



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
UNIDADE ACADÊMICA DO CABO DE SANTO AGOSTINHO
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CLARIELE DE ALMEIDA PEREIRA

Estudo comparativo de formas de onda 5G:

uma análise de eficiência

Cabo de Santo Agostinho – PE

2021

CLARIELE DE ALMEIDA PEREIRA

Estudo comparativo de formas de onda 5g:
uma análise de eficiência

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientadora: Prof^a. Amanda Souza de Paula

Cabo de Santo Agostinho - PE

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

P436e Pereira, Clariele
 Estudo comparativo de formas de onda 5G: uma análise de eficiência / Clariele Pereira. - 2021.
 40 f. : il.

 Orientadora: Amanda Souza de .
 Inclui referências.

 Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal Rural de Pernambuco,
 Bacharelado em Engenharia Elétrica, Cabo de Santo Agostinho, 2021.

 1. Tecnologia 5G. 2. formas de onda. 3. OFDM. 4. FBMC. I. , Amanda Souza de, orient. II. Título

CDD 621.3

CLARIELE DE ALMEIDA PEREIRA

Estudo comparativo de formas de onda 5g:
uma análise de eficiência

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Unidade Acadêmica do Cabo de Santo Agostinho da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 30 jul. 2021

Banca Examinadora

Orientadora

Examinador interno

Examinador interno

AGRADECIMENTOS

À minha mãe que tanto lutou pela minha educação e felicidade. Ao meu pai que me levou para todos os lugares que eu precisava ir e me apoiou em tudo o que eu fiz. Às minhas irmãs que são minhas melhores amigas e que passaram por tudo antes de mim, me servindo de exemplo e inspiração. Ao meu sobrinho, Victor Bhreno, que acredita que posso fazer o impossível. À toda a minha família que sempre acreditou em mim e me deu todo o suporte emocional que eu precisava para chegar até aqui.

À equipe de Engenharia de Acesso da TIM, Jéssica Feliciano, Maria Eduarda Salvi, Gleyse Kelly, Adriano Borges, Geraldo Lira, Juliana Pinto, Monique Tamara, Erika Roxana, Polyana Bristot, Renata Modesto, Leonardo Correia e especialmente à Mitre Amorim e Ageu Diniz que acreditaram em mim e me escolheram dentre tantos candidatos e à Tiago Beltrão que me ensinou o ofício com paciência e dedicação. Vocês me inspiraram como pessoa e profissional.

Aos meus amigos e professores da UACSA, especialmente à minha amiga Vanessa Cândida por ter me escutado e me apoiado durante todo o curso e à professora Amanda de Paula que me orientou neste trabalho e me apoiou durante diversos momentos da faculdade.

Por fim, quero agradecer a Deus por ter colocado tantas pessoas especiais na minha vida, por ter me dado a oportunidade de estudar na UFRPE e por me proporcionar tantas experiências incríveis durante toda a minha vida.

E à minha companheira canina Myle que esteve comigo durante os períodos mais desafiadores e fez tudo parecer mais leve.

RESUMO

Este trabalho apresenta as principais características do 5G, como a padronização da tecnologia 5G e as evoluções com relação às tecnologias pré-existentes com foco na análise comparativa das técnicas de modulação FBMC e OFDM. A forma de onda é um componente muito importante nas tecnologias de telecomunicações, dado que elas podem modificar as características do sinal a ser transmitido da maneira mais conveniente para um determinado requisito. Para realizar as análises comparativas entre as formas de onda, foram simulados com o software MATLAB os gráficos de densidade espectral de potência vs frequência normalizada e taxa de erro de bit vs relação sinal-ruído para diferentes cenários, tais como: inserção de variância do erro na estimação do canal, alteração do tipo de canal e do número de elementos da FFT. Com esses resultados, é possível perceber a vantagem do FBMC com relação ao uso do espectro, bem como o problema da maior complexidade do sistema de equalização dessa forma de onda quando comparada ao utilizado no OFDM.

Palavras-chave: Tecnologia 5G, formas de onda, OFDM, FBMC.

ABSTRACT

This work presents the main characteristics of 5G, such as the 5G technology standardization and evolutions in relation to pre-existing technologies, focusing on the comparative analysis of FBMC and OFDM modulation techniques. The waveform is a very important component in telecommunications technologies, as they can modify the characteristics of the signal to be transmitted in the most convenient way for a given requirement. To perform the comparative analysis between the waveforms, the power spectral density vs normalized frequency and bit error rate vs signal-to-noise ratio graphs for different scenarios were simulated with the MATLAB software, such as: insertion of error variance in the channel estimation, changing the type of channel and the number of FFT elements. With these results, it is possible to see the advantage of FBMC in relation to the use of spectrum, as well as the problem of the greater complexity of the equalization system of this waveform when compared to that used in OFDM.

Keywords: 5G technology, waveforms, OFDM, FBMC.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Linha do tempo da padronização do 5G	17
Figura 2 - Serviços suportados pelo 5G	19
Figura 3 - Multiplexação por divisão de frequências ortogonais	21
Figura 4 - Fluxograma da cadeia de transmissão/recepção do OFDM	22
Figura 5 - Diagrama de blocos do sistema FBMC	23

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais requisitos de desempenho do IMT-2020

18

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – BER vs SNR para a modulação OFDM com erro na estimação do canal para um canal variável	28
Gráfico 2 – BER vs SNR para a modulação OFDM para $N = 512$ e 1024	29
Gráfico 3 – BER vs E_b/N_0 para a modulação OFDM para um canal fixo (h_2) e variável (h_1)	30
Gráfico 4 – Densidade espectral de potência vs frequência de transmissão normalizada	31
Gráfico 5 – BER vs SNR para a modulação FBMC com erro na estimação do canal	33
Gráfico 6 – BER vs SNR para a modulação FBMC para um canal fixo (h_2) e variável (h_1)	34
Gráfico 7 – BER vs SNR para OFDM e FBMC, $N = 1024$	35

LISTA DE SIGLAS

3rd Generation Partnership Project (3GPP)
Advanced Mobile Phone System (AMPS)
Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL)
Analysis Filter Bank (AFB)
Augmented Reality (AR)
Bit Error Rate (BER)
Cyclic Prefix (CP)
Digital Signal Processors (DSP)
Enhanced Data Rates for Global Evolution (EDGE)
Enhanced Mobile Broadband (eMBB)
Evolved Packet Core (EPC)
Fast Fourier Transform (FFT)
Filter Bank Multi-Carrier (FBMC)
Filtered Generalized Frequency Division Multiplexing (f-OFDM)
Frequency Division Multiplexing (FDM)
Frequency Division Multiple Access (FDMA)
Frequency Division Duplexing (FDD)
Generalized Frequency Division Multiplexing (GFDM)
Global System for Mobile Communications (GSM)
High Definition (HD)
Inter-Symbol Interference (ISI)
International Telecommunication Union (ITU)
Inverse Fast Fourier Transform (IFFT)
Inverse of the Discrete Fourier Transform (IDFT)
Internet of Things (IoT)
Long Term Evolution (LTE)
Massive Machine Type Communications (mMTC)
Multiple Input Multiple Output (MIMO)
Multi-Carrier Modulation (MCM)
Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)
Orthogonal Frequency-division Multiplexing Access (OFDMA)
Organização das Nações Unidas (ONU)

Polyphase Network (PPN)

Quadrature Amplitude Modulation (QAM)

Quadrature Phase Shift Keying (QPSK)

Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA)

Signal to Noise Ratio (SNR)

Synthesis Filter Bank (SFB)

Time Division Multiple Access (TDMA)

Universal Filtered MultiCarrier (UFMC)

Universal Mobile Telecommunication System (UMTS)

Ultra-Reliable and Low Latency Communications (URLLC)

Virtual Reality (VR)

Wideband Code Division Multiple Access (WCDMA)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos específicos	13
2	EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE CELULARES	14
2.1	HISTÓRIA DA COMUNICAÇÃO	14
2.2	PADRONIZAÇÃO DA TECNOLOGIA 5G	16
2.3	ATRIBUTOS BÁSICOS DO 5G	17
3	ESTUDO DAS TÉCNICAS DE MODULAÇÃO OFDM E FBMC	20
3.1	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	20
3.2	EVOLUÇÃO DAS TÉCNICAS DE MODULAÇÃO	21
3.3	ESTUDOS DAS TÉCNICAS DE MODULAÇÃO OFDM E FBMC	23
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	25
4.1	PARÂMETROS AVALIADOS	25
4.2	SIMULAÇÕES E ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS	26
5	CONCLUSÃO	36
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

A rede de telefonia móvel vem se consolidando com o passar do tempo. O que antes era utilizado apenas como meio de comunicação por voz, foi ampliando suas funções até atingir o nível de informações que enviamos e recebemos hoje. De acordo com o *site* das operadoras de telefonia móvel do país, Teleco (2021), em maio de 2021 a cobertura 4G atingiu um total de 4.635 municípios brasileiros, o que corresponde a 98,6% da população do país.

No entanto, apesar da alta cobertura e velocidade trazidas por esta tecnologia, em breve haverá uma nova geração de dispositivos que não serão mais suportados pelo 4G e pelas demais redes *wireless* existentes. Alguns problemas a serem enfrentados serão a falta de espectro disponível, alto consumo de energia e diversos dispositivos conectados simultaneamente com necessidade de alta taxa de transmissão de dados. Para enfrentar as dificuldades com o espectro disponível atualmente, é necessário desenvolver tecnologias e técnicas para aproveitar novas bandas espectrais, possibilitando um melhor desempenho com relação às redes móveis atuais e esse é o objetivo da nova geração 5G (WANG et al., 2017).

