

**TRABALHO DE GRADUAÇÃO III EM ENGENHARIA DE INFORMAÇÃO**



Universidade Federal do ABC

**Análise dos métodos de multiplexação em frequência  
candidatos ao 5G**

**Vitor Barreto de Oliveira**

**RA: 11056814**

Santo André

2019

## **Resumo**

A telefonia móvel é uma das tecnologias que mais avançou nos últimos anos e está próxima de chegar à sua quinta geração. Para esta nova geração, haverá a introdução de recursos avançados e focados em diferentes áreas (além do acesso de uso geral). Estas áreas exigirão uma ultra baixa latência, grande área de cobertura e suporte para uma quantidade massiva de usuários, e os serviços adicionados serão a cobertura especial para carros autônomos, dispositivos médicos, dispositivos de emergência, internet das coisas e outros serviços que vão além de simplesmente acessar a internet.

Para comportar tantos recursos, a otimização das componentes do sistema deve ser garantida em todas as camadas e subcamadas, para não criar nenhum gargalo e impedir que o sistema seja limitado por um ponto específico, ou seja, o sistema deve ser flexível e melhorável continuamente mesmo após sua padronização.

O foco deste trabalho é estudar as técnicas de multiplexação em frequência que estavam concorrendo antes da definição da 3GPP pela utilização da OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para o 5G NR (*New Radio*) e entender o processo de caracterização de uma técnica de multiplexação em frequência e o impacto que as características dela têm sobre o desempenho geral do sistema de comunicação.

## **Abstract**

The mobile telephony is one of the technologies that has advanced the most in the later years and is close to reach its fifth generation. For this new generation, there will be the introduction of several advanced resources focused on different areas (other than general internet access). These areas will need an ultra low latency, great coverage area and support for a massive amount of users, and the added services will be the special coverage for autonomous vehicles, medical devices, emergency devices, internet of things and other services that go further than just accessing the internet.

To handle all these resources, the optimisation of the system components must be assured in all its layers and sublayers, to not having any bottleneck that will limit the system in one specific point, i. e. the system must be flexible and continuously improvable after the standardization.

The focus of this paper is to study the frequency division multiplexing techniques that were concurring before the 3GPP definition for OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) on 5G NR (New Radio) and to understand the process of characterization of a frequency division multiplexing technique and the impact that its characteristics have on the communication system.

## Sumário

<b>1. Introdução</b> .....	<b>02</b>
<b>2. Objetivo</b> .....	<b>03</b>
<b>3. Considerações sobre as formas de onda</b> .....	<b>03</b>
<b>4. As formas de onda</b> .....	<b>03</b>
<b>4.1. OFDM</b> .....	<b>03</b>
4.1.1. Modulação e demodulação OFDM .....	04
4.1.2. Esquema de transmissão e recepção OFDM .....	06
4.1.3. Prefixo Cíclico (CP) .....	08
<b>4.2. Motivação da aplicação de filtros</b> .....	<b>09</b>
<b>4.3. F-OFDM</b> .....	<b>09</b>
<b>4.4. FBMC</b> .....	<b>10</b>
4.4.1. Offset-QAM .....	10
4.4.2. Modulação e demodulação FBMC .....	10
4.4.3. Esquema de transmissão e recepção FBMC .....	11
<b>5. Desenvolvimento</b> .....	<b>12</b>
5.1. Esquema de simulação geral .....	12
5.2. Parâmetros dos multiplexadores .....	15
5.3. Geração e medição reais .....	21
<b>6. Resultados e discussão</b> .....	<b>23</b>
6.1. Ocupação de banda .....	23
6.2. Distribuição de potência .....	25
6.3. Complexidade de geração e recepção .....	29
6.4. Taxa de erro de bit .....	30
6.4.1. BER reduzindo a largura de banda da F-OFDM .....	32
6.4.2. Geração e medição da FBMC .....	38
<b>7. Conclusão</b> .....	<b>40</b>
<b>Bibliografia</b> .....	<b>41</b>

## 1. Introdução

Com os avanços tecnológicos, alcançamos mais qualidade no áudio, vídeo e outros serviços de nossas televisões e aparelhos celulares, além da capacidade de conectar quase qualquer objeto à internet, criando um objeto “inteligente”. Com isso, o número de conexões, taxa de transmissão de dados e ocupação de banda vêm aumentando, juntamente com esse aumento da qualidade da mídia. Assim, os sistemas atuais de comunicação irão chegar ao seu limite e uma evolução se tornou inevitável.

A evolução do atual sistema de comunicação sem fio é denominada 5G NR ou 5G *New Radio* e tem essa nomenclatura, pois não traz somente um aumento na taxa de transmissão de dados, mas os casos de uso como:

- Comunicação móvel melhorada: Possibilitando o uso de tecnologias como realidade virtual e realidade aumentada, com taxa de dados maiores e uniforme, com menor latência e menor custo por bit [1].
- Serviço de missão crítica: Trazendo uma comunicação ultra-confiável/disponível, com enlaces de baixa latência para controle remoto de estrutura, veículos, procedimentos e equipamento médicos, etc [1].
- Internet das coisas massiva: Com a capacidade de diminuição da taxa de dados, potência e mobilidade para fornecer soluções simples e de baixo custo [1].
- Serviços desconhecidos atualmente: O 5G tem a flexibilidade para suportar serviços que ainda não existem [1].

Para que o sistema funcione da maneira esperada, a camada física do 5G deve superar inúmeras barreiras e a maior delas é a transmissão e recepção sem fio sem um gasto elevado de energia de outros recursos e sem uma ocupação de banda insustentável.

Para uma taxa de dados tão alta e latência tão baixa, fenômenos que interferem no sinal podem fazer o sistema colapsar até para curtas distâncias e baixo número de usuários. Então, cada ponto envolvido na transmissão e recepção sem fio deve ser bem avaliado e testado para atingir o melhor custo-benefício e tornar o 5G NR uma tecnologia revolucionária.

As técnicas envolvidas para lidar com as adversidades incluem o uso de ondas milimétricas (pois as frequências abaixo de 6GHz são utilizadas por muitos sistemas atuais), identificação de rede com células pequenas, MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) massivo, formatação de feixe (*beamforming*) e comunicação *full duplex* [2], além de uma forma de onda que suporte todas estas técnicas, com controle de ocupação de banda, baixa proporção entre a potência máxima para média (PAPR - *Peak to Average Power Ratio*), seja robusta em canais seletivos em frequência e com multipercorso, alta eficiência espectral e fácil implementação.

## 2. Objetivo

Apesar das formas de ondas a serem utilizadas no 5G NR já estarem definidas no Release 15 [3], este trabalho tem o intuito de esclarecer as diferenças entre as técnicas de multiplexação em frequência candidatas para o 5G NR (antes da definição), através da caracterização quanto a complexidade, robustez e aplicabilidade das técnicas utilizando o software SystemVue.

## 3. Considerações sobre as formas de onda

Sistemas de transmissão de portadora única (*single-carrier*) apresentam alta interferência intersimbólica para taxas elevadas de transmissão e requerem equalizadores adaptativos para compensar os efeitos do canal e, quanto maior a taxa de dados, mais complexos devem ser os equalizadores [4]. Assim, sistemas de transmissão multi-portadora foram implementados e implantados para superar as limitações das comunicações de portadora única. Um exemplo disto é o LTE (*Long Term Evolution*) que utiliza OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para os sinais de *Downlink* (envio de dados que parte da estação rádio-base para o dispositivo) [5].

No 5G New Radio (5G NR), o sucesso garantido com o LTE é mantido na utilização das formas de onda com multiplexação em frequência, com a diferença que a OFDM pode ser utilizada tanto para *Downlink* quanto para *Uplink* (transmissão de dados que parte do dispositivo para a estação rádio-base) [3]. As formas de onda definidas no Release 15 do 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*) foram CP-OFDM (OFDM com adição de um prefixo cíclico) para *Downlink* (DL) e, complementarmente, DFT-s-OFDM (OFDM com pré-codificação de *Discrete Fourier Transform*) para *Uplink* (UL) com a limitação de transmissão em uma portadora somente [3].

Embora já estejam definidas as formas de onda para o 5G NR, as instituições que formam o 3GPP se reuniram em várias ocasiões até chegar em tal definição [6]. Muitas variações de multiplexação no domínio da frequência foram estudadas, a maioria delas se baseando em variações da OFDM, como o *Filtered-OFDM* e CP-OFDM, mas também formas de onda baseadas em UFMC (*Universal Filtered Multi-Carrier*) como a FBMC (*Filter Bank Multi-Carrier*) [7].

Portanto, neste trabalho, serão estudadas algumas dessas técnicas de modulação multiportadora candidatas ao 5G NR, para entender as diferenças entre elas e esclarecer o funcionamento de cada uma.

## 4. As formas de onda

### 4.1. OFDM

A multiplexação OFDM é caracterizada por um agrupamento de múltiplas subportadoras ortogonais para a transmissão dos dados. Ela funciona dividindo a quantidade total de dados entre subportadoras independentes que, por estarem agrupadas de forma ortogonal, têm reduzida a possibilidade de interferirem entre si, permitindo a transmissão simultânea em todas as subportadoras, o que diminui a interferência intersimbólica e aumenta a capacidade de transmissão de dados [4]. Esta forma de onda foi selecionada para o LTE, pois com ela é possível lidar bem com o multipercurso e desvanecimento dos canais com um simples equalizador *single-tap* e com a adição de um prefixo cíclico aos símbolos para lidar com a ISI (*InterSymbol Interference*) [8].

