1}{TF} \quad (3.10)$$

A eficiência é inversamente proporcional ao espaçamento tempo-frequência.

3.4 TAXA DE INTERFERÊNCIA DO SINAL

Para comunicações sem fio de alta taxa de dados com baixo consumo de energia, é necessário garantir o desempenho ótimo do sistema, com isso, se torna necessário ao receptor conhecer a *signal-to-interference ratio* (SIR) do sistema, que mede a interferência co-canal gerada por outro rádio [18][22].

Para maximizar o SIR, considere o espaçamento ótimo entre as subportadoras como a Equação (3.11).

$$\frac{\sigma_t}{\sigma_f} \approx \frac{\tau_{rms}}{v_{rms}} \quad (3.11)$$

Em que, σ_t é a localização-tempo e σ_f é a localização-frequência. Por exemplo, para o sistema FBMC-OQAM, esses valores de localização são $\sigma_t = 0,2745T_0$ e $\sigma_f = 0,328T_0^{-1}$.

Para transferência de dados em altas taxas, a resposta do canal depende do deslocamento Doppler, introduzido pela mobilidade do receptor, bem como dos sinais de multipercurso introduzidos pela velocidade do vento, árvores, tráfego, frequência da portadora e se está se deslocando no sentido do transmissor, ou se distanciando do mesmo [18][22]. Para o espectro Jakes Doppler, a velocidade em RMS é definida na Equação (3.12).

$$v_{rms} = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{v}{c} f_c \quad (3.12)$$

Em que,

v – velocidade;

c – velocidade da luz; e

f_c – frequência da portadora.

Os modelos de canal conhecidos como Pedestre e Veicular, o atraso de espalhamento são $\tau_{rms} = 46ns$ e $\tau_{rms} = 370 ns$, respectivamente.

Na Equação (3.13) define-se taxa de interferência do sinal para o sistema OFDM com modulação QAM [18].

$$SIR_{OFDM}^{sem\ ISI} = \frac{{}_1F_2\left(\frac{1}{2}; \frac{3}{2}, 2; -\left(\pi \frac{v_{max}\tau_{max}}{TF-1}\right)^2\right)}{1 - {}_1F_2\left(\frac{1}{2}; \frac{3}{2}, 2; -\left(\pi \frac{v_{max}\tau_{max}}{TF-1}\right)^2\right)} \quad (3.13)$$

No sistema OFDM-CP, para um overhead CP fixo de $k = \frac{T_{CP}}{T_0} = T_{CP}F = TF - 1$, o espaçamento entre as subportadoras para evitar a ISI é $T_{CP} = \tau_{max}$ e, portanto, o espaçamento ótimo é $F = \frac{k}{\tau_{max}}$. Considerando as modulações tem-se que o espaçamento de frequência para a OQAM é $F = \frac{1}{T_0}$ e para a QAM $F = \frac{1}{2T_0}$. Para o sistema LTE têm-se as seguintes condições: $k = \frac{1}{14} \rightarrow TF = 1,07$.

Na Equação (3.14) define-se a taxa de interferência do sinal para o sistema FBMC com modulação OQAM [18].

$$SIR_{FBMC}^{sem\,ISI} = \frac{L_1 K_1 + L_2 K_2}{\|\mathcal{R}\{G_1^H G_2\}\|_F^2 + \|\mathcal{R}\{G_2^H G_1\}\|_F^2} \quad (3.14)$$

Em que,

$\|\cdot\|_F$ – representa a norma *Frobenius*;

G_1 – caracteriza o primeiro usuário (usuário 1);

G_2 – caracteriza o segundo usuário (usuário 2);

Dado que a matriz de transmissão é definida como $G = [g_{1,1} \dots g_{L,1} \ g_{1,2} \dots g_{L,K}]$.

O equacionamento feito no Capítulo 3 será utilizado no Capítulo 4 como métrica avaliativa para a comparação entre o OFDM-CP e o FBMC. As equações serão implementadas no software matemático MATLAB, e os resultados serão apresentados e discutidos no Capítulo 4.