Segundo Marks (2018), os avanços no processo de caracterização, bem como a definição dos requisitos mínimos de rede para o 5G tiveram início em 2012, a partir de grupos de estudos formados pela parceria entre institutos normativos internacionais do setor de telecomunicações, fabricantes, operadoras e pesquisadores que se uniram para determinar tecnologias que possibilitassem melhor aproveitamento do espectro. Dessa forma, em 2020 começou a implantação da quinta geração de telefonia móvel que possibilita a utilização de diversos equipamentos inteligentes, dando início a uma nova era de tecnologias como cidades inteligentes, carros autônomos, cirurgias à distância e outras possibilidades.

A rede 5G deve atender às novas demandas dos usuários que vão além dos recursos fornecidos pelas tecnologias existentes, de maneira que é preciso aumentar a capacidade de banda, reduzir a latência e permitir a conectividade massiva (JABER et al., 2016). De acordo com o relatório *Road to 5G Introduction and Migration* (2018) produzido pela GSMA, a nova geração de redes móveis será capaz de aumentar a taxa de dados de pico em 20 vezes, diminuir em 10 vezes a latência e triplicar a eficiência espectral com relação à geração anterior.

Atualmente, o LTE conta com o sistema OFDM para a modulação de dados e os estudos acerca do 5G trazem a possibilidade de utilizar a mesma tecnologia ou outras como GFDM, FBMC, UFMC e f-OFDM, sendo a OFDM e FBMC estudadas neste trabalho.

Para expor os temas, o presente trabalho contará com 5 capítulos, sendo este primeiro uma introdução que explica a importância do tema estudado, o contexto e os objetivos do trabalho. O segundo capítulo mostrará a evolução tecnológica das gerações de telefonia móvel, desde o surgimento do 1G até as informações mais recentes acerca do 5G, como a padronização 5G e as melhorias trazidas pela tecnologia. O capítulo seguinte introduz as técnicas de modulação OFDM e FBMC para dar a base teórica do capítulo 4 que trará os resultados e comentários acerca das simulações das formas de onda feitas no *Matlab*. O quinto e último capítulo apresenta a conclusão do trabalho.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Analisar a performance de duas possíveis técnicas de modulação para o 5G através de simulações realizadas em ambiente MATLAB, sendo elas: FBMC e OFDM.

1.1.2 Objetivos específicos

- Apresentar as principais características da tecnologia 5G, como a padronização e requisitos de desempenho;
- Simular as formas de onda utilizando o software Matlab para avaliar os comportamentos das curvas de taxa de erro de bit vs relação sinal-ruído e densidade espectral de potência vs frequência de transmissão normalizada;
- Analisar as simulações das formas de onda para realizar uma avaliação quantitativa e qualitativa dos resultados.

1 EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE CELULARES

Neste capítulo será feito um resumo da história da comunicação, passando desde os tempos dos homens das cavernas até as tecnologias modernas. A padronização do 5G será brevemente explicada em seguida, bem como seus atributos básicos e as aplicações desta nova tecnologia.

2.1 HISTÓRIA DA COMUNICAÇÃO

Formas de comunicação existem desde os primórdios da vida humana como uma forma de interação social e de sobrevivência da espécie. De acordo com Nietzsche (2012, p. 222) o homem “precisava, sendo o animal mais ameaçado, de ajuda, proteção, precisava de seus iguais, tinha de saber exprimir seu apuro e fazer-se compreensível”.

A história da comunicação começa no período Paleolítico em que os Homens fizeram associação entre um determinado som ou gesto a um objeto ou ação que, assim como foi mostrado por Bordenave (1982, p.24), essas associações de forma ordenada e combinada gerou a linguagem verbal. Posteriormente, eles encontraram uma forma de gravar informações nas paredes das cavernas, o que de certa forma era eficaz, mas era um método de comunicação localizado. Por serem nômades neste período, ao abandonarem a caverna, eles precisavam de algo que permitisse uma comunicação à distância. Para esse fim, era utilizado o sinal de fumaça e cada tribo tinha o seu próprio sistema de códigos.

Posteriormente, ao descobrirem a capacidade dos pombos de regressarem ao local onde moram, os Homens começaram a utilizá-los para comunicação a longas distâncias (CABRAL, 2018). Tempos depois, segundo Addison (2002), os reis passaram a recorrer aos cavalos para levar encomendas e recados de um local ao outro dispondo-se de pequenas estações. Mas foi com a chegada da eletricidade que houve a criação de uma diversidade de dispositivos que facilitariam a vida e a comunicação entre as pessoas e em 1838, Samuel Morse inventou o telégrafo elétrico, dispositivo que utilizava impulsos elétricos para fazer a transmissão de mensagens codificadas enviadas através de um fio (NOBRE, 2007).

Salemme (2015, p.3) informa que o início da comunicação sem fio se deu em 1896 com a patente da invenção do rádio registrada pelo físico e inventor italiano

Guglielmo Marconi. Mas foi apenas em 1901 que ele realizou a primeira transmissão transatlântica enviando uma mensagem da Inglaterra para o Canadá (Nobel Lectures, 2020). Essa tecnologia abriu espaço para as novas gerações de redes móveis que são usadas até hoje.

Com o aumento da popularidade do serviço, foi necessário melhorar a qualidade das chamadas, diminuindo as interferências, aumentando a mobilidade e melhorando outros aspectos dessa tecnologia dando início, em 1984, aos primeiros sistemas analógicos para a telefonia celular de primeira geração, sendo o AMPS o principal deles (LEE, 1997).

O sistema AMPS utilizava 50 MHz de largura de banda que era dividida em duas bandas de 25MHz cada. De acordo com Tude (2007), essas bandas foram divididas em canais de 30 kHz utilizando a técnica de múltiplo acesso por divisão de frequências, FDMA, que divide o espectro de frequências em canais e cada assinante fica alocado em um canal, limitando o espectro. Apesar do objetivo ter sido cumprido, o número de usuários que podiam se conectar era muito limitado e as agências de regulamentação não podiam alocar tantos espectros quanto o necessário. Dessa forma, ficou clara a necessidade de reformulação para um sistema que utilizasse melhor o espectro para oferecer maior capacidade de usuários.

A década de 90 deu início ao sistema de telefonia móvel de segunda geração (2G) com transmissão digital e maior eficiência espectral. O padrão GSM foi desenvolvido na Europa e passou a utilizar TDMA como padrão de múltiplo acesso, visto que ele mantém a compatibilidade com a arquitetura e canalização utilizada pelo sistema AMPS utilizado no 1G. O TDMA é utilizado juntamente com o FDM, permitindo que diversos usuários se conectem por um mesmo canal de rádio. Essa tecnologia transforma o sinal analógico da voz em digital e divide o canal de frequência em seis intervalos de tempo, de forma que cada assinante ocupa um determinado espaço de tempo na transmissão e cada frequência pode receber até três chamadas. A segunda geração passou a oferecer a possibilidade de *roaming* internacional, canal físico com largura de banda de 200kHz, melhor qualidade de voz e transmissão de dados (ULBRICH, 2008).

A terceira geração de telefonia móvel, ou 3G, teve início nos anos 2000 e surgiu da necessidade de oferecer serviços de dados com alta taxa de transmissão. O UMTS foi definido pelo 3GPP, organização que reúne entidades de padronização tecnológica para redes móveis, como padrão universal para a rede 3G. Nessa nova geração, toda

a informação da interface aérea é transportada em uma mesma frequência graças a tecnologia WCDMA e utiliza duas bandas diferentes para envio e recepção do sinal sendo, portanto, baseada em duplexação por divisão de frequência, FDD. Essas duas tecnologias, agindo em conjunto, possibilitam suportar os serviços já oferecidos pelo 2G e transportar dados com maior velocidade utilizando uma largura de banda de 5MHz e tornando viáveis serviços de multimídia como *streaming* de vídeo e acesso à *internet* (MOTA et al., 2019).

Atualmente, a tecnologia da quarta geração, também conhecida como 4G ou LTE, é a mais utilizada pelos usuários da telefonia móvel. Isso ocorre por causa da constante busca por uma *internet* de qualidade possibilitando a utilização de todos os recursos que surgem diariamente. Para conseguir atingir taxas mais altas de *throughput*, a rede LTE utiliza o sistema MIMO, que possui um conjunto de antenas na transmissão e recepção, utilizando diversidade espacial. Os processadores digitais de sinal e as técnicas de modulação de alta ordem também auxiliam na melhoria da taxa de transmissão de dados. O 4G utiliza o protocolo OFDMA no *downlink* e SC-FDMA no *uplink*, permitindo picos de transmissão de dados de até 326 Mbps. O OFDMA se baseia na FDM e MCM, que divide a banda do sinal em sub portadoras espaçadas de 15kHz e moduladas individualmente (WEISS, 2004).

Para Martins (2016), a necessidade de uma conexão com alta velocidade, baixa latência e maior número de dispositivos conectados, deu início às pesquisas acerca da nova geração de telefonia móvel, o 5G. Essa tecnologia também trará mudanças na arquitetura da rede, que deve ser desenvolvida para promover comunicações entre sistemas máquina-máquina e humano-máquina. As limitações apresentadas pelo OFDM levantaram a possibilidade da utilização de novas formas de onda no 5G, sendo o GFDM, FBMC, UFMC e f-OFDM as principais candidatas.

2.2 PADRONIZAÇÃO DA TECNOLOGIA 5G

De acordo com Kempf (2020), para definir o padrão utilizado pelas indústrias do mundo inteiro, existem órgãos responsáveis por conduzirem os estudos e especificações das redes móveis como, por exemplo, o 3GPP, e o ITU. O ITU é uma agência da ONU que desenvolve os padrões técnicos que garantem a interconexão de redes e tecnologias. O 3GPP, por sua vez, reúne organizações de desenvolvimento

assim, essa tecnologia utiliza a largura de banda do canal de maneira muito mais eficiente do que as atuais tecnologias.