#### 4.1.1. Modulação e demodulação OFDM

O transmissor OFDM mapeia a mensagem binária em uma sequência de símbolos das constelações PSK (*Phase-Shift Keying*) ou QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) e são convertidos em N sinais paralelos [4]. Cada um dos N sinais são então alocados em diferentes subportadoras ortogonais [4]. A duração de cada símbolo é  $NT_s = T_{sym}$ , devido à conversão série/paralelo, onde  $T_s$  é o tempo de símbolo anterior à conversão e  $T_{sym}$  é o tempo de símbolo posterior à conversão [4]. Denotando o l-ésimo símbolo OFDM com a k-ésima subportadora  $f_k$  como  $\psi_{l,k}(t)$  [4]:

$$\psi_{l,k}(t) = \begin{cases} e^{j2\pi f_k(t-lT_{sym})}, & 0 < t \leq T_{sym} \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases} \quad (1)$$

Denotando  $X_l[k]$  como o l-ésimo símbolo transmitido pela k-ésima subportadora,  $l = 0, 1, 2, \dots, \infty, k = 0, 1, 2, \dots, N - 1$  [4], o sinal OFDM no domínio do tempo pode ser representado da seguinte maneira [4] :

$$x_l(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{j2\pi f_k(t-lT_{sym})} \quad (2)$$

O sinal OFDM da Equação (2) pode ser amostrado em  $t = lT_{sym} + nT_s$  com  $T_s = T_{sym}/N$  e  $f_k = k/T_{sym}$ , levando ao correspondente símbolo OFDM de tempo discreto como [4]:

$$x_l[n] = \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{j2\pi kn/N}, \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (3)$$

É possível notar que a equação (3) é a IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*) de N pontos de um sinal PSK ou QAM e pode ser computada com o algoritmo de IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) [4].

O sinal OFDM recebido é, considerando o canal ideal [4]:

$$y_l(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{j2\pi f_k(t-lT_{sym})}, \quad lT_{sym} < t \leq lT_{sym} + nT_s \quad (4)$$

E o sinal transmitido em cada subportadora pode ser demodulado usando a expressão abaixo. Esta expressão permite isolar cada subportadora e, pela ortogonalidade entre elas, é possível demodular o conteúdo de uma subportadora sem a interferência das outras componentes do sinal [4]:

$$\begin{aligned} \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi f_k t} e^{-j2\pi f_i t} dt &= \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi \frac{k}{T_{sym}} t} e^{-j2\pi \frac{i}{T_{sym}} t} dt \\ &= \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi \frac{(k-i)}{T_{sym}} t} dt \\ &= \begin{cases} 1, & \forall k = i, k \in \mathbb{Z} \\ 0, & \text{caso contrario} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

Na Equação (5) é provada a possibilidade de isolar uma subportadora (subíndice k) para demodular seu conteúdo e remover outras subportadoras e seu conteúdo, multiplicando a portadora sob análise pela exponencial complexa conjugada (subíndice i) e realizando a integração do sinal em um período de símbolo. O resultado será igual a 1 caso os subíndices i e k forem iguais, ou seja, a subportadora sob análise tem a mesma componente de frequência que a exponencial complexa conjugada. Assim é possível isolar cada subportadora dentro do sinal recebido somente alterando o subíndice i, se as subportadoras forem ortogonais entre si.

Assim, aplicando a Equação (5) no sinal recebido para extrair o conteúdo de cada subportadora, baseado na ortogonalidade entre cada subportadora individual [4]:

$$\begin{aligned}
Y_l[k] &= \frac{1}{T_{sym}} \int_{-\infty}^{\infty} y_l(t) e^{-j2\pi f_i(t-lT_{sym})} dt \\
&= \frac{1}{T_{sym}} \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] e^{j2\pi f_k(t-lT_{sym})} \right] e^{-j2\pi f_i(t-lT_{sym})} dt \\
&= \sum_{k=0}^{N-1} X_l[k] \left[ \frac{1}{T_{sym}} \int_0^{T_{sym}} e^{j2\pi(f_k-f_i)(t-lT_{sym})} dt \right] = X_l[k]
\end{aligned} \tag{6}$$

Amostrando os valores do sinal recebido, conforme a Equação (4), em  $t = lT_{sym} + nT_s$  [4], a integração no processo de demodulação da Equação (6) pode ser representada por [4]:

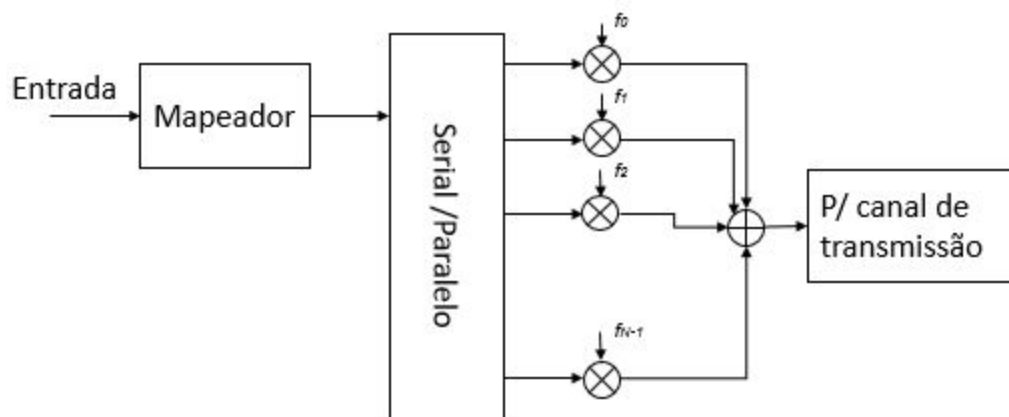
$$\begin{aligned}
Y_l[k] &= \sum_{n=0}^{N-1} y_k[n] e^{-j2\pi kn/N} \\
&= \sum_{n=0}^{N-1} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} X_l[i] e^{j2\pi in/N} \right\} e^{-j2\pi kn/N} \\
&= \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} \sum_{i=0}^{N-1} X_l[i] e^{j2\pi(i-k)n/N} = X_l[k]
\end{aligned} \tag{7}$$

De fato, a Equação (7) é a DFT de N pontos do sinal recebido e pode ser eficientemente computada usando o algoritmo de FFT [4].

#### 4.1.2. Esquema de transmissão e recepção OFDM

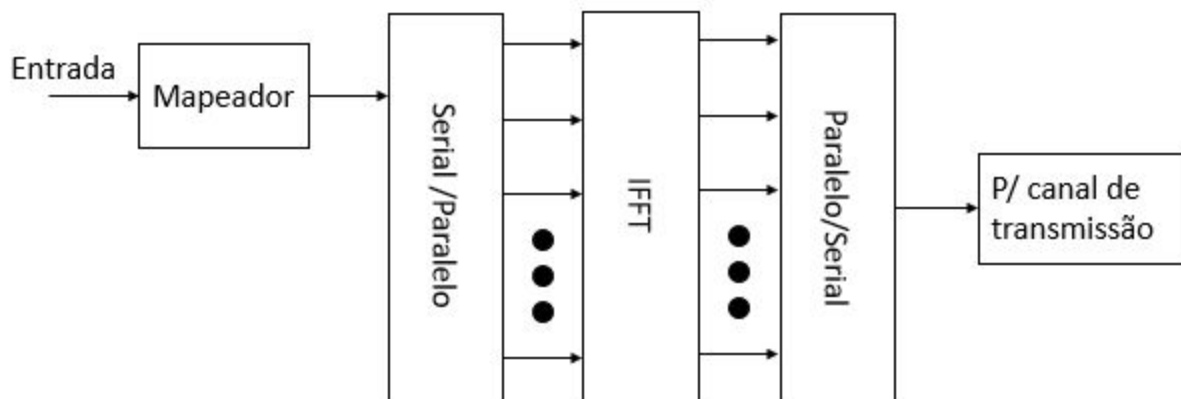
A imagem abaixo ilustra o esquema de transmissão:





**Figura 1:** Esquema de transmissão OFDM sem IFFT.

A transmissão também pode ser feita utilizando um bloco que realiza a IDFT (*Inverse Discrete Fourier Transform*) de cada sinal paralelo de entrada, no lugar da multiplicação por senoides de diferentes frequências, com a função IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) [4]. Tal esquema está ilustrado abaixo:



**Figura 2:** Esquema de transmissão OFDM com IFFT.

Os diagramas de blocos de recepção para cada esquema de OFDM estão representados abaixo [4]:

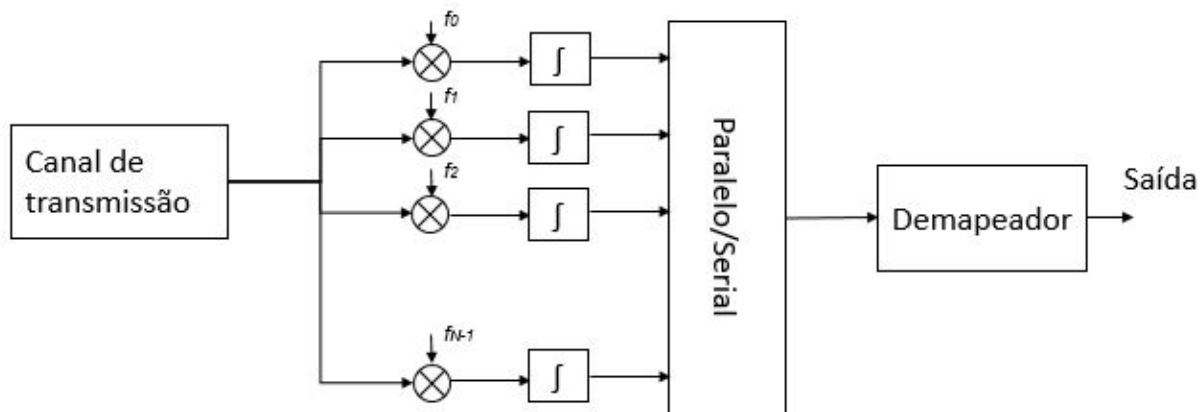


Figura 3: Esquema de recepção OFDM sem FFT.