CAPÍTULO 4

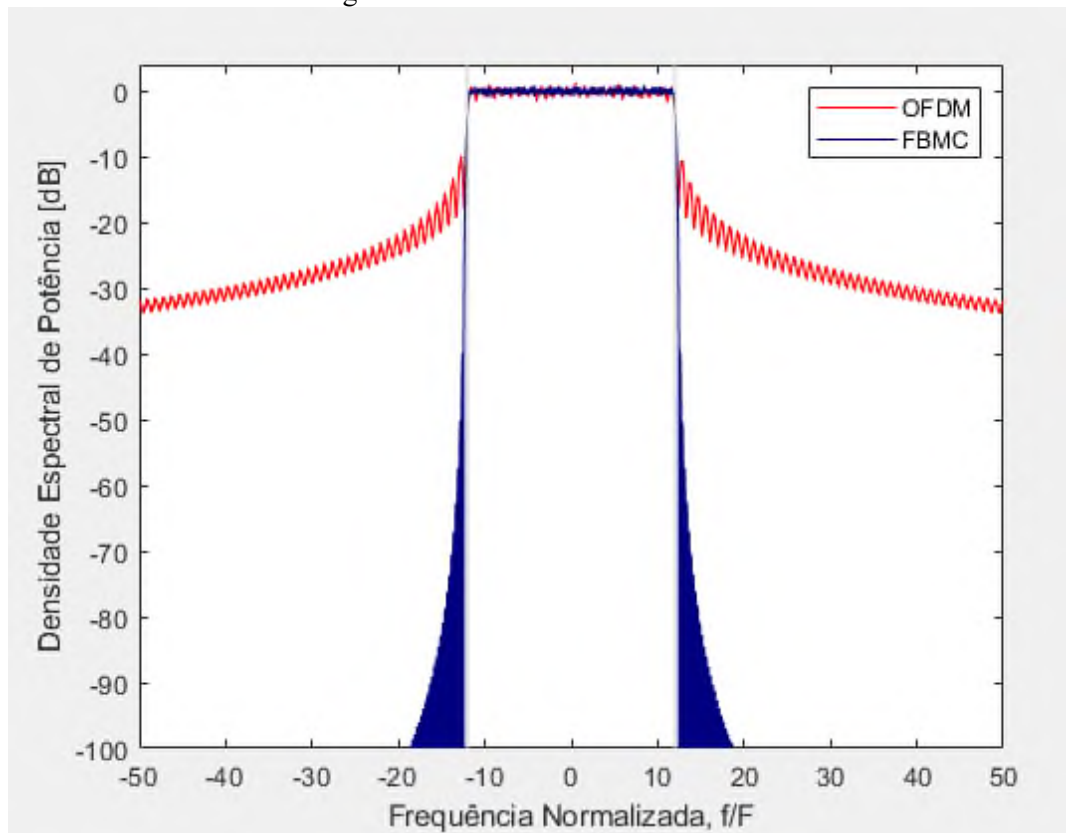
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas simulações no MATLAB para as técnicas OFDM- CP e FBMC – OQAM. A metodologia seguida nas simulações foi apresentada no Capítulo 3. Os resultados são analisados e discutidos para que algumas considerações sejam feitas.

4.1 DENSIDADE ESPECTRAL DE POTÊNCIA

A Figura 4.1 ilustra a densidade espectral de potência. Observe que as duas técnicas ocupam a largura de banda estabelecida com o mesmo desempenho.

Figura 4.1 – PSD do OFDM e FBMC.



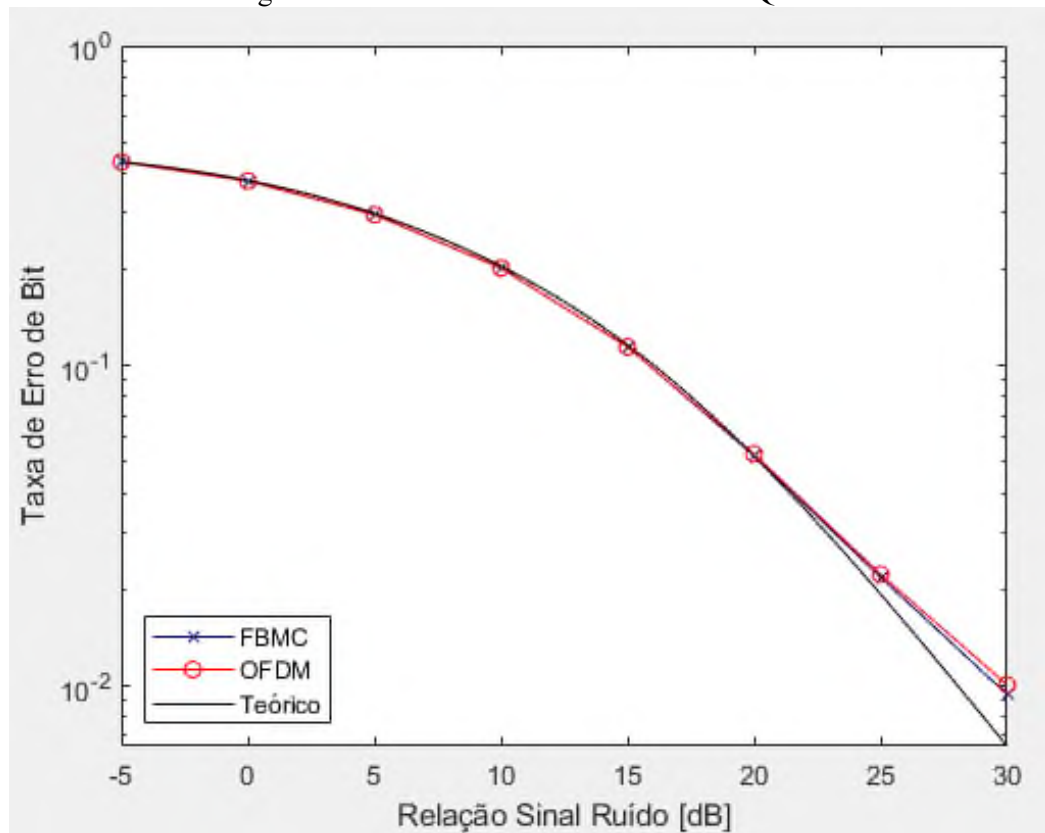
Fonte: O autor.