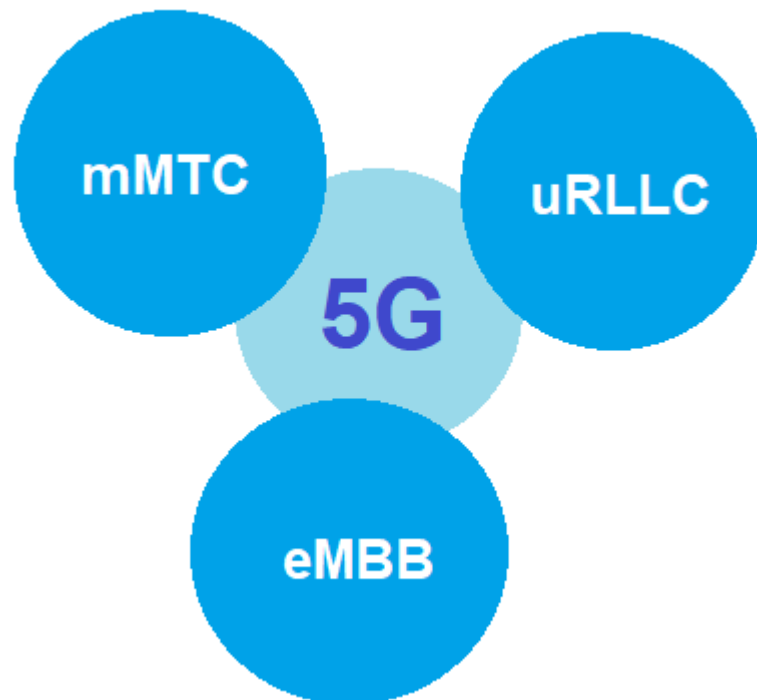
Tabela 1 - Principais requisitos de desempenho do IMT-2020

REQUERIMENTOS		VALOR
Taxa de dados	Pico	Downlink: 20Gb/s Uplink: 10Gb/s
	Experiência do usuário	Downlink: 100Mb/s Uplink: 50Mb/s
Eficiência espectral	Pico	Downlink: 30 bit/s/Hz Uplink: 15 bit/s/Hz
	Usuário do 5º percentil	Downlink: 0.12~0.3 bit/s/Hz Uplink: 0.045~0.21 bit/s/Hz
	Média	Downlink: 3.3~9 bit/s/Hz Uplink: 1.6~6.75 bit/s/Hz
Capacidade de tráfego da área	-	10Mbit/s/m ²
Latência	Plano de usuário	1ms~4ms
	Plano de controle	20ms
Largura de banda	-	100MHz

Fonte: Adaptado do Relatório *Road to 5G Introduction and Migration* (2018).

A partir dos dados supracitados, pode-se perceber que serão vastas as aplicações para o 5G. A figura 2 ilustra os serviços que serão oferecidos pela quinta geração e suas respectivas classificações, sendo elas: eMBB, uRLLC, mMTC (POPOVSKI et al., 2018).

Figura 2 - Serviços suportados pelo 5G.



Fonte: O autor, 2021.

O eMBB envolve aplicações e serviços que demandam maior cobertura de rede, conexão estável e de alta velocidade, além de taxas moderadas para os usuários presentes na borda das células (SHAFI et al., 2017). Exemplos de aplicações de serviço são os vídeos em alta definição, HD, realidade virtual, VR, e realidade aumentada, AR. O uRLLC visa atender os serviços que precisam de baixa latência com alta confiabilidade para habilitar aplicativos em um amplo espectro, como automação de fábricas, cirurgias remotas e condução autônoma. Por fim, o mMTC irá suportar serviços de IoT com baixas taxas de *uplink* (RATASUK et al., 2017) e é capaz de suportar diversos dispositivos conectados em uma mesma estação rádio base.

3 ESTUDO DAS TÉCNICAS DE MODULAÇÃO OFDM E FBMC

Neste capítulo, serão discutidas as principais características das técnicas de modulação OFDM e FBMC, além de uma análise comparativa entre ambas formando, portanto, uma base teórica para o entendimento das simulações que seguirão no capítulo 4.

3.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Em um sistema de comunicação *wireless*, os dados enviados pelos transmissores devem ser modulados antes de serem enviados ao receptor. O transporte de informações presentes na onda portadora modulada ocorre por meio de um canal de comunicação (MEDEIROS, 2016).

Ainda segundo Medeiros (2016), a modulação do sinal modifica as características de fase, amplitude ou frequência da portadora para que suas propriedades se tornem mais convenientes à transmissão da informação. Assim, a partir das técnicas de modulação, é possível adaptar o sinal ao meio de transmissão e a escolha da técnica a ser empregada depende do requisito do sinal. Em alguns casos, a modulação pode facilitar a irradiação, reduzir o ruído e interferência ou superar limitações de equipamentos.

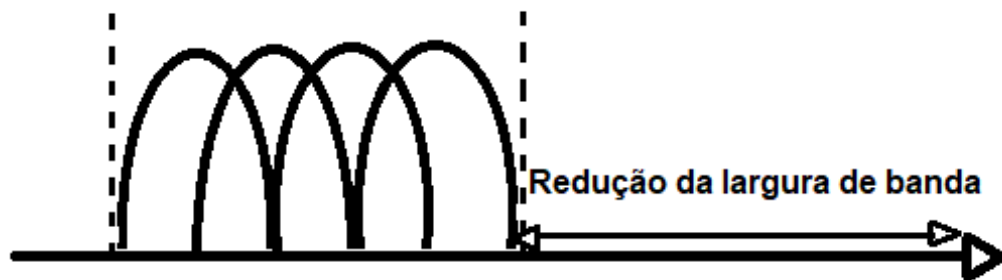
A forma de onda é uma componente muito importante para a telecomunicação e pode ser classificada como sendo de portadora única ou multi portadora. Para Leite e Penedo (2002), no primeiro caso, a forma de onda transmite dados pelo canal de comunicação de forma sequenciada por apenas uma portadora, de maneira que toda faixa de frequência disponível é ocupada pelo espectro. Essa classificação a torna eficiente em energia, mas aumenta a sensibilidade à seletividade em frequência devido ao baixo número de subportadoras.

Em contrapartida, na forma de onda classificada como multiportadora, os dados são enviados paralelamente em múltiplas subportadoras com diferentes frequências reduzindo, portanto, a taxa de transmissão por subportadora e aumentando sua eficiência espectral. As técnicas de modulação aqui estudadas pertencem à classificação multi portadora e, portanto, enviam diversos símbolos ao mesmo tempo em diferentes sub-bandas, garantindo a menor distância entre elas sem que ocorra a sobreposição espectral (CARVALHO NETO, 2011).

3.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA TÉCNICA OFDM

A multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM), surgiu no final da década de 60 e é uma técnica que divide a banda de frequências em diversas subportadoras ortogonais para realizar a modulação. Essa ortogonalidade significa que os picos do sinal de cada subportadora coincidem com os zeros das subportadoras adjacentes, conforme mostra a figura 3. De acordo com Pinto e Albuquerque (2002), nesse método não há interferência entre as subportadoras na demodulação e a banda total ocupada é reduzida em 50% quando comparado à técnica FDM.

Figura 3 - Multiplexação por divisão de frequências ortogonais.



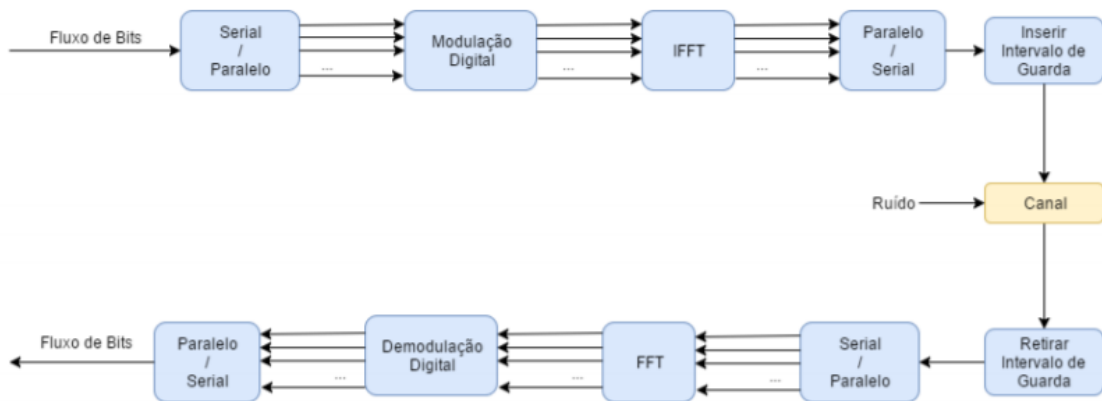
Fonte: O autor, 2021.

Para David (2007), uma das principais dificuldades da técnica OFDM é a interferência entre símbolos, ISI, que ocasiona a perda de ortogonalidade entre as subportadoras. A ISI pode ser evitada tornando o tempo de dispersão do multipercurso menor do que o intervalo de guarda. Dessa forma, o sinal que será transmitido utiliza um intervalo de guarda preenchido por um prefixo cíclico, CP, para solucionar o problema da interferência entre símbolos, visto que ele é uma cópia do final de um símbolo OFDM adicionada antes do envio do próximo símbolo. No entanto, tal escolha diminui a eficiência espectral, visto que uma fração do sinal transmitido não contém informação útil.

Para Pena et al. (2016), em um sistema OFDM existem diversas etapas entre o envio e a recepção dos dados conforme ilustra a figura 4. A etapa de transmissão do sinal consiste em uma conversão série/paralelo sobre o sinal para que, em seguida, os dados sejam mapeados de bits para símbolos a partir de uma modulação de

maneira que o resultado desta etapa irá passar do domínio da frequência para o domínio do tempo a partir da transformada inversa de Fourier. Ao final da transformação, as informações são rearranjadas em série para que seja inserido o intervalo de guarda no símbolo OFDM.