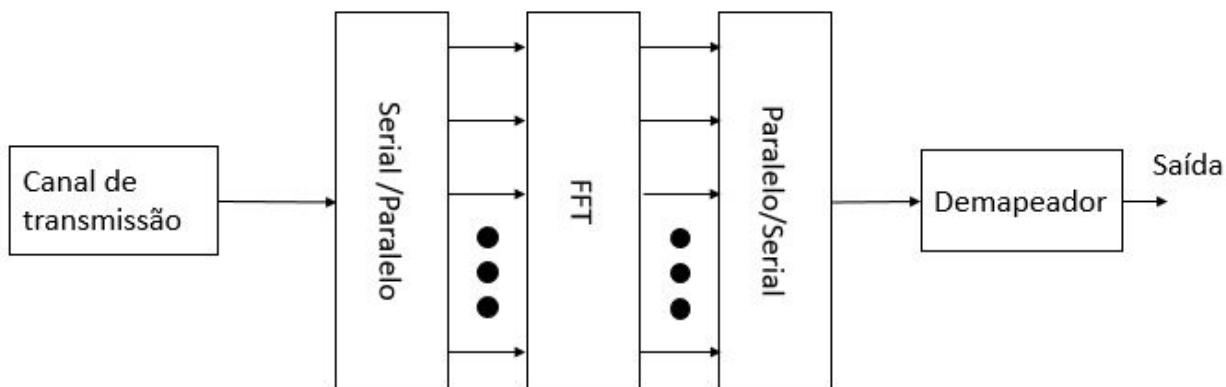
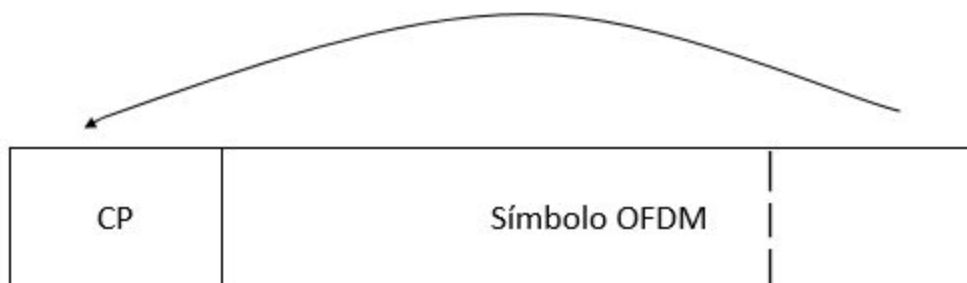


Figura 4: Esquema de recepção OFDM com FFT.

#### 4.1.3. Prefixo Cíclico (CP)

Para lidar com canais multipercurso, é comum utilizar uma técnica chamada de prefixo cíclico ou *Cyclic Prefix* (CP) em inglês. O prefixo cíclico consiste em copiar as últimas amostras de um símbolo OFDM e colocá-las na frente do símbolo [4]. A figura abaixo demonstra o símbolo com o prefixo cíclico:



**Figura 5:** Símbolo OFDM com prefixo cíclico.

Se o tempo do prefixo cíclico for maior que a maior duração do canal, mesmo que haja a sobreposição de um trecho do símbolo, ao remover a informação do prefixo cíclico, se obtém toda a informação do símbolo no receptor, sem interferência intersimbólica [4]. Poderiam ser utilizadas outras técnicas como não transmitir nada no intervalo de tempo correspondente ao maior atraso do canal, ou transmitir somente uma informação fixa como “1” ou “0” no período, mas copiar um pedaço da informação codificada é mais eficaz, pois é mantida a continuidade do sinal [4].

#### 4.2. Motivação da aplicação de filtros

Como será mostrado no capítulo 5, o sinal OFDM gera relevantes emissões fora da banda. Assim, para ter vários canais adjacentes transmitindo em OFDM (como é o caso quando temos várias operadoras realizando transmissões simultâneas na largura de banda licenciada para o LTE, por exemplo), é necessário adicionar bandas de guarda, o que reduz o número de subportadoras que levam informação efetiva [4].

Comercialmente, as operadoras de telefonia móvel compram uma faixa do espectro para seus sistemas e estão limitadas a operarem estritamente dentro desta faixa, pois, logo após os limites da faixa comprada, há outra operadora ou aquela banda é usada para outros fins, o que pode gerar conflitos econômicos e políticos [9]. Desta maneira, controlar a faixa de ocupação no espectro se torna um desafio quando se quer utilizar a faixa comprada ao máximo.

Uma solução é a utilização de filtros para modelar a ocupação de banda e permitir que se aproveite ao máximo cada Hz do seu espectro licenciado [9]. As tecnologias de filtragem dos sinais evoluem cada vez mais e permitem controlar a ocupação de banda com uma distorção cada vez menor, o que é muito valorizado quando cada bit e cada Hz têm um valor agregado enorme, visto que os usuários são cobrados pela transmissão de dados e a operadora tem como uma limitação a quantidade de largura de banda permitida [9].

No capítulo 5 será estudada a relação entre a resposta do filtro, ou seja, o quanto o filtro reduz a ocupação de banda, e a taxa de erro de bit, além da quantidade de processamento exigido para a aplicação de tal filtro (medida através do tempo entre a entrada e saída dos bits no sistema).

### 4.3. F-OFDM

A F-OFDM tem o mesmo princípio de operação que a OFDM, a diferença é a aplicação de um filtro de transmissão para modelar a forma de onda e reduzir a banda ocupada por canal (conjunto de subportadoras), o que diminui a potência do sinal fora da banda desejada (também conhecido como emissões fora da banda, do inglês *Out of Band Emissions*). Também é possível aplicar pré-codificação DFT ou outra técnica para redução da PAPR (*Peak to Average Power Ratio*) [10]. O diagrama de blocos da F-OFDM está representado abaixo:



**Figura 6:** Esquema de transmissão e recepção F-OFDM.

### 4.4. FBMC

A FBMC é um esquema de multiplexação parecido com a OFDM e consiste em filtrar cada subportadora para melhor eficiência espectral. A modulação *Offset-QAM* (OQAM) é utilizada para remover a ICI (*InterCarrier Interference*). Para melhor supressão dos lóbulos laterais, a FBMC exige o uso de filtros longos, o que decresce a eficiência de transmissão no caso de transmissão de rajadas curtas [10].

#### 4.4.1 Offset-QAM

A modulação OQAM consiste em atrasar o sinal em quadratura em meio período de símbolo. Desta maneira, é possível controlar a interferência das subportadoras adjacentes com a mesma quadratura, partindo do ponto que o formato do sinal é simétrico [11].

A figura abaixo demonstra o esquema em fase e quadratura do OQAM:

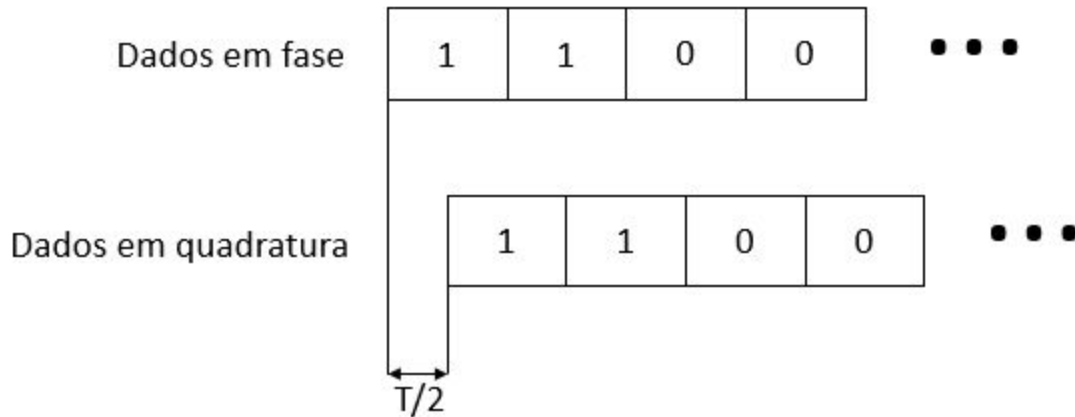


Figura 7: Esquema em fase e quadratura do OQAM.

#### 4.4.2. Modulação e demodulação FBMC

A semelhança da FBMC com a OFDM se dá justamente na ortogonalidade entre as subportadoras, o que garante uma matemática parecida, mudando somente a aplicação da modulação OQAM e do filtro de protótipo nos sinais paralelos.