A PSD do OFDM, curva vermelha, apresenta lóbulos laterais mais altos ocasionando a utilização do espectro fora da largura de banda estabelecida. Enquanto que a PSD da FBMC, curva azul, tem lóbulos laterais menores permitindo a utilização do espectro alocado resultando em eficiência espectral. Observe que no FBMC há menos emissões fora da banda do que no OFDM. Portanto, em relação à métrica avaliativa PSD, verificou-se que o FBMC proporciona maior eficiência espectral do que o OFDM.

4.2 TAXA DE ERRO DE BIT

A Figura 4.2 ilustra a métrica avaliativa taxa de erro de bit nos ambientes com ruído. A curva na cor preta é a teórica e, as curvas nas cores vermelha e azul são as simuladas e apresentam resposta aproximadamente igual a teórica. Observe que nas mesmas condições de simulação, o valor de BER igual a 10^{-1} é atingido com uma relação sinal ruído de aproximadamente 15 dB nas duas técnicas.

Figura 4.2 – BER do OFDM-CP e FBMC-OQAM.



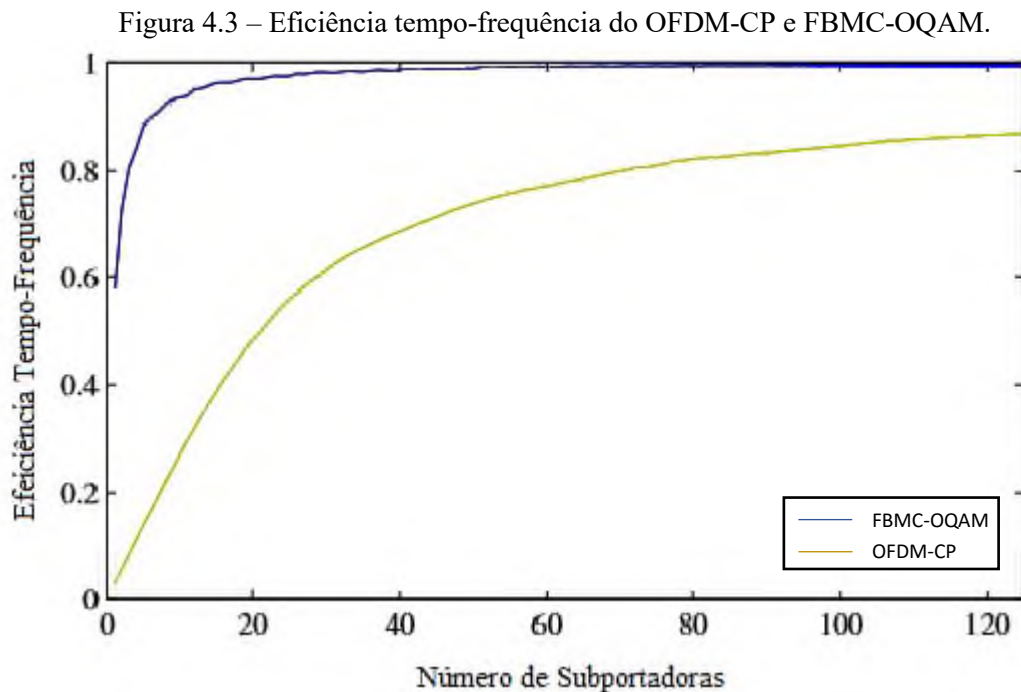
Fonte: O autor.