Figura 4 - Fluxograma da cadeia de transmissão/recepção do OFDM.



Fonte: Pena et al. (2016).

Segundo Pena et al. (2016), para a recepção do sinal, retira-se o prefixo de cíclico e retornam-se os dados para a configuração em paralelo, de forma que será possível aplicar a transformada rápida de Fourier devolvendo o sinal ao domínio da frequência onde será feita a sua demodulação para recuperar a informação original em bits.

O símbolo OFDM transmitido no domínio do tempo para M subportadoras é dado pela equação (3.1):

$$x(t) = \sum_{i=0}^{M-1} C_i \times e^{j2\pi i \Delta f t} \quad (3.1)$$

Sendo $x(t)$ o sinal enviado pelo canal de comunicação, C_i é o sub-símbolo complexo da i -ésima subportadora espaçada Δf entre si. O espaçamento entre as subportadoras é a dado por:

$$\Delta f = \frac{2\pi}{T}$$

em que T é a duração do símbolo OFDM. Em termo discreto, amostrando com taxa $T_s = \frac{T}{M}$, temos:

$$x[n] = x(nT_s) = \sum_{i=0}^{M-1} C_i \times e^{j\frac{2\pi}{M}ni} \quad (3.2)$$

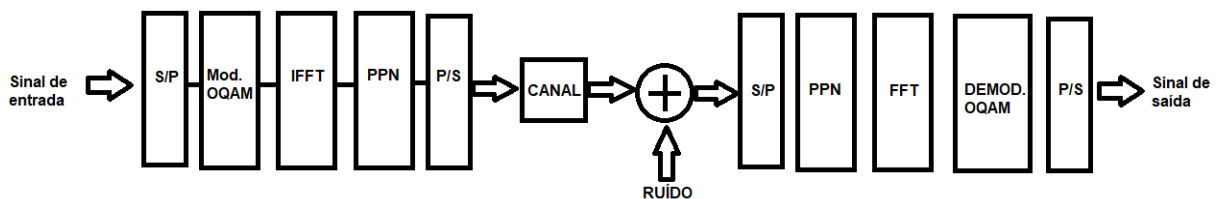
Nota-se que o símbolo OFDM em tempo discreto corresponde à IDFT. Esse fato permite a geração dos símbolos OFDM de forma eficiente através do emprego dos algoritmos rápidos de Transformada de Fourier e foi fundamental para o popularização do sistema OFDM como padrão de comunicação.

3.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DA TÉCNICA FBMC

Para Vasconcellos (2014), a modulação multiportadora baseada em banco de filtros (FBMC) é uma evolução da OFDM e também utiliza a transformada rápida direta e inversa de Fourier para demodular e modular o sinal, respectivamente. No entanto, o intervalo de guarda utilizado na técnica estudada anteriormente não se perpetua na FBMC, visto que esta utiliza um banco de filtros para reduzir a interferência e melhorar a sua eficiência espectral. Dessa forma, cada subportadora possui um filtro protótipo que utiliza a modulação OQAM para reduzir pela metade o período de transmissão dos símbolos FBMC com relação ao período dos símbolos OFDM.

Os bancos de filtros utilizados são como uma tabela que agrega os sinais de entrada em linhas e, como resultado, fornece a mesma quantidade de sinais de saída. Sendo assim, cada filtro é responsável por carregar uma subportadora do sinal e tem a resposta em frequência de um deslocador de fase, se tornando assim, uma rede polifásica, PPN (BELLANGER; BONNEROT; COUDREUSE, 1978). O diagrama de blocos do sistema FBMC está mostrado na figura 5.

Figura 5 - Diagrama de blocos do sistema FBMC.



Fonte: O autor, 2021.

O diagrama mostrado ilustra que, durante a transmissão, os dados de entrada do modulador são números complexos que passam por um conversor série/paralelo responsável por gerar uma sequência de símbolos. A modulação OQAM transforma os dados de entrada em números reais para possibilitar a aplicação da IFFT e, posteriormente, a rede polifásica atua de maneira que cada filtro da rede é

responsável por carregar a i -ésima subportadora do sinal. A combinação da PPN com a IFFT forma o Banco de Filtros de Síntese, SFB, responsável por dividir a largura de banda total em M subcanais iguais, sendo $0 < i < M$. Por fim, o sinal volta para a configuração em série e é transmitido.

A recepção, por sua vez, volta a converter o sinal em paralelo e este é filtrado para que depois seja aplicada a transformada rápida de Fourier. O sinal deve então ser demodulado pelo OQAM e convertido novamente em série para obter a sequência original de bits que será o sinal de saída. Na recepção, a combinação da PPN com a FFT forma o Banco de Filtros de Análise, BFA, que possui a mesma função do SFB.

A transmissão de um símbolo FBMC no tempo pode ser representado pela equação (3.3) e se assemelha à expressão (3.1) do OFDM. No entanto, esta considera a função do filtro protótipo utilizado no FBMC, bem como o deslocamento de fase causado pela modulação OQAM.

$$x(t) = \sum_{i=0}^{M-1} C_i \times p(t) \times e^{j2\pi i \Delta f t} \times e^{j\theta_i} \quad (3.3)$$

Sendo C_i a representação do símbolo OQAM, $p(t)$ é a função de resposta ao impulso do filtro protótipo, e θ_i representa o deslocamento de fase entre os símbolos.

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Neste capítulo será exposta uma breve explicação acerca dos parâmetros utilizados nas simulações BER vs SNR e PSD vs f das formas de onda OFDM e FBMC, bem como os resultados das mesmas com o objetivo de fundamentar a comparação das duas técnicas de modulação escolhidas para este trabalho. Para efetuar a simulação, foi utilizado o *software* Matlab para traçar as curvas a fim de avaliar cada parâmetro que será explicitado a seguir.

4.1 PARÂMETROS AVALIADOS

A taxa de erro de bit é representada pela razão entre o número de erros de bits pelo número de bits transmitidos.

$$\text{BER} = \frac{\text{Número de erros de bits}}{\text{Número de bits transmitidos}} \quad (4.1)$$

De acordo com Ramaswami (2002), o erro de bit pode ser causado por diversos fatores, dentre eles a falha de sincronização entre o transmissor e o receptor, defeitos de componentes, ruído e interferência eletromagnética. A evolução dos sistemas de telecomunicações exige uma taxa de erro de bit cada vez menor para que a troca de informações seja a mais fiel possível.

Para realizar a simulação das curvas de BER vs SNR no Matlab, foi feita a simulação Monte Carlo, que recorre aos métodos de amostragem estatística para solucionar problemas utilizando em suas simulações uma sequência de números aleatórios. Esse método também pode ser encarado como um método numérico que resolve problemas a partir de uma amostragem aleatória que se aproxima da solução (MENDIVIL et SHONKWILER, 2009).

A presença de ruídos modifica o sinal de saída de um sistema, de maneira a interferir na recepção do sinal enviado. Dessa forma, a medição, em decibéis, da razão do sinal de saída pelo valor RMS do ruído informa a relação sinal-ruído, SNR, que especifica a qualidade do sinal:

$$\text{SNR} = 10 \log_{10} \frac{P_S}{P_N} \quad (4.2)$$

Em que $P_S = E\{|C_i(t)|^2\}$ é a potência do sinal e $P_N = E\{|n(t)|^2\}$ é a potência do ruído.

A partir das curvas da taxa de erro de bit *versus* relação sinal-ruído para diferentes condições do sistema é possível avaliar como as técnicas de modulação aqui estudadas se comportam após a passagem do sinal através de um canal ruidoso e seletivo em frequência.

Também será avaliada a curva de densidade espectral de potência *versus* a frequência de transmissão normalizada. De acordo com FILHO (2002), a PSD relaciona a energia do sinal com sua frequência e a sua unidade de medida é Watt por Hertz (W/Hz). A PSD do sinal é a média da magnitude da transformada de Fourier ao quadrado, durante um intervalo de tempo grande. Sendo assim, densidade espectral de potência é definida na equação (4.3):

$$S_x(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \left[\frac{1}{2T} \left| \int_{-T}^T x(t) e^{-j2\pi ft} dt \right|^2 \right] \quad (4.3)$$

Sendo T o período do sinal e $x(t)$ o sinal a ser analisado.

Tal curva nos mostra a potência do sinal em função da frequência, ou seja, mostra em quais frequências existe uma alta variação de intensidade, sendo que quanto mais baixo for o lóbulo da curva, maior será a utilização do espectro alocado e, conseqüentemente, maior eficiência espectral.

Dessa forma, o gráfico da densidade espectral de potência nos dá uma boa indicação da ocupação espectral da forma de onda usada para transmissão, bem como a banda útil ocupada pelos símbolos. Para realizar tal simulação, o programa realizado em ambiente MATLAB recebe o valor da quantidade de símbolos escolhidos e constrói matrizes de ordem número de subportadoras vs número de símbolos, que representam os símbolos que serão modulados.

A densidade espectral de potência do sinal de transmissão FBMC é projetada para fornecer um baixo vazamento fora de banda, fornecendo, portanto, uma eficiência espectral avançada com relação ao OFDM, como será mostrada na simulação.