Mantendo a mesma notação utilizada para a OFDM, o sinal FBMC pode ser representado no domínio do tempo como [12]:

$$x_l(t) = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{k=0}^{N-1} j^{l+k} X_l[k] p_t(t - lT_{sym}) e^{j2\pi f_k(t - lT_{sym})} \quad (8)$$

Onde  $p_t(t)$  é o filtro de protótipo que é descrito como [12]:

$$p_t(t) = H_0 + 2 \sum_{n=1}^{K-1} H_n \cos\left(2\pi \frac{f_n t}{K}\right) \quad (9)$$

Onde  $K$  é o fator de sobreposição (*overlapping*) e  $H_n$  são os coeficientes do filtro.

Seguindo os mesmos passos feitos anteriormente para o sinal OFDM no sinal FBMC  $x_l(t)$ , O sinal FBMC recebido pode ser escrito como:

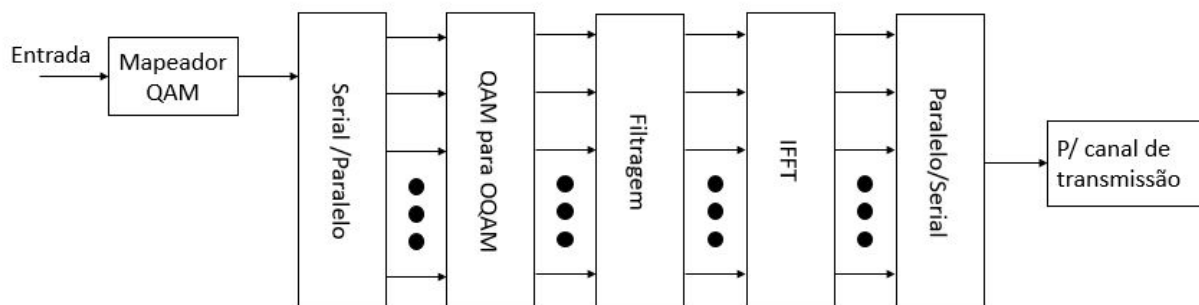
$$y_l(t) = \sum_{k=0}^{N-1} j^{l+k} X_l[k] p_t(t - lT_{sym}) \quad (10)$$

Assim, basta aplicar um filtro que corrija o efeito do filtro de transmissão e demapear o OQAM em QAM que obtemos os símbolos QAM originais  $X_l[k]$ .

A IDFT e DFT também podem ser utilizadas na transmissão e recepção do sinal [12].

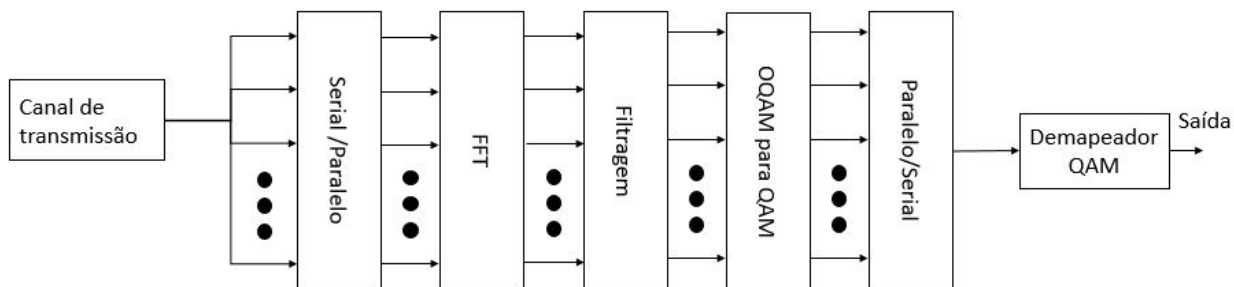
### 4.4.3. Esquema de transmissão e recepção FBMC

A imagem abaixo ilustra o esquema de transmissão FBMC [12]:



**Figura 8:** Esquema de transmissão FBMC.

O esquema de recepção [12]:



**Figura 9:** Esquema de recepção FBMC.

## 5. Desenvolvimento

O SystemVue é um software de alto nível que permite a criação e simulação de cenários de sistemas de comunicação. A vantagem de utilizá-lo é a facilidade de começar as simulações e a obtenção dos resultados. Mas, como o software é de alto nível, nem tudo é personalizável e nem todos os blocos podem ser inseridos no sistema de maneira simples.

O esquema de montagem dos sistemas segue a mesma ideia para a OFDM, F-OFDM e FBMC, mudando somente o bloco que faz a multiplexação em frequência da FBMC para a OFDM e adicionando um filtro no caso da OFDM para a F-OFDM. Assim, o formato geral dos esquemas será explicado baseado na OFDM e os detalhes dos blocos específicos serão apresentados posteriormente.

## 5.1 Esquema de simulação geral

A figura abaixo mostra o esquema de simulação do transmissor. Transmissor e receptor estavam ligados na simulação, mas aqui eles foram separados para facilitar a apresentação do esquema.

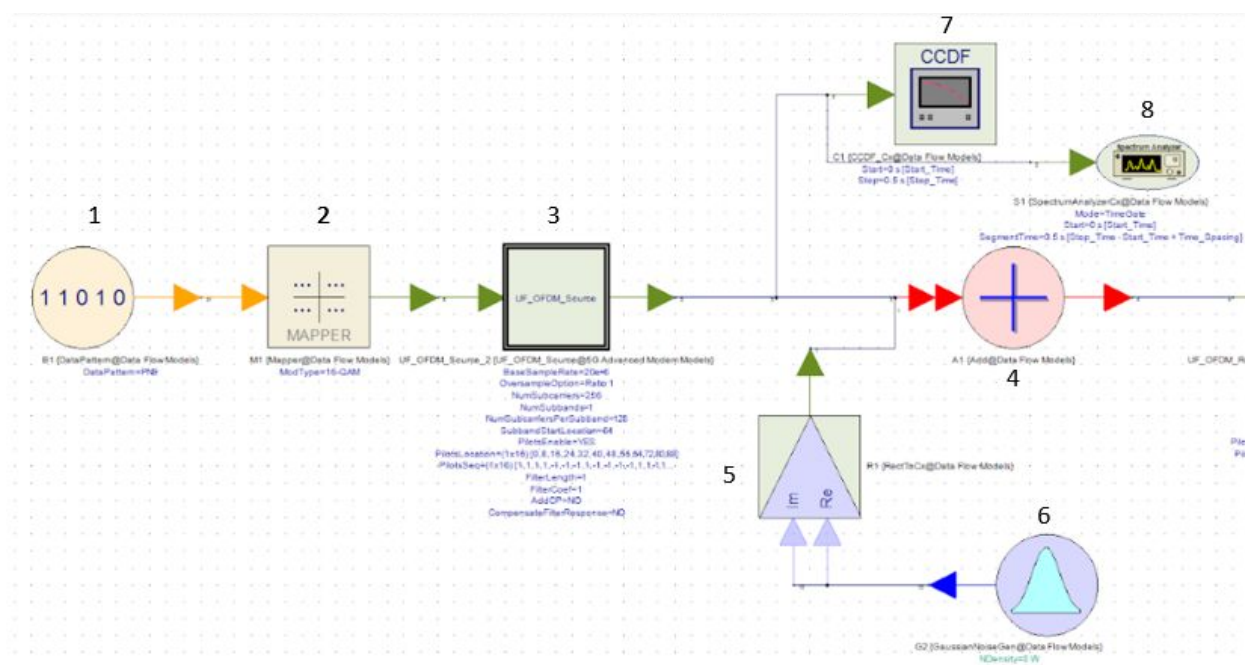


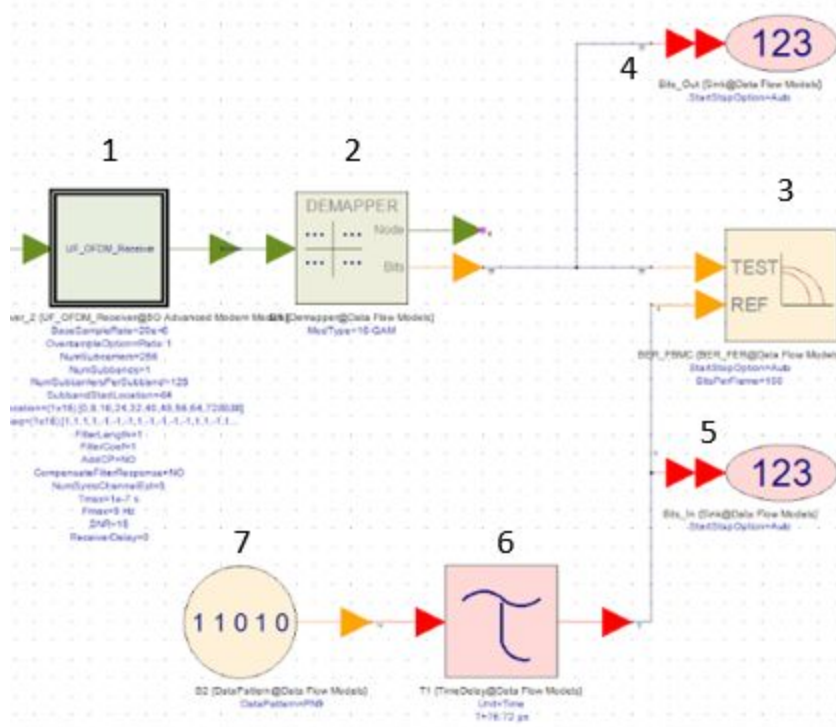
Figura 10: Esquema de transmissão no SystemVue.