Um valor de BER igual a 10^{-2} é atingido com uma relação sinal ruído de aproximadamente 30 dB nas duas técnicas. Portanto, verificou-se que o OFDM-CP e FBMC-OQAM apresentam o mesmo desempenho em relação à métrica avaliativa taxa de erro de bit.

4.3 EFICIÊNCIA TEMPO-FREQUÊNCIA

Para avaliar a métrica eficiência tempo-frequência foi feita as seguintes considerações para $K \rightarrow \infty$ e $L \rightarrow \infty$ e, tem-se que a eficiência será apenas $\rho = \frac{1}{TF}$. Para FBMC - OQAM o valor de TF é igual a 1 e para o OFDM - CP, o valor de TF é igual a 1,07 para o sistema LTE. [18]

No gráfico ilustrado na Figura 4.3 são apresentados os resultados da eficiência tempo-frequência. De acordo com o apresentado na metodologia, a eficiência tempo-frequência relaciona-se com o número de subportadoras utilizadas.



Fonte: O autor.

Observe que a técnica FBMC – OQAM, curva azul, atinge o valor de aproximadamente 1 enquanto a segunda técnica, OFDM - CP, curva amarela, atinge aproximadamente 0,93. A primeira técnica apresentou desempenho superior em todos os valores de subportadoras, intervalo de 20 a

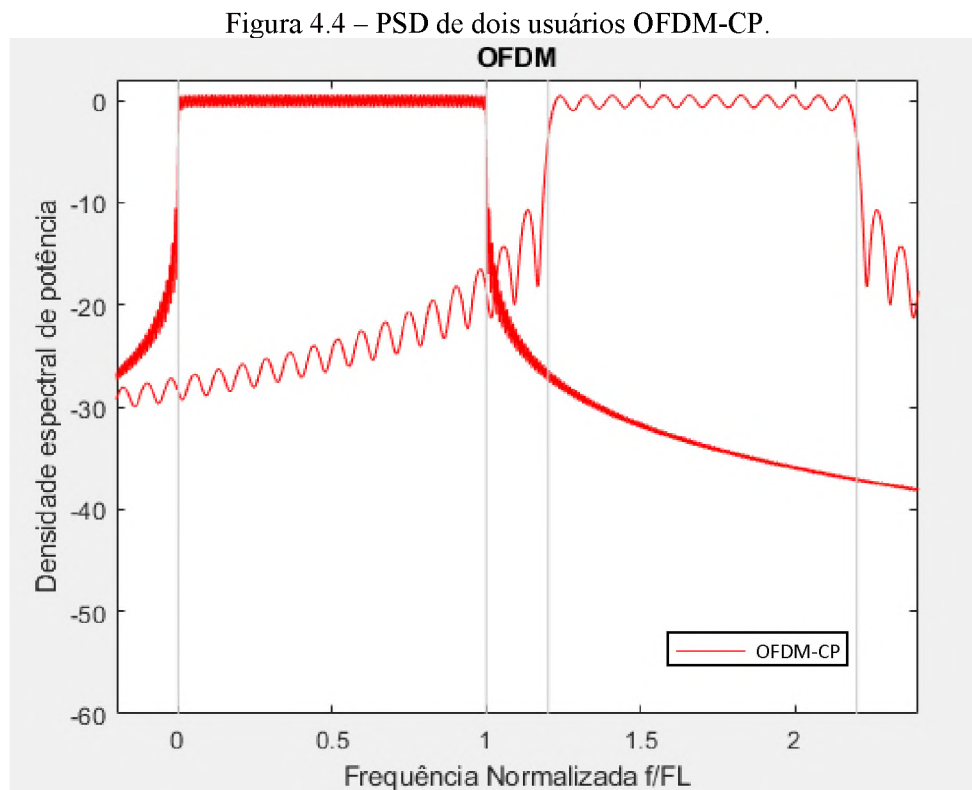
120. Portanto, em relação à métrica avaliativa eficiência tempo-frequência, o FBMC - OQAM supera o desempenho do OFDM - CP.

4.4 TAXA DE INTERFERÊNCIA DO SINAL

Para avaliar a métrica SIR foram feitas algumas considerações [15]:

- Número de subportadoras: $L_1 = 96$ e $L_2 = 12$;
- Espaçamento entre as subportadoras: $F_1 = 15$ kHz e $F_2 = 120$ kHz;
- Largura de banda para a transmissão: $F_1 L_1 = F_2 L_2 = 1,44$ MHz;
- Banda de guarda: $F_G = 0,2 F_1 L_1 = 36$ kHz;
- Espaçamento tempo-frequência: $T_1 F_1 = T_2 F_2 = 1$.