4.2 SIMULAÇÕES E ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

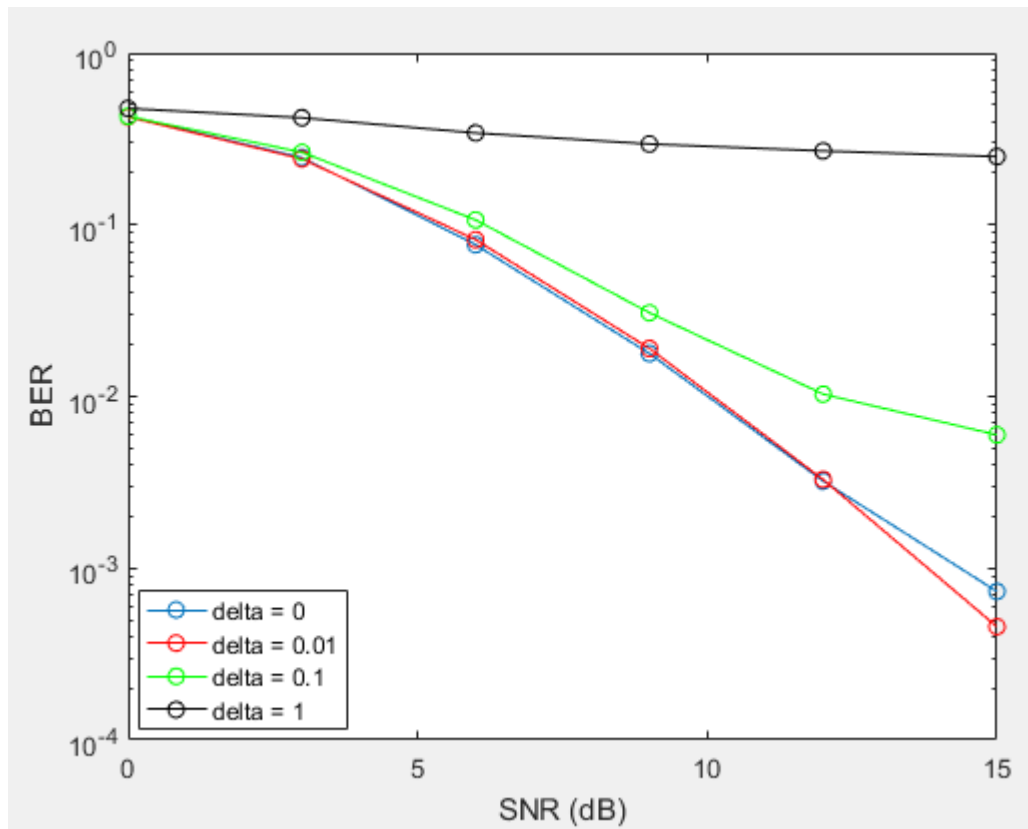
O simulador utilizado neste trabalho foi desenvolvido em ambiente Matlab e funciona como uma representação de um sistema de comunicação de maneira que,

ao definir os parâmetros de inicialização e os dados de entrada, ele fornece os resultados de saída.

O gráfico 1 é resultado de simulações de um sistema de comunicação que utiliza o OFDM como forma de onda e está sujeito a erros na estimação do canal. A variância desse erro, aqui denotada como delta, foi sendo modificada ao longo das simulações a fim de mostrar, em um só gráfico, como o OFDM se comporta quando se considera essa variância do erro de estimação do canal. Sendo assim, o programa foi simulado para 1024 subportadoras, modulação 4QAM. O canal é modelado como um canal de comprimento 3, com coeficientes modelados de acordo com uma variável aleatória de distribuição Rayleigh. Na equalização, admite-se que há um erro de estimação de canal modelado como uma variável gaussiana de variância δ (denotada por θ_δ). Sendo assim, o canal de equalização tem componente de resposta em frequência dada por $H_k^{eq} = H_k + \theta_\delta$.

Analisaremos as curvas da taxa de erro de bit em função da relação sinal-ruído para diferentes valores da variância do erro de estimação do canal, mostrado no gráfico 1. Começando pela curva em azul, que não possui erro na estimação, e com o delta variando até 1, o gráfico mostra o impacto causado pela implementação da variância do erro de estimação do canal na BER. Percebe-se que a taxa de erro de bit aumenta com o acréscimo no delta e, para maiores valores de SNR, essa discrepância se destaca ainda mais, afetando o desempenho do sistema OFDM.

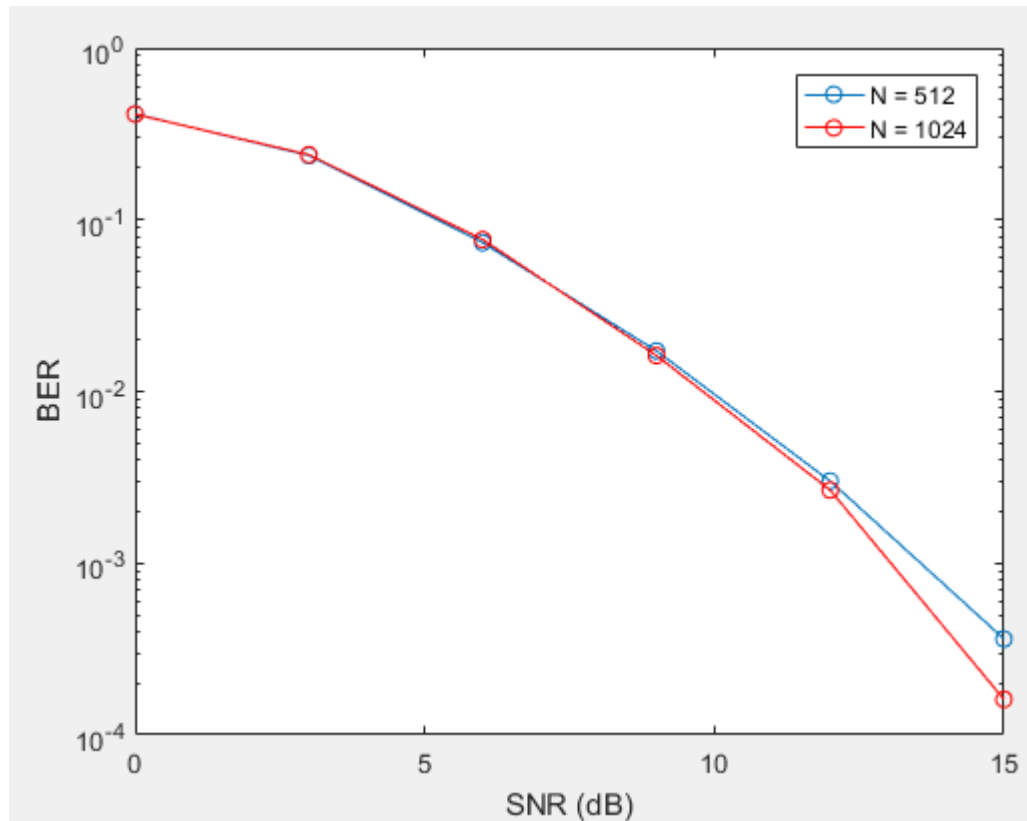
Gráfico 1 – BER vs SNR para a modulação OFDM com erro na estimação do canal para um canal variável.



Fonte: O autor, 2021.

O gráfico 2 apresenta o resultado do estudo da evolução da taxa de erro de bit em função da relação sinal-ruído para um FFT de 512 e 1024 elementos presentes na modulação QPSK. Os demais parâmetros foram mantidos iguais para que fosse possível avaliar apenas o impacto referente à alteração do FFT, aqui denominada N.

Gráfico 2 – BER vs SNR para a modulação OFDM para N = 512 e 1024.



Fonte: O autor, 2021.

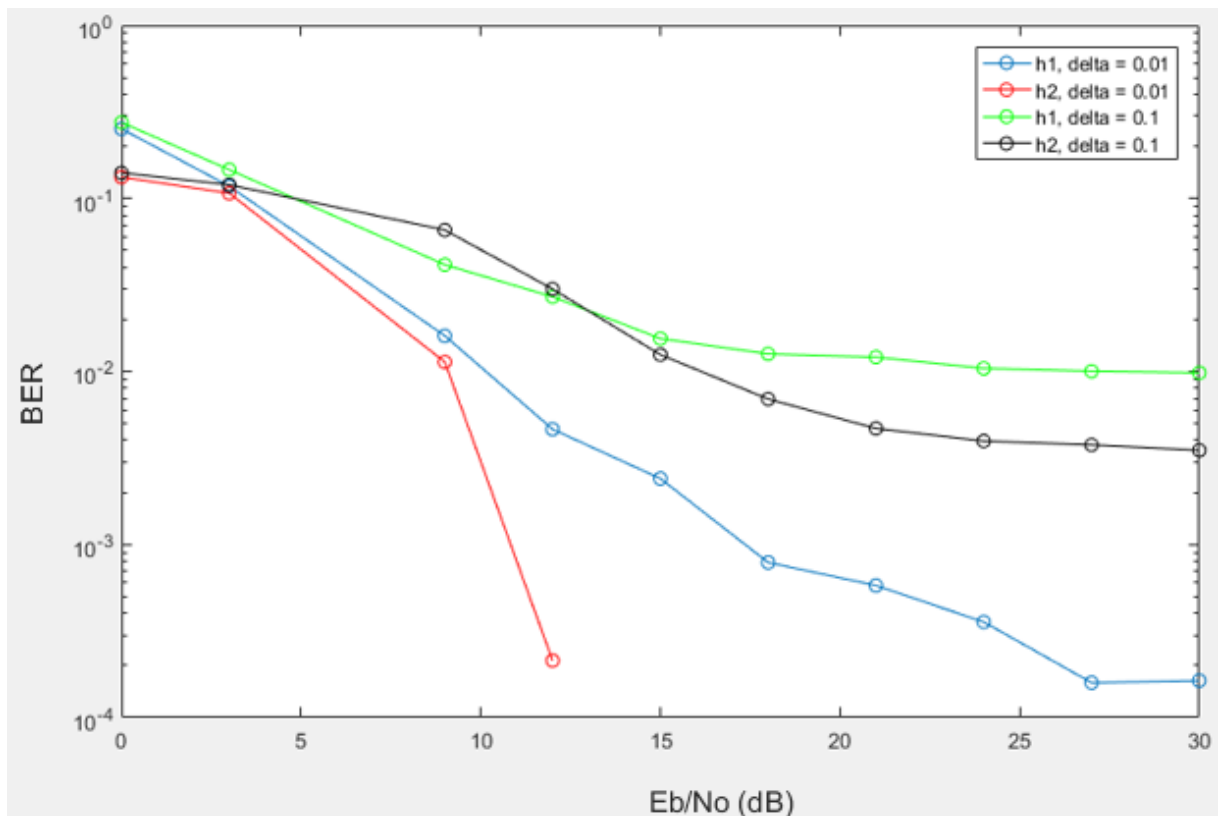
A mudança de BER observada no gráfico exibe tendência de queda muito próxima para ambos os valores de elementos da FFT. Esse resultado mostra que o BER é praticamente insensível às mudanças de número de elementos da FFT quando analisados os valores de 1024 e 512. No entanto, um maior FFT leva a uma taxa de transferência mais alta, requerendo maior potência e ocupação espectral.