Abaixo será explicado cada bloco de acordo com a numeração da Figura 10.

1. Bloco gerador de bits: Este bloco pode gerar vários tipos de padrão de bits. Na simulação foi usado um PN9 (*Pseudo Noise 9* ou PRBS9), este 9 indica o número de bits por palavra.
2. Bloco mapeador de bits: Este bloco mapeia os bits de entrada em sinais complexos. Foi utilizado o 16-QAM.
3. Bloco gerador do esquema de multiplexação em frequência: Este bloco realiza a divisão dos bits entre as subportadoras, aplica os pilotos (sinais conhecidos que são usados para estimar o canal), aplica o prefixo cíclico e outras operações para a geração do sinal.
4. Somador: Este bloco realiza a junção dos sinais de entrada.
5. Bloco conversor de retangular para polar.
6. Fonte de ruído gaussiano AWGN com densidade de potência variável aplicado na parte real e imaginária do canal.

7. Bloco calculador de CCDF (*Complementary Cumulative Distribution Function* ou função de distribuição cumulativa complementar): Este bloco realiza o cálculo e permite gerar um gráfico de porcentagem por potência do sinal instantâneo em relação à média. Assim, é possível avaliar o quão distante está o pico do sinal da média (PAPR ou *Peak to Average Power Ratio*) e a escala dinâmica do sinal (importante no projeto do amplificador) [13].
8. Bloco analisador de espectro: Este bloco permite avaliar o sinal em termos do espectro de frequência.

A figura abaixo ilustra o esquema de recepção:



**Figura 11:** Esquema de recepção no SystemVue.

Seguindo a numeração na figura.

1. Bloco receptor do esquema de multiplexação em frequência: Este bloco é responsável por converter o sinal paralelo em frequência em um sinal serial, além de aplicar o equalizador através da estimação de canal (considerando o canal ideal, estes parâmetros não tiveram efeito na simulação).
2. Bloco demapeador dos bits: Este bloco realiza o trabalho inverso do bloco mapeador e transforma o sinal complexo em bits.
3. Bloco calculador de taxa de erro de bits (BER ou *Bit Error Rate*): Este bloco compara os bits recebidos com um sinal de referência e retorna a taxa de erro de bits. Além de calcular a BER, este bloco controla o fluxo da varredura e geração de



bits quando se varia o ruído do canal ou outro parâmetro do canal. Desta maneira, ele consegue reter a geração dos bits até atingir o número máximo de bits escolhidos pelo usuário, ou pular para o próximo passo, caso o sistema esteja errando numa taxa constante após um determinado número de bits testados.

4. Os blocos 4 e 5 são ralos de dados (utilizados para guardar os dados inseridos neles) e foram usados para sincronização dos dados de saída do sistema com os dados de referência.
5. Já explicado acima.
6. Bloco de atraso temporal: Como o bloco 7 tem uma geração instantânea e os dados de entrada do sistema levam um tempo de processamento para chegar até o bloco da BER, é necessário aplicar um atraso entre os dados de entrada e os dados de referência para o cálculo da BER.
7. Bloco gerador de bits: Este bloco possui os mesmos parâmetros que o bloco de entrada do transmissor, e como tem a mesma raiz que o bloco de entrada, os bits gerados são iguais aos bits gerados no transmissor.

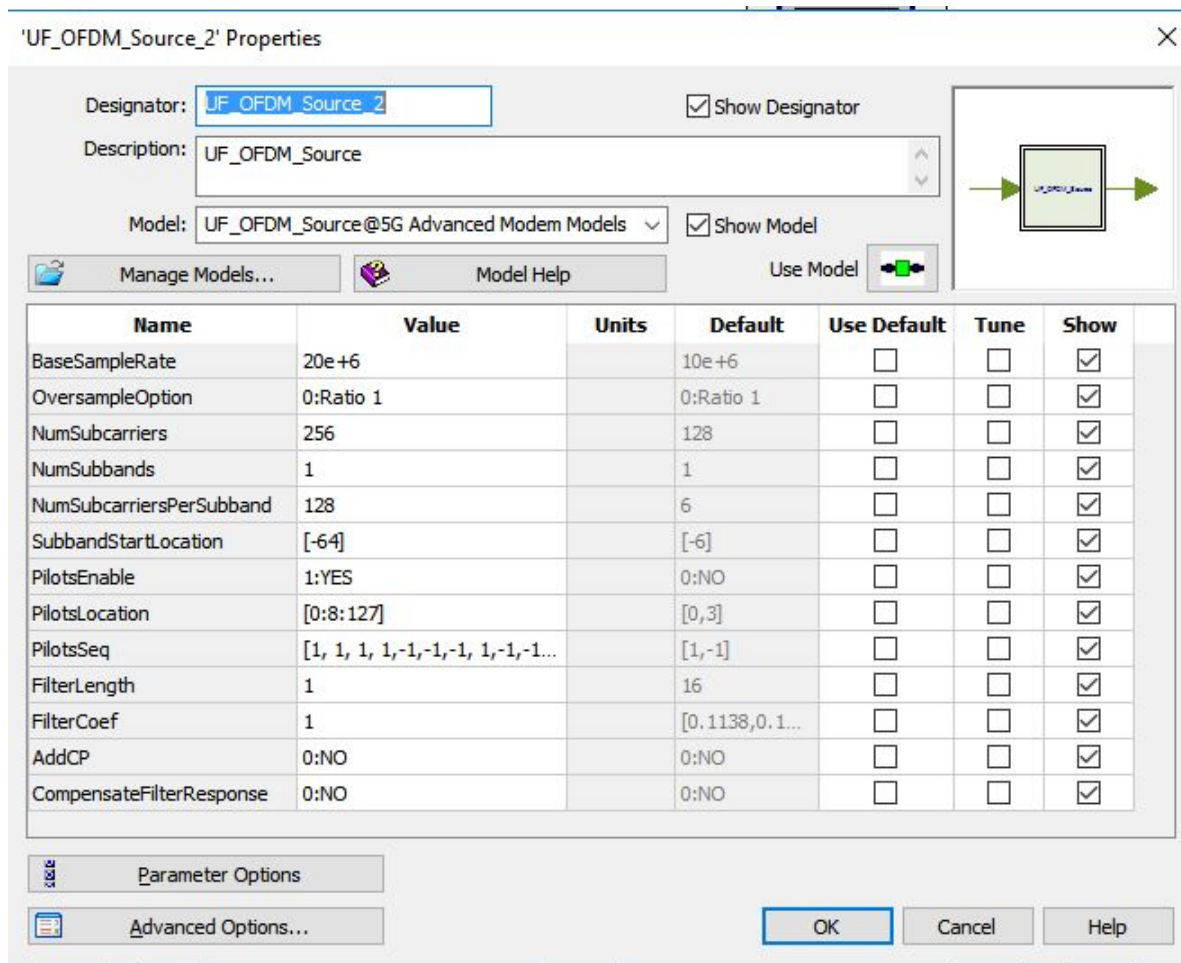
Então, o esquema acima permite qualificar os sinais em termos de:

- Espectro de frequência: Para qualificá-los em termos de largura de banda ocupada, emissões fora da banda, entre outras medidas.
- Proporção de potência entre pico e média (PAPR ou *Peak to Average Power Ratio*): Para avaliar qual a escala dinâmica do sistema e dimensionar o amplificador.
- Atraso entre entrada e saída de bits: Para medir o tempo de processamento dos dados em cada técnica de multiplexação.
- BER: Para medir a robustez do sistema em relação ao ruído do canal.

## 5.2 Parâmetros dos multiplexadores

Nesta seção serão apresentados os parâmetros de cada bloco multiplexador e o motivo da escolha de alguns dos parâmetros. Os parâmetros não explicados foram mantidos padrão do sistema, pois alguns são aplicados ao equalizador para compensar os efeitos do canal com multipercurso e seletivo em frequência e outros não são parâmetros interessantes para serem alterados nesta análise. Como o canal utilizado somente aplica ruído ao sinal, alguns parâmetros foram testados e não alteraram as características do sinal ou fazem com que o sistema se perca, ao aplicar uma compensação ou distorção exagerada.