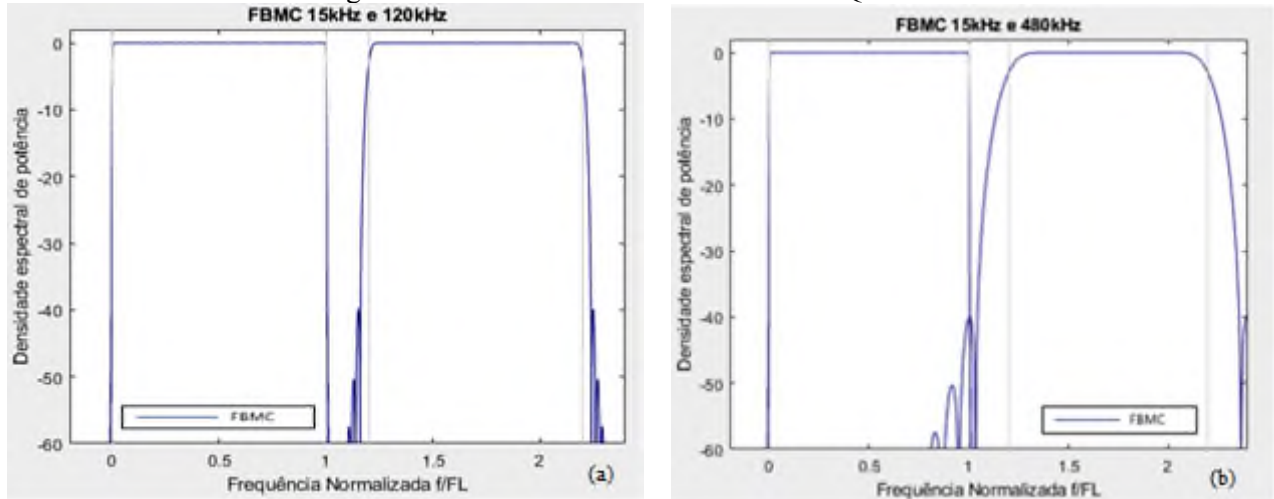
A Figura 4.4 ilustra a interferência entre os usuários 1 e 2 para o OFDM – CP.



A Figura 4.5 ilustra a interferência entre os usuários 1 e 2 para o FBMC – OQAM. Para que a comparação seja justa em relação à latência é preciso aumentar o espaçamento da subportadora

no FBMC por fator de quatro gerando $F = 480$ kHz. Para manter a largura de banda para a transmissão em 1,44 MHz é preciso diminuir o número de subportadoras 12 para apenas 3.

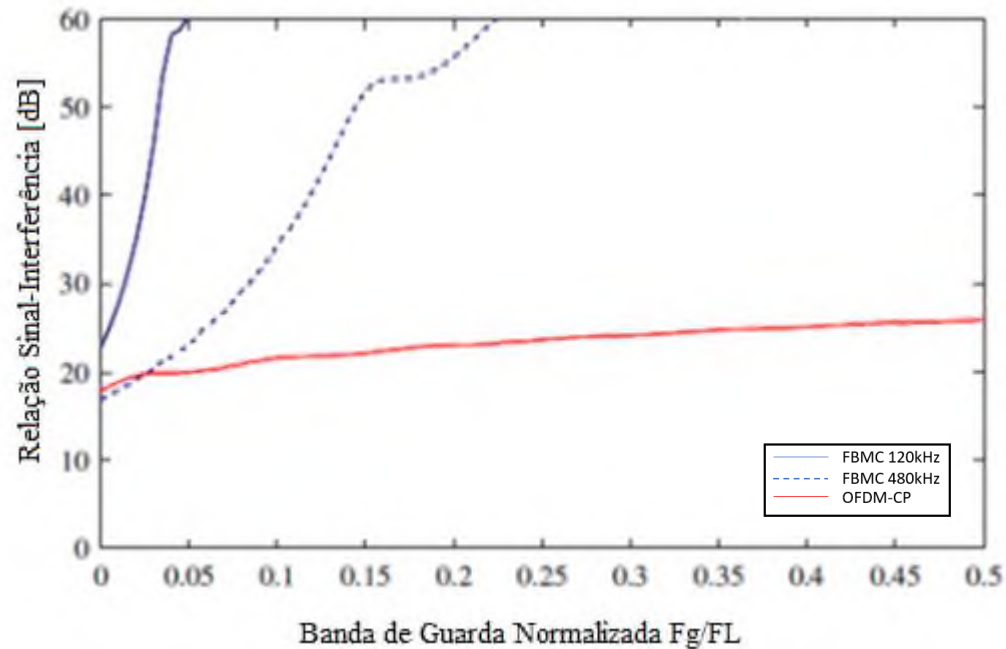
Figura 4.5 – PSD de dois usuários FBMC-OQAM.