As simulações anteriores foram feitas com um canal variável. No entanto, agora faremos as mesmas observações comparando as respostas para o canal variável analisados no gráfico 1 e um canal fixo com nulo espectral, cuja função de transferência é dada por $H(z) = 1 - 1.4142z^{-1} + z^{-2}$, para analisarmos o impacto dessa modificação no OFDM. Primeiramente, serão colocados diferentes valores de variância de erro na estimação de canal assim como foi feito no gráfico 1.

O canal variável está representado por h_1 , enquanto o h_2 representa canal fixo com nulo espectral. O gráfico 3 mostra a relação BER vs E_b/N_0 , sendo o E_b/N_0 a relação energia de bit pela potência de ruído e se relaciona com a SNR a partir da relação $SNR = E_b/N_0 + 3$. Os resultados do gráfico 3 mostram que existe uma

sensibilidade quanto a alteração do tipo de canal utilizado. Tal diferença fica ainda mais acentuada conforme aumenta a variância do erro na estimação do canal, uma vez que para um E_b/N_0 de 3 dB, por exemplo, o BER é 0,1747 no canal h2 e 0,2853 no canal h1 para delta igual a 0,1, uma diferença de 0,1106 na BER. No entanto, ao analisarmos as mesmas informações para um delta de 0,01, temos um resultado de 0,1629 para h2 e 0,2623 para h1, o que representa uma diferença 0,0994 na BER, 89,87% do resultado anterior. Para uma mesma relação energia de bit por potência de ruído, tem-se uma maior taxa de erro de bit quando usado um canal fixo.

Gráfico 3 – BER vs E_b/N_0 para a modulação OFDM para um canal fixo (h2) e variável (h1).

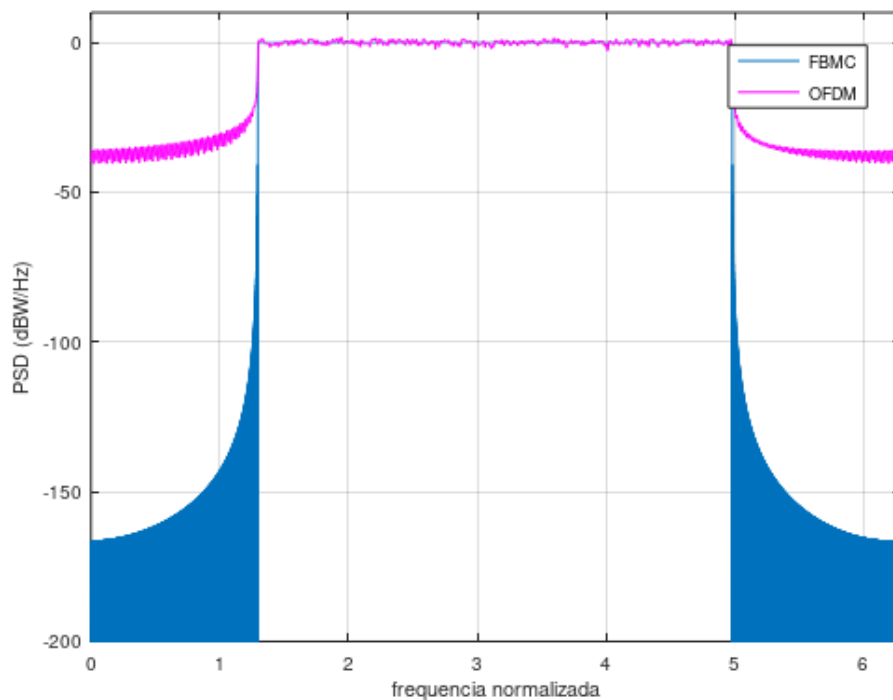


Fonte: O autor, 2021.

Para finalizar a análise dos parâmetros para o OFDM e iniciar o FBMC, vamos analisar o gráfico 4 da densidade espectral de potência vs frequência de transmissão normalizada já comparando as duas modulações. Ambas as curvas foram parametrizadas com uma FFT de 1024 elementos, modulação 4QAM, SNR de 12dB e um fator de sobreposição igual a 4.

O *script* do MATLAB utilizado para gerar o gráfico 4 constrói matrizes de ordem número de subportadoras vs número de símbolos a partir dos valores de número de símbolos escolhidos que passarão pela modulação QAM. Isso nos dá uma boa indicação da ocupação espectral da forma de onda utilizada para transmissão, bem como da banda útil ocupada pelos símbolos OFDM e FBMC.

Gráfico 4 – Densidade espectral de potência vs frequência de transmissão normalizada



Fonte: O autor, 2021.

A partir do resultado acima, pode-se perceber que o sistema OFDM apresenta maiores lobos laterais. Os lóbulos laterais mais acentuados implicam a necessidade do uso de um intervalo de guarda maior para evitar vazamento espectral, fato que reduz a eficiência espectral do sistema. A eficiência espectral do sistema OFDM também é afetada pelo uso do prefixo cíclico que, apesar de oferecer robustez aos canais seletivos de frequência e uma equalização simples, reduz a eficiência espectral do sistema, uma vez que parte da banda é ocupada para sua transmissão sem que haja envio de informação.

O FBMC, por sua vez, foi proposto com o objetivo de aumentar a eficiência espectral, através da aplicação de filtros de rápido decaimento, evitando o vazamento espectral. Há várias possibilidades de escolha de filtro, uma das mais difundidas é a

escolha do filtro obtido através de técnicas de otimização como discutido em (BELLANGER, 2001).

As simulações a seguir serão referentes ao comportamento do FBMC com a implantação do erro de estimação de canal para diferentes cenários. Para realizar as simulações de BER vs SNR, parametrizou-se o programa com uma FFT de 1024, modulação 4QAM e fator de sobreposição igual a 4.

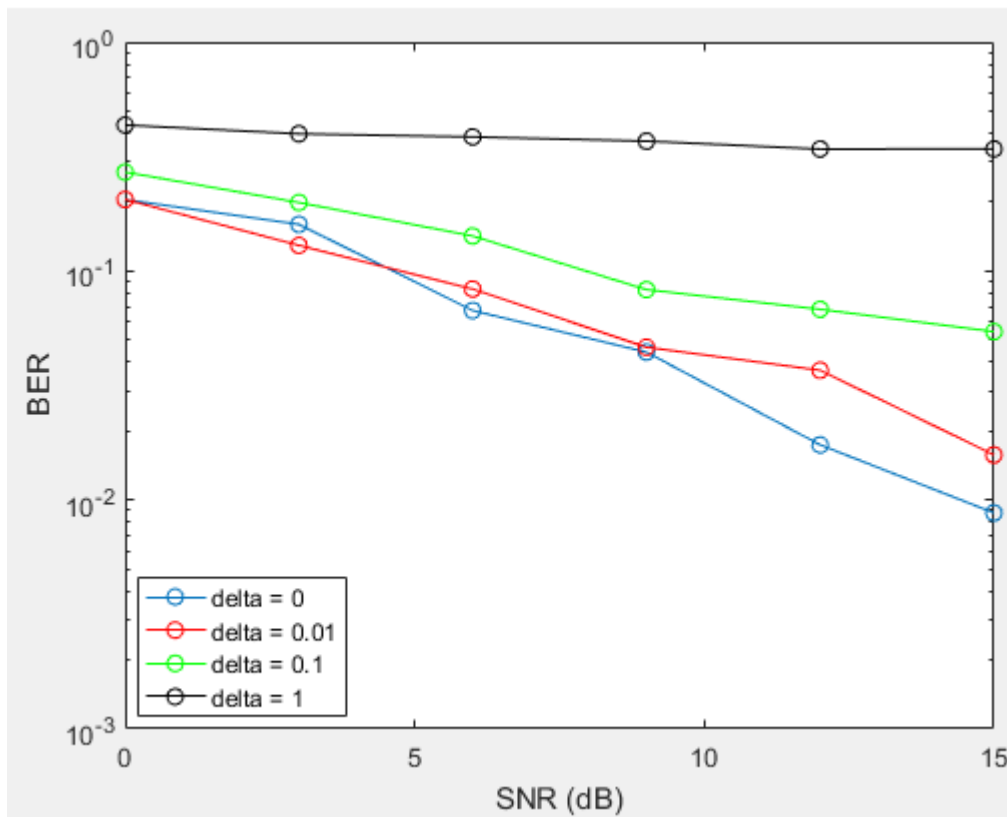
Para simulação do sistema FBMC, implementou-se um equalizador obtido com a função objetivo do tipo Mínimo Erro Quadrático Médio. Sendo assim, para cada bloco de símbolos FBMC, é necessário determinar a matriz inversa: $\mathbf{W} = \left(\mathbf{H}^T \mathbf{H} + \frac{1}{\text{SNR}} \mathbf{I} \right)^{-1}$, em que \mathbf{H} é a matriz de convolução do canal e \mathbf{I} é a matriz identidade (NISSEL; MARSALEK; RUPP, 2017).