Os parâmetros de transmissão da OFDM estão abaixo:



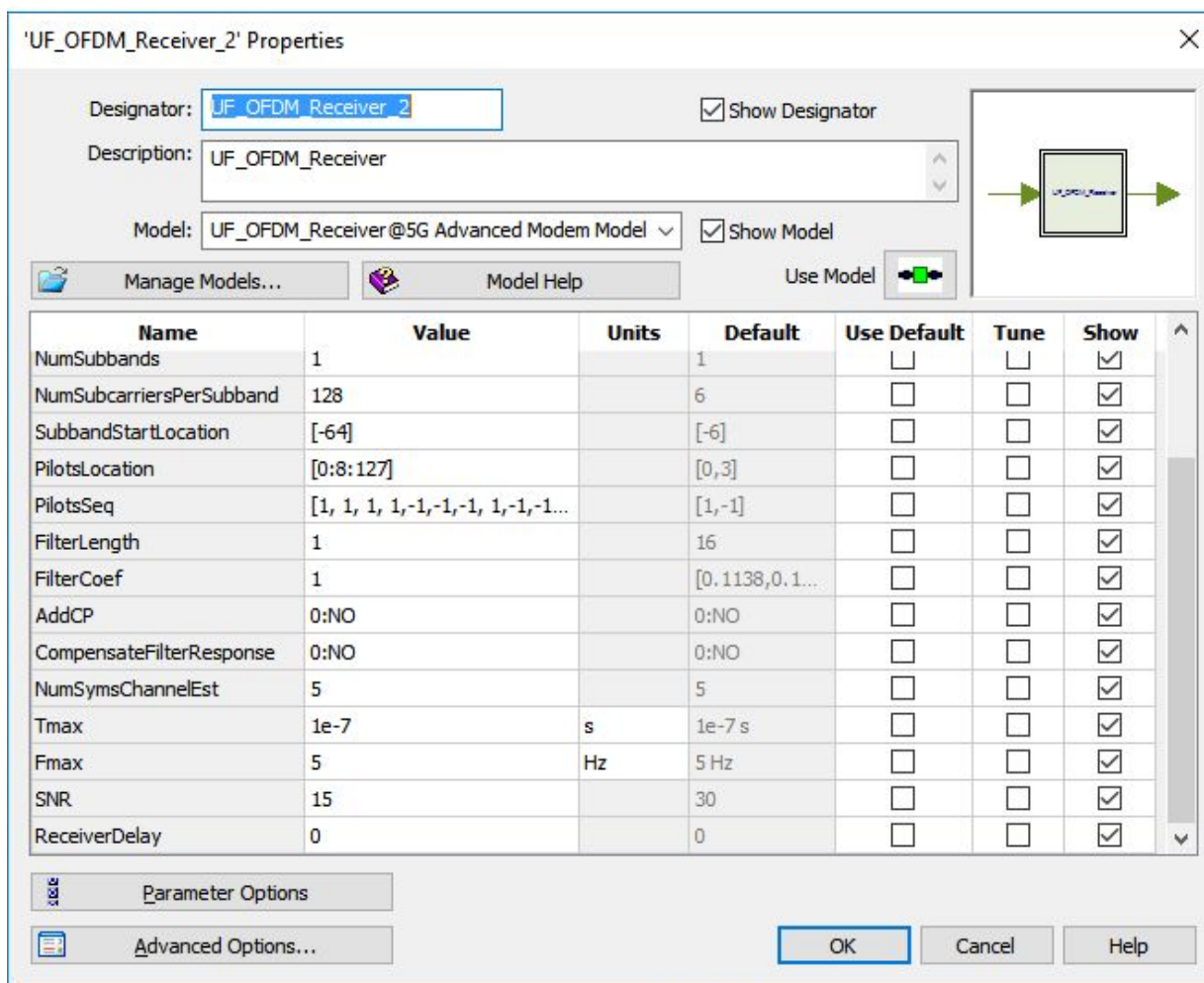
**Figura 12:** Parâmetros de transmissão da ofdm.

O bloco “UF\_OFDM” (*Universal Filtered OFDM* ou OFDM Filtrada Universal) foi utilizado por ser o mais geral na geração da OFDM. E com tamanho de filtro e coeficiente iguais a 1, geramos somente a OFDM pura.

- BaseSampleRate: Taxa de amostragem base para os dados de entrada.
- OversampleOption: Proporção de sobreamostragem.
- NumSubcarriers: Número do total de subportadoras.
- NumSubbands: Determina o número de canais transmitidos.
- NumSubcarriersPerSubband: Número efetivo de subportadoras por canal.
- SubbandStartLocation: Posição dentro do NumSubcarriers para alocar as subportadoras determinadas em NumSubcarriersPerSubband.
- PilotEnable: Habilita a inserção de pilotos nos símbolos (servem para compensar os efeitos do canal).
- PilotsLocation: Posição dos pilotos no símbolo.
- PilotsSeq: Sequência de bits dos pilotos.
- FilterLength: Comprimento do filtro.

- FilterCoef: Coeficientes do filtro.
- AddCP: Inserção ou não de prefixo cíclico.
- CompensateFilterResponse: Compensação da resposta do filtro.

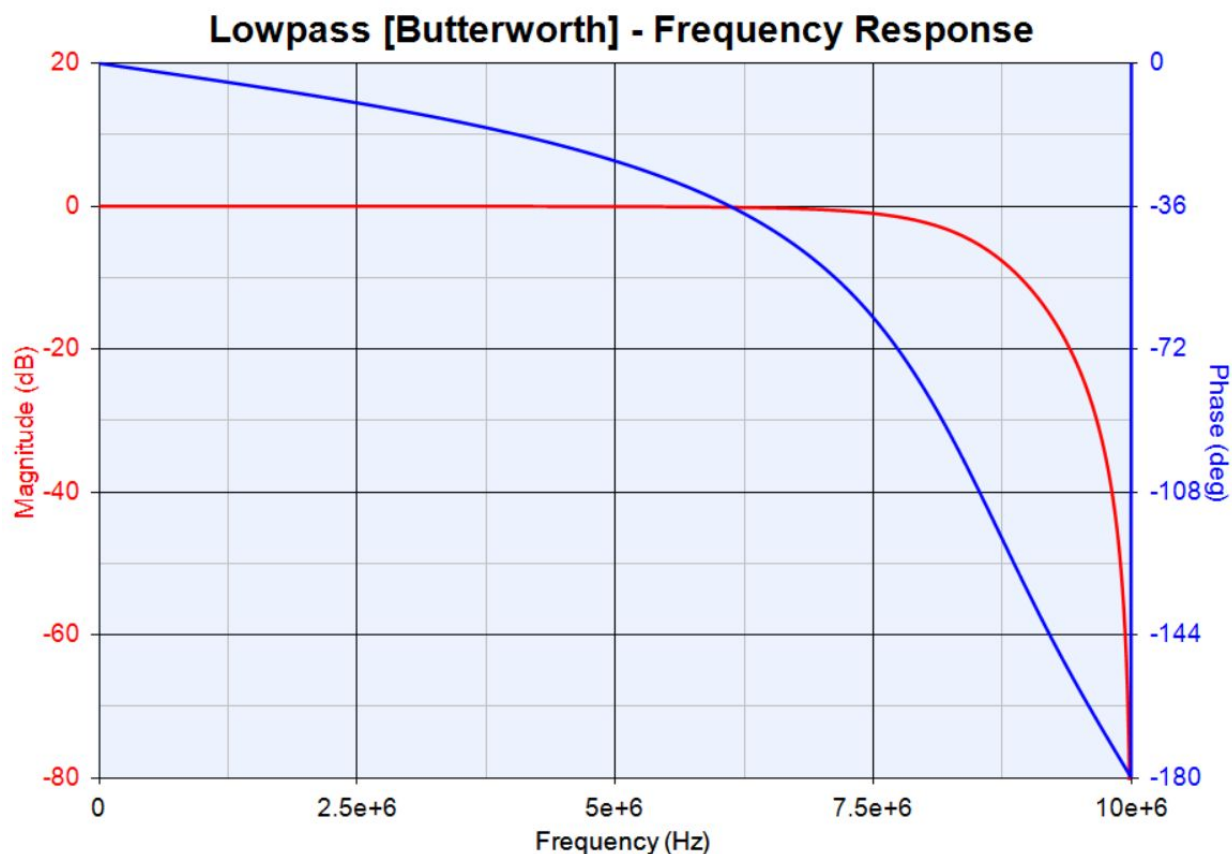
O receptor da OFDM tem os mesmos parâmetros que o transmissor, mas com a adição de alguns outros. A imagem de tais parâmetros está abaixo:



**Figura 13:** Parâmetros de recepção da OFDM.

- NumSymsChannelEst: Número de símbolos para estimação de canal.
- Tmax: Tempo máximo de delay no canal.
- Fmax: Frequência máxima de desvio Doppler.
- SNR: Relação sinal ruído (ou *Signal to Noise Ratio*) aproximada.
- ReceiverDelay: Atraso na recepção.

Como na F-OFDM somente aplicamos um filtro na saída da OFDM, abaixo está representado o filtro aplicado na saída e recepção (para compensação do filtro de transmissão).