Fonte: O autor.

A Figura 4.6 ilustra os resultados obtidos da taxa de interferência do sinal em relação a banda de guarda.

Figura 4.6 – SIR do OFDM-CP e FBMC-OQAM.



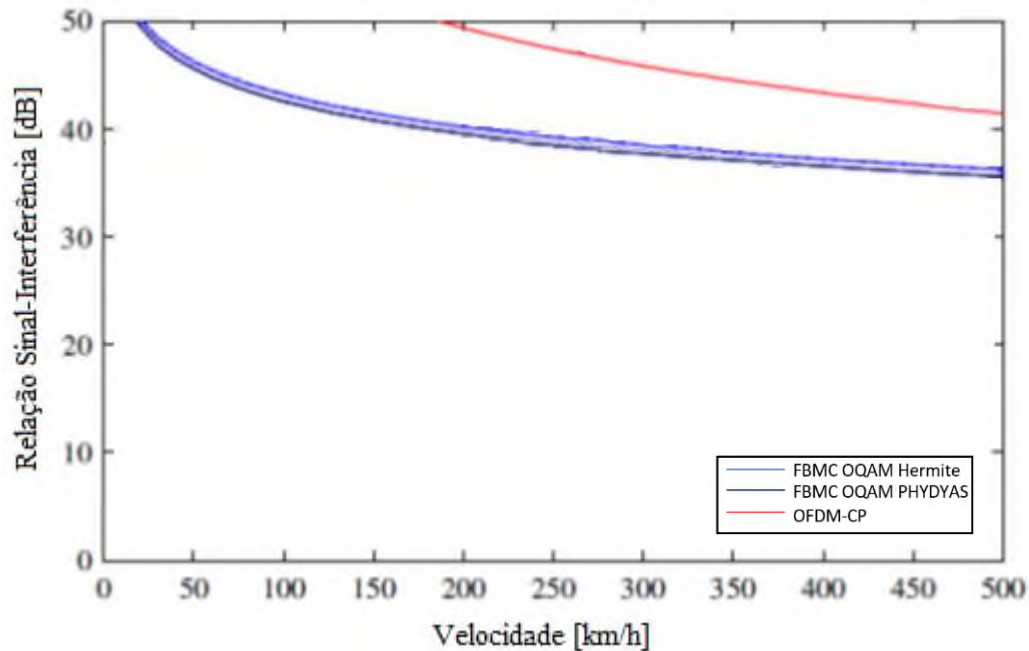
Fonte: O autor.

Observe que quanto maior a banda de guarda, menos interferência ocorre. Considere a relação $\frac{F_G}{F_L} = 0,2$, o OFDM – CP tem SIR um pouco acima de 20 dB enquanto o FBMC – OQAM tem SIR acima de 50 dB.

As Figuras 4.7 e 4.8 apresentam respectivamente os resultados obtidos para os modelos de canais:

- **Pedestre** com $\tau_{rms} = 46 \text{ ns}$ e $f_c = 2,5 \text{ GHz}$;
- **Veicular** com $\tau_{rms} = 370 \text{ ns}$ e $f_c = 2,5 \text{ GHz}$.

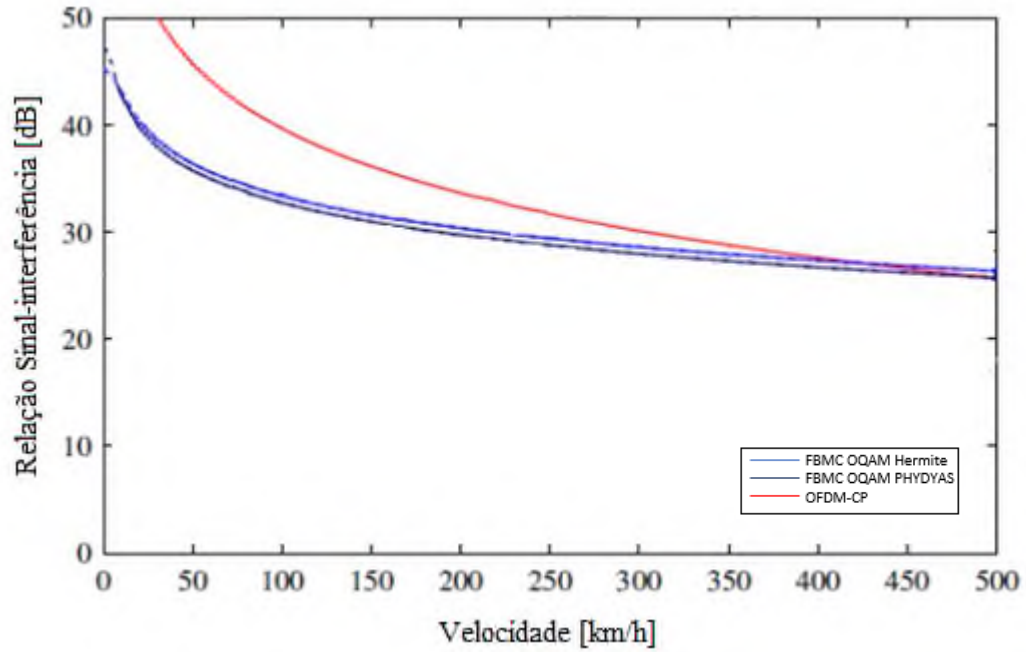
Figura 4.7 – Modelo de canal Pedestre.