Esse fato confere uma alta complexidade computacional ao sistema, em especial no caso em que se trata de um canal variante no tempo, o que leva a necessidade de que a matriz \mathbf{H} (e conseqüentemente, a inversa \mathbf{W}) seja atualizada a cada bloco. O prefixo cíclico utilizado no sistema OFDM, garante a possibilidade de que a equalização do sistema possa ser feita com uma simples multiplicação por uma constante complexa (*one tap equalizer*), sendo essa uma das grandes vantagens do sistema OFDM (SARI et al., 1995).

O gráfico 5 mostra o resultado de simulações de um sistema de comunicação que considera um erro na estimação do canal e canal variante. A variância desse erro, novamente denotada como delta, foi sendo modificada ao longo das simulações a fim de mostrar como o FBMC se comporta quando considera essa variância do erro de estimação do canal.

Analisando o gráfico 5, temos uma curva em azul, que representa um canal sem erro na estimação e as demais curvas apresentam uma variância de erro igual a 0.01, 0.1 e 1, estando as curvas em vermelho, verde e preto, respectivamente. Percebe-se, portanto, que a taxa de erro de bit cresce rapidamente com o acréscimo na variância do erro e, assim como para o OFDM, esse aumento se torna mais evidente quanto maior é o valor da relação sinal-ruído.

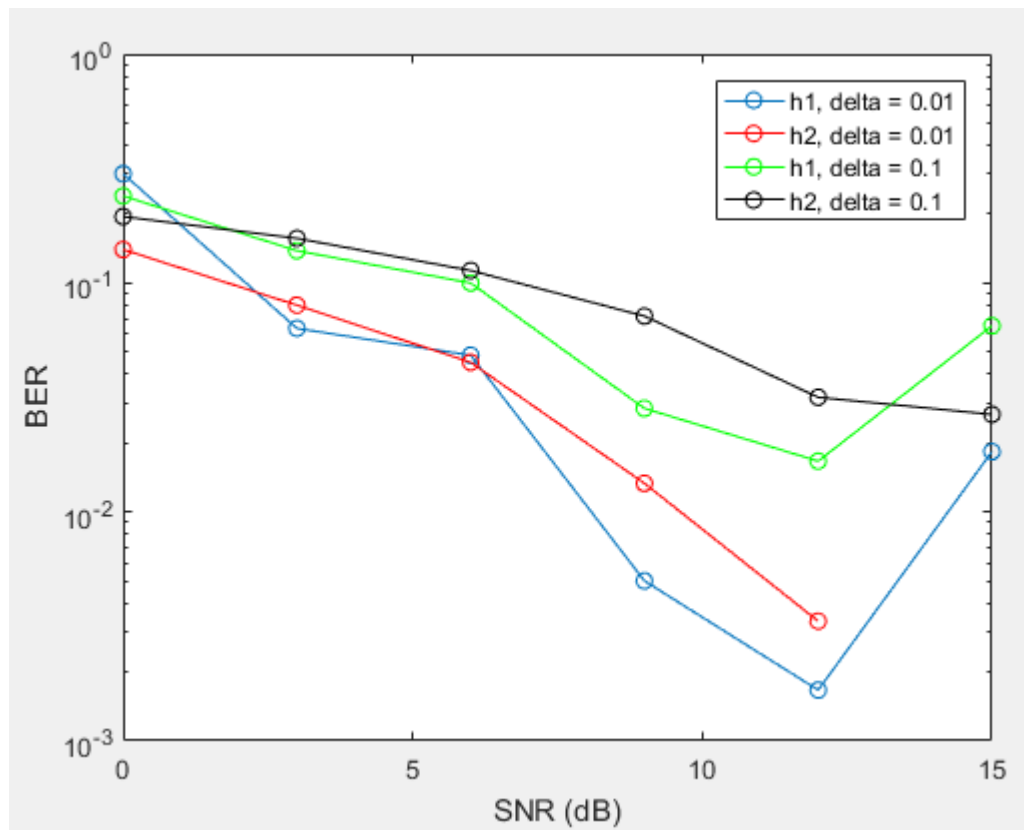
Gráfico 5 – BER vs SNR para a modulação FBMC com erro na estimação do canal.



Fonte: O autor, 2021.

No gráfico 6, será avaliada a sensibilidade do FBMC quanto à mudança no canal. Utilizaremos a denominação h_1 para um canal variável e h_2 para um canal fixo com nulo espectral.

Gráfico 6 – BER vs SNR para a modulação FBMC para um canal fixo (h2) e variável (h1).

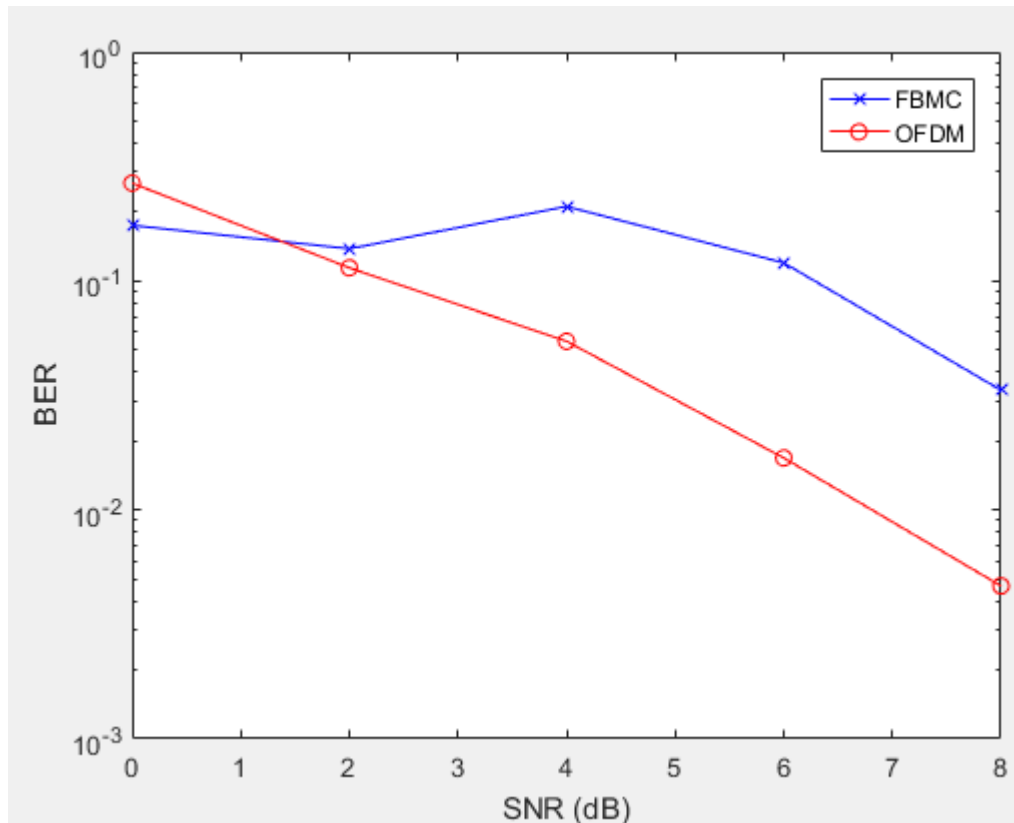


Fonte: O autor, 2021.

Diante desse cenário, é possível perceber a sensibilidade da resposta do FBMC ao alterar o tipo de canal. O canal variável apresenta melhor performance, visto que para um mesmo valor de SNR ele possui menor BER, o que significa melhor qualidade do sinal em aproximadamente 66,67% da curva analisada acima.

Por fim, devemos comparar os comportamentos do OFDM e FBMC para o mesmo cenário. Para isso, o gráfico 9 mostra as curvas das duas formas de onda para o canal variável sem erro de estimação de canal.

Gráfico 7 – BER vs SNR para OFDM e FBMC, N = 1024.



Fonte: O autor, 2021.

O resultado acima mostra que, para a BER, o OFDM apresenta um melhor desempenho quando comparado ao FBMC, o que significa que este último deve melhorar seus métodos de equalização para obter melhores taxas de erro de bit.

Neste capítulo, conduzimos um estudo paramétrico de duas formas de onda candidatas para 5G avaliando os parâmetros taxa de erro de bit e densidade espectral de potência.

Neste contexto, os resultados apresentados nas simulações comprovam que a modulação FBMC possui vantagem quanto à utilização do espectro de frequência devido à utilização do banco de filtros. Em termos de taxa de erro de bit, a forma de onda OFDM possui melhor desempenho do que os registrados pelo FBMC, o que demonstra que o método de equalização utilizado pelo FBMC deve ser aperfeiçoado para obter melhores resultados de BER.

5 CONCLUSÃO

A tecnologia 5G promete uma revolução na sociedade a partir da atualização nas formas de comunicação entre pessoas e dispositivos. O sistema promete maior largura de banda e tempos de latência extremamente baixos, o que irá permitir o desenvolvimento de novos serviços e o aprimoramento dos sistemas existentes.

Assim como foi feito nas demais gerações, o 5G irá herdar características das tecnologias anteriores, mas também empregará novos conceitos que proporcionem todas as mudanças necessárias. Para compreender essa evolução, este trabalho apresentou o histórico e as principais características das tecnologias anteriores ao 5G, bem como introduziu os conceitos acerca da padronização e atributos básicos da quinta geração.

Neste trabalho, estudou-se as técnicas de modulação OFDM e FBMC, potenciais candidatas para a rede 5G, e foi realizada uma comparação de desempenho entre elas. Nesse contexto, foram avaliados dois parâmetros, sendo eles: taxa de erro de bit para diferentes cenários e densidade espectral de potência. Os resultados da simulação obtidos mostram que o FBMC apresenta os melhores resultados em termos de utilização do espectro de frequência, de forma que essa forma de onda utiliza a largura de banda disponível de maneira mais eficiente do que o OFDM, um destaque para a aplicação no 5G que tem como requisito a maior eficiência quanto a utilização do espectro. O OFDM, por sua vez, apresentou melhores resultados para a taxa de erro de bit, o que significa que o FBMC deve melhorar seus métodos de equalização para obter melhores taxas de erro de bit e assim ser uma boa candidata para o 5G.