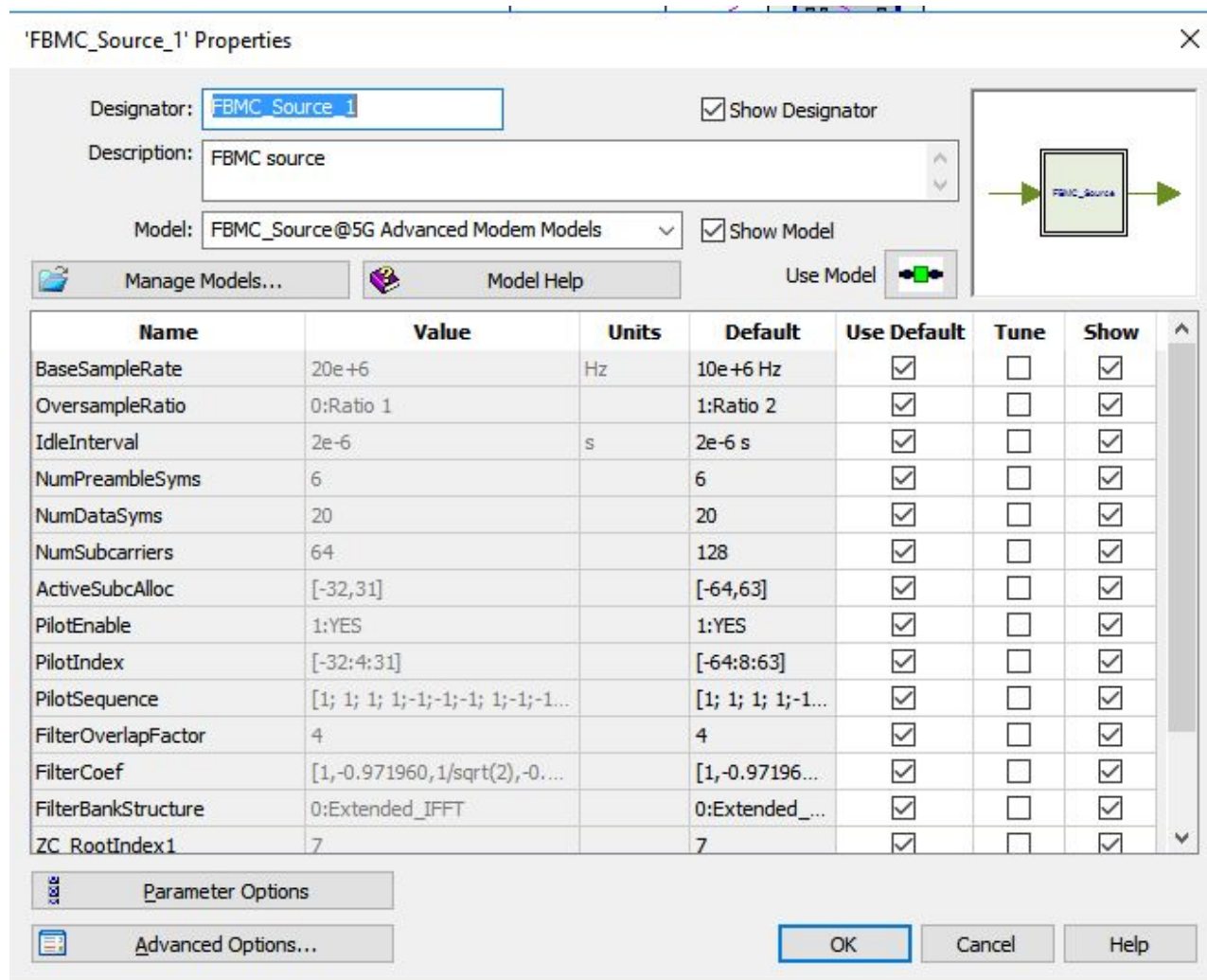


**Figura 14:** Resposta em frequência e fase do filtro IIR aplicado à F-OFDM.

Foram testados alguns filtros com resposta IIR (*Infinite Impulse Response* ou Resposta ao Impulso Infinita) e FIR (*Finite Impulse Response* ou Resposta ao Impulso Finita), mantendo a mesma largura de banda passante. E o filtro IIR Butterworth de ordem 2 foi o único que manteve o sistema íntegro somente aplicando-o na saída do transmissor e antes da entrada do receptor.

Agora partindo para os parâmetros de transmissão da FBMC.

Alguns parâmetros são os mesmos que o da OFDM, então serão apresentados somente os parâmetros diferentes.



**Figura 15:** Parâmetros de transmissão da FBMC.

- IdleInterval: Tempo ocioso entre os quadros.
- NumPreambleSyms: Número de símbolos no preâmbulo.
- NumDataSyms: Número de símbolos com dados.
- FilterOverlapFactor: Fator de sobreposição do filtro de cada subportadora.
- FilterBankStructure: Estrutura do banco de filtros.
- ZC\_RootIndex1/2 (o parâmetro ZC\_RootIndex2 não coube na imagem): Raiz da sequência Zadoff-Chu para o preâmbulo.

Abaixo estão os parâmetros do receptor FBMC:

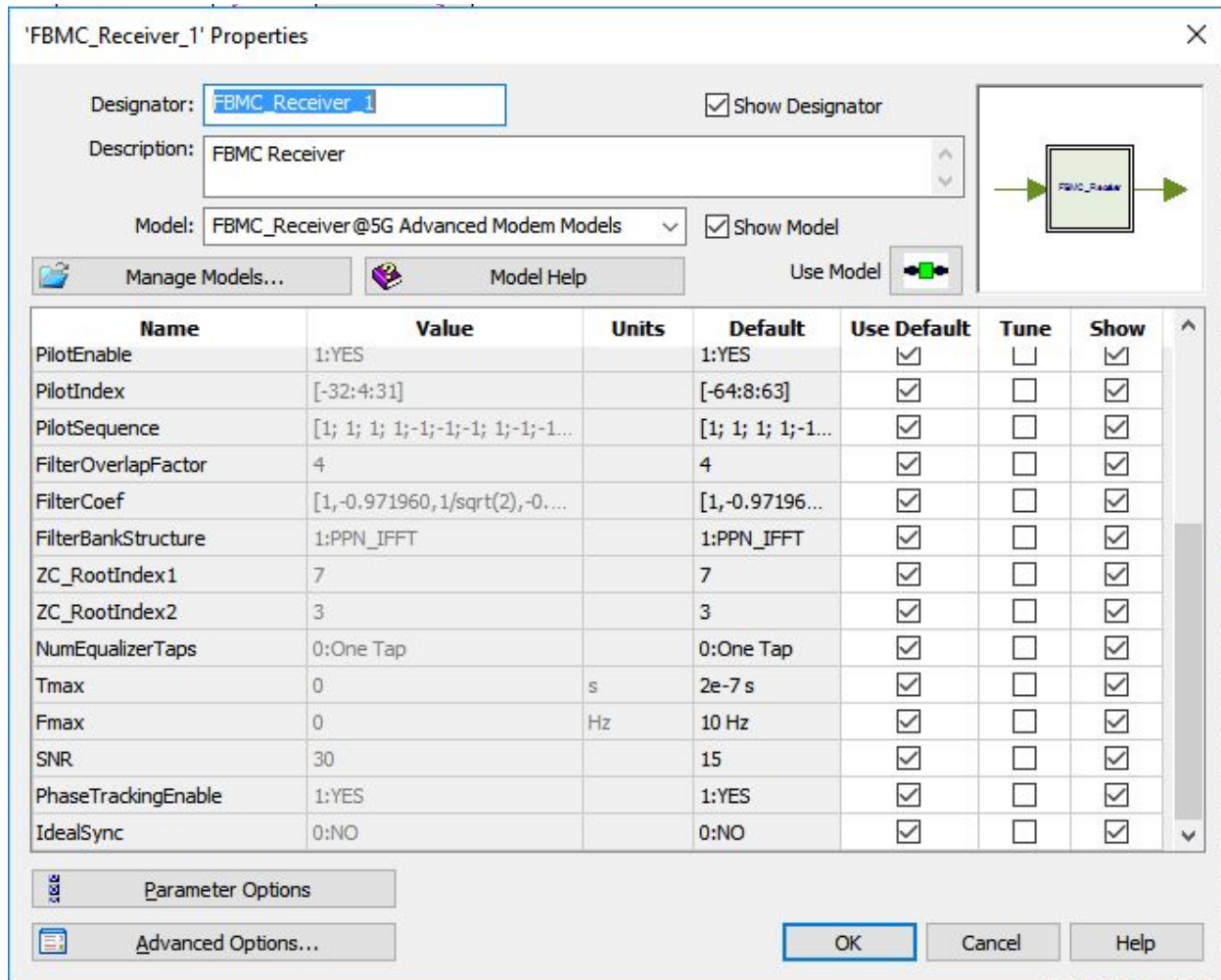


Figura 16: Parâmetros de recepção da FBMC.

- NumEqualizarTaps: Número de coeficientes do equalizador utilizados para compensação de canal.
- PhaseTrackingEnable: Rastreamento de fase habilitado.
- IdealSync: Sincronização ideal.

Os parâmetros foram alterados entre a OFDM e FBMC para mantê-los o mais próximos possível e manter a comparação justa (a F-OFDM somente segue os parâmetros do OFDM).

O “BaseSampleRate” da OFDM foi de 20 MHz, alocando 256 subportadoras e utilizando somente 128 para gerar o sinal com a mesma faixa de frequência que a FBMC (com 10 MHz de taxa de amostragem, 128 subportadoras e proporção de sobreamostragem 2).

Os parâmetros relacionados com alocação das subportadoras e pilotos foram dimensionados para serem iguais (o formato de leitura de alguns vetores é diferente do



bloco UF\_OFDM para o bloco FBMC. “PilotsLocation” e “PilotIndex”, por exemplo). A sequência dos pilotos é igual para todos os blocos.