Fonte: O autor.

Nos gráficos apresentados tem-se o OFDM com $TF = 1,07$ e o FBMC com $TF = 1$. Para o modelo de canal Pedestre, o valor de SIR é muito alto para as duas técnicas. Para o modelo de canal Veicular, o valor de SIR para o CP-OFDM aproxima-se do valor obtido pelo FBMC para altas velocidades. Portanto, o CP-OFDM com $TF = 1,07$ não fornece maior SIR comparado ao FBMC com $TF = 1$.

Figura 4.8 – Modelo de canal Veicular.



Fonte: O autor.

Os modelos de filtros Hermite e PHYDYAS apresentam resultados semelhantes para velocidades entre 0 e 500 km/h, em relação à métrica avaliativa SIR versus velocidade, as duas tecnologias avaliadas apresentam desempenho semelhantes para altas velocidades.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO GERAL E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho teve como objetivo um estudo comparativo das técnicas FBMC-OQAM e OFDM-CP. Essas são as técnicas propostas de serem implementadas no sistema 5G, próxima geração da comunicação móvel.

Nos resultados obtidos observou-se que na PSD FBMC há menos emissões fora da banda do que no OFDM e, portanto, em relação à métrica avaliativa PSD, verificou-se que o FBMC proporciona maior eficiência espectral do que o OFDM. Além disso, verificou-se que o OFDM-CP e FBMC-OQAM apresentam desempenho semelhantes para as métricas avaliativas SIR e taxa de erro de bit. Já na avaliação da métrica avaliativa eficiência tempo-frequência, o FBMC - OQAM supera o desempenho do OFDM – CP.

Como o FBMC-OQAM se mantém superior ao OFDM-CP em boa parte dos quesitos, e se equipara ao mesmo nos demais, tornando-se mais apropriado para a implementação na quinta geração de comunicações móveis.

Para os trabalhos futuros propõe-se a modelagem matemática dos sistemas UFMC e GFDM. Além disso, seria interessante a comparação desses dois sistemas com os sistemas OFDM-CP e FBMC apresentados nesse trabalho.

CAPÍTULO 6

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] A. Queiroz, D. Pina, E. Mello, I. Amaral, P. Kovaleski e S. Saporito. **"A 5ª GERAÇÃO DE REDE SEM FIO"**. Disponível em: <www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2015_2/5G/introducao.html>. Acesso em: 21 agosto 2018 às 14:43.
- [2] L. A. Maia, R. D.T. Carval. **"REDES DE COMUNICAÇÕES MÓVEIS DE 5ª GERAÇÃO"**. Disponível em: <www.fapemig.br/arquivos/site/sala-de-imprensa/arquivos/curso-final-versao-6-08-06-2016_com-apresentacao-crr-5g.pdf>. Acesso em: 21/08/2018 as 20:19
- [3] T. Varum, A. Ramos and J. N. Matos, **"Planar microstrip series-fed array for 5G applications with beamforming capabilities,"** *2018 IEEE MTT-S International Microwave Workshop Series on 5G Hardware and System Technologies (IMWS-5G)*, Dublin, 2018, pp. 1-3. doi: 10.1109/IMWS-5G.2018.8484697
- [4] Wiley, John. **"GETTING TO 5G: COMPARING 4G AND 5G SYSTEM REQUIREMENTS"**. Disponível em: <www.qorvo.com/design-hub/blog/getting-to-5g-comparing-4g-and-5g-system-requirements>. Acesso em: 07 agosto 2018 às 18:32
- [5] T. Hwang, C. Yang, G. Wu, S. Li and G. Y. Li, **"OFDM and Its Wireless Applications: A Survey,"** in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 4, pp. 1673-1694, May 2009. doi: 10.1109/TVT.2008.2004555
- [6] Rodrigues, P. M. P. Farias. **"OFDM BLOCK DIAGRAM"**. Disponível em: <https://paginas.fe.up.pt/~ee07191/dissertacao/Diagramas_do_Sistema.html>. Acesso em: 07 agosto 2018 às 19:40
- [7] Vasconcellos, O.V. **"Análise do Desempenho do Esquema de Transmissão GFDM - Generalized Frequency Division Multiplexing"**. 2014. Dissertação (Graduação em Engenharia Elétrica) Universidade de Brasília - UnB Faculdade de Tecnologia - FT Curso de Engenharia Elétrica, Brasília, 2014.
- [8] Lomonaco, O. M. **"Alocação de Conversores de Comprimento de Onda em Redes Parciais"**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2006.
- [9] Junior, P. R. **"Estudo da estimação de canal para sistemas OFDM baseada no arranjo comb-type"**. 2015. Dissertação (Tecnólogo em Sistemas de Telecomunicações) - Instituto Federal de Santa Catarina - IFSC, São José –SC , 2015.