Por ser uma tecnologia em desenvolvimento, muitas alterações devem ser feitas nos próximos anos. As operadoras de telefonia já começaram a experimentar a rede 5G, mas a implementação desse padrão com atendimento aos requisitos idealizados pela quinta geração ainda necessita do desenvolvimento de novas técnicas-chave. Este trabalho apresentou alguns dos aspectos já estabelecidos, bem como discutiu sobre pontos que ainda estão em desenvolvimento com o intuito de oferecer um material de consulta introdutório para entendimento dessa nova tecnologia.

REFERÊNCIAS

3GPP TR 21.915, **Release 15**. dez. 2018, v 0.5.0. Disponível em: <https://www.3gpp.org/release-15>. Acesso em: 08 abr. 2020.

ADDISON, Luciana Maria Figueiredo. **A importância dos Valores organizacionais subjacentes no processo decisório dos Correios**. 2002. Dissertação (Mestrado em Administração) – Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 2002.

BELLANGER, M. G. Specification and design of a prototype filter for filter bank based multicarrier transmission. *In: 2001 IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON ACOUSTICS, SPEECH, AND SIGNAL PROCESSING, 2001, Salt Lake City. Anais [...]*. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/940488>. Acesso em 26 de jul. 2021.

BELLANGER, M.; BONNEROT, G., COUDREUSE, M. Digital Processing Techniques in the 60 Channel Transmultiplexer. *In: IEEE TRANSACTIONS ON COMMUNICATIONS, 1978. Anais [...]*. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/1094124>. Acesso em: 18 jul. 2021.

BORDENAVE, Juan E. Díaz. **O que é comunicação**. 1. ed. São Paulo: Brasiliense, 1982. 106 p.

CABRAL, Danilo César. Como o pombo-correio sabe para onde levar a encomenda? **Super Interessante**, 2018. Disponível em: <https://super.abril.com.br/mundo-estranho/como-o-pombo-correio-sabe-para-onde-levar-a-encomenda/>. Acesso em: 01 jul. 2021.

CARVALHO NETO, Alfredo. TV Digital I: Entrelaçadores Temporais para sistemas de Transmissão. **Teleco**, 2011. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialtvdentr1/default.asp>. Acesso em 05 abr. 2021.

DAVID, Rodrigo Pereira. **Técnica de estimação de canal utilizando símbolos pilotos em sistemas OFDM**. 2007. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: http://bom.org.br:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/1646/David_2007.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 05 mai. 2021.

DO, Michelle M. Timeline of 5G in ITU-R and 3GPP. **Netmanias Analyze Trends, Technologies and Market**, 2017. Disponível em: <https://www.netmanias.com/en/post/oneshot/11147/5g/timeline-of-5g-standardization-in-itu-r-and-3gpp>. Acesso em: 08 abr. 2020.

GSMA. **Road to 5G**: Introduction and Migration. Disponível em: https://www.gsma.com/futurenetworks/wp-content/uploads/2018/04/Road-to-5G-Introduction-and-Migration_FINAL.pdf. Acesso em: 02 fev. 2021.

GUGLIELMO, Marconi: biográfico. **The Nobel Prize**. Amsterdam: NobelPrize.org., 2021. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1909/marconi/biographical/>. Acesso em: 03 fev. 2021.

HSPA e WiMax Móvel I: Como comparar o desempenho na teoria e na prática. **Teleco**, 2013. Disponível em:

<https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialhspawimax1/default.asp>. Acesso em 30 jun. 2021.

JABER, Mona; et al. 5G backhaul challenges and emerging research directions: A survey. **IEEE access**, v. 4, p. 1743-1766, abr. 2016. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7456186>. Acesso em: 02 fev. 2021.

KEMPF, Rachel. Multi-Access Edge Computing: o facilitador de padrões 5G. **Azion**, 2020. Disponível em: <https://www.azion.com/pt-br/blog/multi-access-edge-computing-facilitador-padroes-5g/>. Acesso em 01 jul. 2021.

LEITE. E.P.; PENEDO. C. A. A técnica de transmissão OFDM, **Revista Telecomunicações**, v. 5, PP. 1-3, junho, 2002.

LEE, W. C. Y. **Mobile communications engineering**: theory and applications. 2nd. Ed. New York: McGraw Hill, 1997.

MARKS, Roger. 5G standards in IMT-2020 and elsewhere. **IEEE Standards University**, publicado em: 21 mar. 2018. Disponível em <https://www.standardsuniversity.org/e-magazine/march-2018-volume-8-issue-1-5g-802-11/5g-standards-in-imt-2020-and-elsewhere/>. Acesso em: 02 fev. 2021.

MARTINS, Francisco Tacizio. **Tecnologia 5G**: o futuro das redes móveis. 2016. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização em Gestão de Serviços de Telecomunicações) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/19366/1/CT-TELECOM-II-2016-02.pdf>. Acesso em 09 jun. 2021.

MEDEIROS, J. C. O. **Princípios de telecomunicações**: teoria e prática. São Paulo: Editora Érica, 2016.

MOTA, V. L. G.; CARVALHO, R.; CORREA, C.; RENNA, R. B.; MAGRI, V.; FERREIRA, T.; CASTELLANOS, P.; MATOS, L. Evolução da tecnologia de telefonia móvel e estudo e caracterização de um sistema móvel 5G de quinta geração. **ENGEVISTA**, V. 21, n.1, p.154-175, fevereiro 2019.

NIETZSCHE, F. W. **A gaia ciência**. São Paulo: Companhia das Letras, 2012.

NISSEL, R.; RUPP, M.; MARSALEK, R. FBMC-OQAM in doubly-selective channels: a new perspective on MMSE equalization. *In*: 2017 IEEE 18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), 2017, Sapporo. **Anais** [...]. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8227806>. Acesso em: 26 jul. 2021.

NOBRE, J. C. A. Ameaças e Ataques aos Sistemas de Informação: Prevenir e Antecipar. **Cadernos UniFOA**, Volta Redonda, ano 2, nº. 5, dez. 2007. Disponível em: <http://www.unifoa.edu.br/pesquisa/caderno/edicao/05/11.pdf>. Acesso em: 01 jul. 2021.

PINTO, E. L.; ALBUQUERQUE, C. P. A técnica de transmissão OFDM. **Revista Científica Periódica Telecomunicações**, Minas Gerais, v. 5, n. 1, p. 1 - 20, jun. 2002. Disponível em: <http://www.cricte2004.eletrica.ufpr.br/ufpr2/tccs/27.pdf>. Acesso em: 02 set. 2020.

PENA, L.S; PENA, D. S.; SOUSA JÚNIOR, V.A. **OFDM em Rádio Definido por Software**. [S.l]: [s.n.], 2016. Disponível em: http://gppcom.ct.ufrn.br/wp-content/uploads/2020/05/OFDM_TCC_Luan.pdf. Acesso em: 16 ago. 2020.

POPOVSKI, Petar; et al. **5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC**: A communication-theoretic view. IEEE CTW @ Miramar Beach, FL, USA, mai. 2018. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1804.05057>. Acesso em: 14 abr. 2020.

RAMASWAMI, Rajiv. **Optical Networks**: a practical perspective. 3. ed. Burlington: The Morgan Kaufman Series in Networking, 2002. Disponível em: <http://www.cesarkallas.net/arquivos/faculdade-pos/TP319-redes-opticas/Optical-Networks-3nd.pdf>. Acesso em: 03 ago. 2020.

RATASUK, Rapeepat; et al. LTE-M evolution towards 5G massive MTC. *In*: 2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps), 2017, Singapura. **Anais [...]**. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8269112>. Acesso em: 14 abr. 2020.

SALEMME, Maria Filomena. O rádio vai ao cinema: processos comunicacionais. *In*: Congresso Brasileiro de Ciências da Comunicação, 38., 2015, Rio de Janeiro. Disponível em: <https://casperlibero.edu.br/wp-content/uploads/2017/02/Maria-Filomena-Salemme-FCL.pdf>. Acesso em 03 fev. 2021.

SARI H.; KARAM G.; JEANCLAUDE I. Transmission techniques for digital terrestrial TV broadcasting. **IEEE Communications Magazine**, vol. 33, no. 2, pp. 100-109, Feb. 1995. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/350382>. Acesso em: 07 nov. 2021.

SHAFI, Mansoor; et al. 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 35, n. 6, p. 1201-1221, abr. 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7894280>. Acesso em: 14 abr. 2020.

SHONKWILER, R. W.; MENDIVIL, F. **Explorations in Monte Carlo Methods**. 1 ed. Nova York: Springer-Verlag New York, 2009.

TUDE, Eduardo. **Telefonia celular no Brasil**. 2007. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialcelb/default.asp>. Acesso em: 07 jun. 2021.

ULBRICH, Henrique Jorge Guimarães. **Formação e ocupação de bandas para telefonia celular**. 2008. Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialbandcel/default.asp>. Acesso em: 20 out. 2020.

VASCONCELLOS, O.V. **Análise do Desempenho do Esquema de Transmissão GFDM**: Generalized Frequency Division Multiplexing. 2014. Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: <https://bdm.unb.br/handle/10483/13325>. Acesso em: 07 set. 2020.

WANG, Jian; et al. Spectral Efficiency Improvement with 5G Technologies: Results from field tests. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 35, n. 8, p. 1867-1875, ago. 2017. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7944631>. Acesso em: 02 fev. 2021.

WEISS, T.A. e Jondral, F.K., Karlsruhe Univ., Alemanha; Spectrum pooling: an innovative strategy for the enhancement of spectrum efficiency, **IEEE Communications Magazine**, vol 42, no.4, Mar 2004, pp. 8-14.