- [10] Artigo Puc-Rio. "**Transmissão e recepção OFDM**". Disponivel em: < https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/11480/11480_5.PDF> . Acesso em 12 Maio 2019
- [11] EletronicsNotes. " **The cyclic prefix used in Frequency Division Multiplexing schemes including OFDM to primarily act as a guard band between successive symbols to overcome intersymbol interference, ISI.**". Disponível em: < <https://www.electronics-notes.com/articles/radio/multicarrier-modulation/ofdm-cyclic-prefix-cp.php> >. Acesso em: 12 de Junho de 2019 às 14:43.
- [12] Paula.d.A , Panazio . C. "**A comparison between OFDM and single-carrier with cyclic prefix using channel coding and frequency-selective block fading channels**", in journal of communications and information systems, vol. 1, no. 26, april 2011.
- [13] R. Datta, N. Michailow, M. Lentmaier and G. Fettweis. "**5G - PHY Candidate**". Disponível em: < www.sharetechnote.com/html/5G/5G_Phy_Candidate_FBMC.html / >. Acesso em: 10/agosto/2018 às 01:22
- [14] L. Gaohui and X. Mingtao, "Research on a modulation recognition method for the FBMC-OQAM signals in 5G mobile communication system," *2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, Wuhan, 2018, pp. 2544-2547. doi: 10.1109/ICIEA.2018.8398139
- [15] A. Basheer and A. Habib, "**Filter bank multi carrier based MIMO system for 5G wireless communication,**" *2016 1st International Workshop on Link- and System Level Simulations (IWSLS)*, Vienna, 2016, pp. 1-6. doi: 10.1109/IWSLS.2016.7801583
- [16] S. Noceti Filho. " **Fundamentos sobre Ruídos: Densidade Espectral de Potência** ", Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC. BackStage. vol. 8, nº 88, pp. 140-144, março 2002.
- [17] Academic Technology/Web Department. " **Power Spectral Density - the basics** ", East Tennessee State University, Departamento de Telecomunicações ENTC 4307/5307, Johnson City, TN 37614, Setembro 2009.
- [18] Nissel, Ronald. "**Filter Bank Multicarrier Modulation for Future Wireless Systems**". 2017. Faculty of Electrical Engineering and Information Technology TU Wien, Wien-Austria, 2017.
- [19] Artigo Puc-Rio. " **Medição da taxa de bits errados (BER)** ". Disponivel em: < https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/11319/11319_3.PDF>. Acesso em 14 Maio 2019
- [20] Q. He and A. Schmeink, "**Comparison and evaluation between FBMC and OFDM systems,**" *WSA 2015; 19th International ITG Workshop on Smart Antennas*, Ilmenau, Germany, 2015, pp. 1-7. URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7051802&isnumber=7051795>

- [21] B. Mazzeo and M. Rice, "**On Monte Carlo Simulation of the Bit Error Rate**," *2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, Kyoto, 2011, pp. 1-5.doi: 10.1109/icc.2011.5963099;IEEE Communications Society}, URL: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5963099&isnumber=5962409>

- [22] Y. Chen, N. C. Beaulieu and H. Shao, "**SNR and SIR Estimation for Multiuser UWB IR Systems With TH-BPSK**," in *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 17, no. 5, pp. 465-468, May 2010.doi: 10.1109/LSP.2010.2043154.