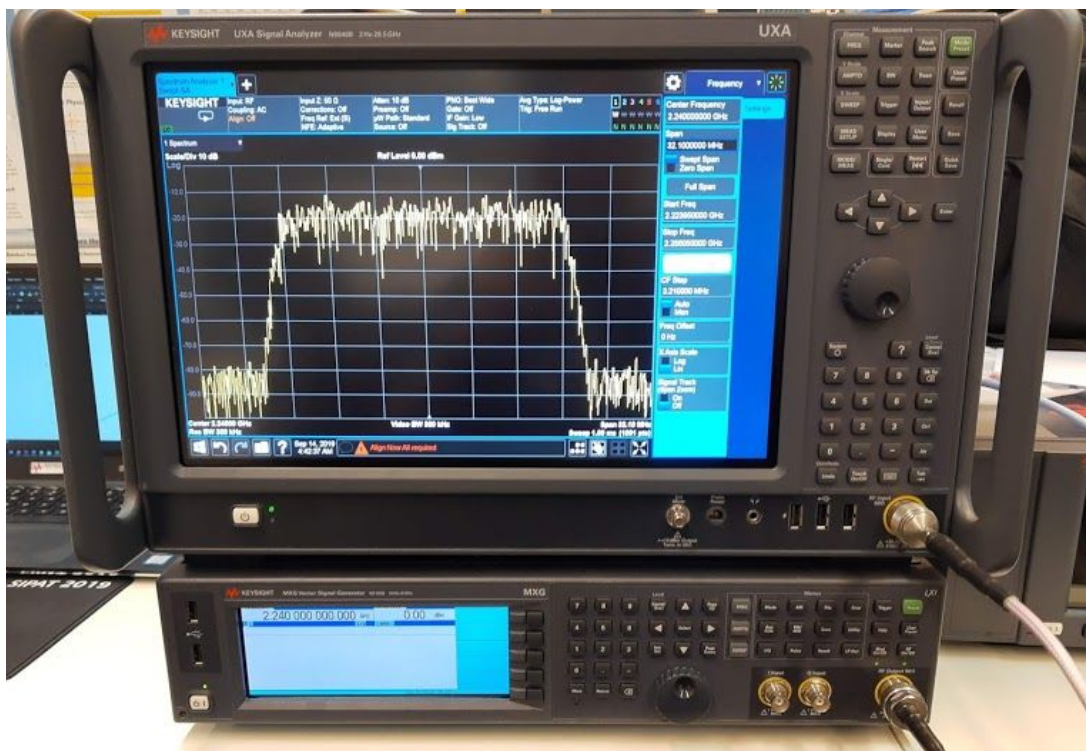
“SNR” foi mantida igual em todos os blocos de recepção e o valor 15 foi escolhido arbitrariamente.

Todos os esquemas foram simulados com tempo de duração de 500 ms e 20 Mbits (aproximadamente, pois o bloco da BER exerce controle sobre este número), sendo este um valor próximo do limite suportado pela alocação de memória do sistema. As simulações foram aplicadas duas vezes para cada esquema, uma com ruído de canal de 0 W para checar o funcionamento do esquema e outra com ruído de -90 dBm/Hz ou 1 nW/Hz para checar o funcionamento com uma densidade de potencia do ruído muito baixa. Em ambos os casos foi alcançada BER nula, considerando a BER mínima possível de um erro a cada 20 Mbits ou  $5e-8$ .

### 5.3. Desenvolvimento para medição dos sinais reais

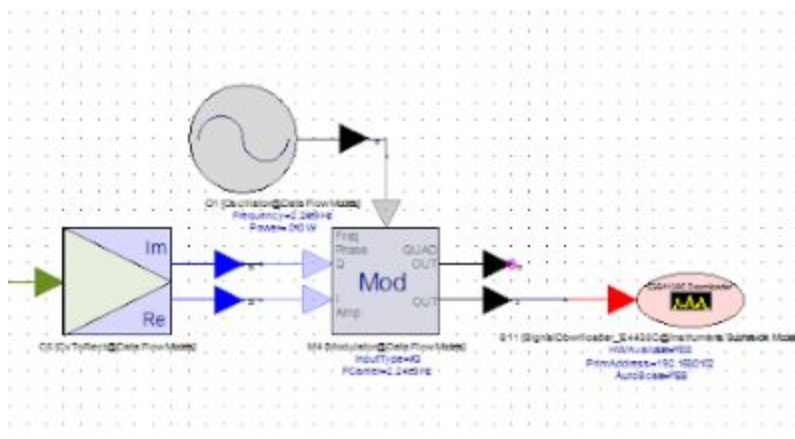
Nesta etapa do trabalho será apresentado o desenvolvimento para gerar e medir os sinais com instrumentos reais utilizando o SystemVue.

Os equipamentos utilizados para a geração e medição dos sinais foram um analisador de sinais UXA N9040B e um gerador de sinais vetoriais MXG N5182B conectados através de um cabo N(m) para N(m) de 60 cm e ligados ao computador por uma rede LAN. A foto da configuração está na figura abaixo:



**Figura 17:** Configuração para geração e medição dos sinais.

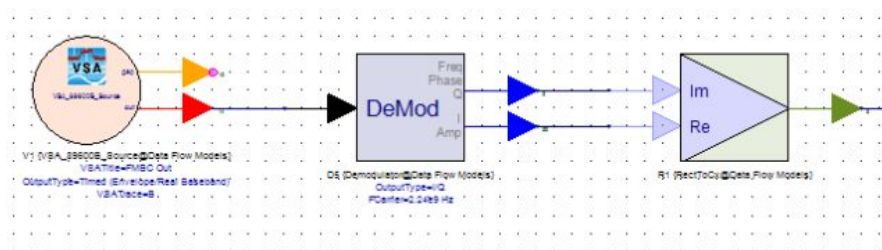
O esquema para enviar os dados ao gerador consiste em pegar o bloco transmissor do esquema de simulação e adicionar os blocos da figura abaixo na saída do transmissor:



**Figura 18:** Blocos para envio dos dados ao gerador.

Este trecho divide os dados complexos da saída do bloco de multiplexação em frequência em imaginário e real (IQ) e insere em um modulador que aplica uma portadora de 2,24 GHz e transforma o sinal IQ em um único sinal no domínio do tempo na saída que é enviada ao gerador.

Na recepção fazemos o processo contrário. A figura que ilustra o trecho adicionado à entrada do receptor para receber os dados reais está abaixo:



**Figura 19:** Blocos para recepção dos dados do analisador de sinais.

O bloco mais à esquerda cria um enlace entre o SystemVue e o VSA (*Vector Spectrum Analyzer*). O VSA é um software que captura os dados recebidos por um analisador de espectro ou osciloscópio e transforma o seu computador em um analisador de sinais, permitindo realizar análises complexas, demodulação, aplicação de equalizadores, etc.

Nesta etapa, somente foi possível demodular a FBMC, pois, para que simplesmente funcione, ou seja, para a operação mais simples o possível, a FBMC já é muito complexo e exige sincronização dos dados e tratamento para reverter a aplicação dos filtros em cada subportadora. Não houve tempo hábil para implementar tais etapas na OFDM.



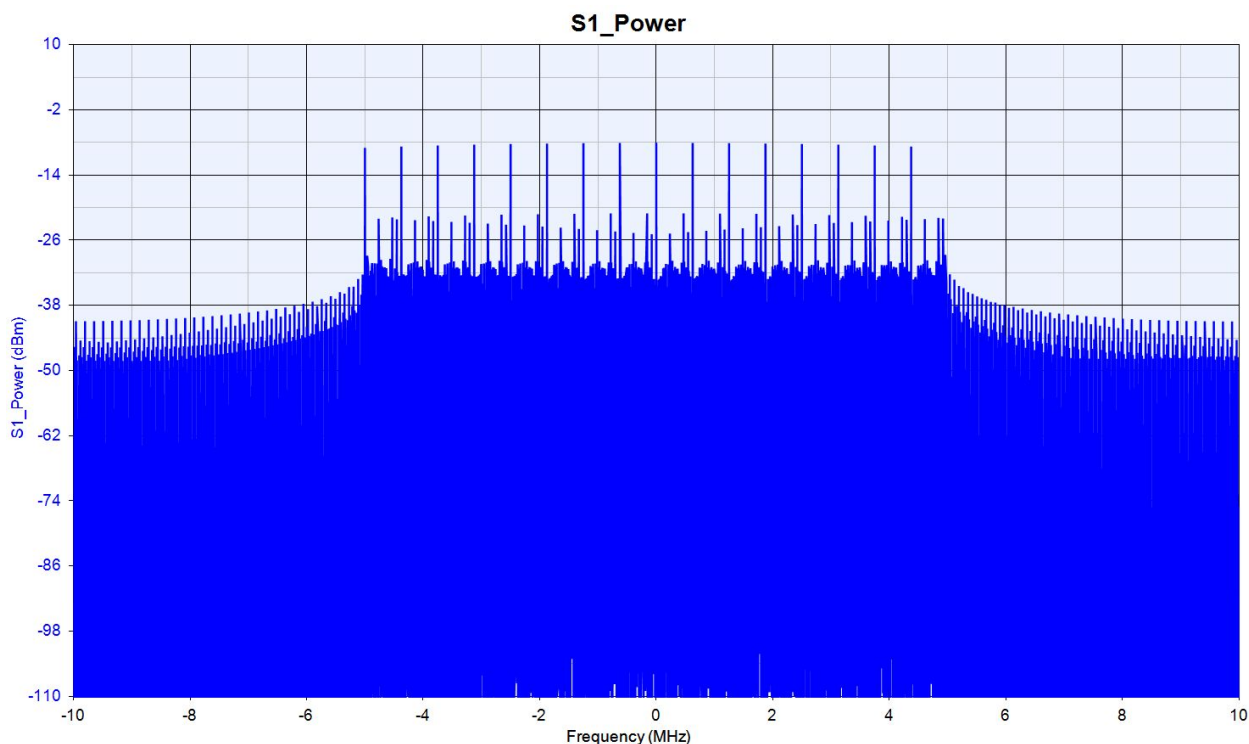
## 6. Resultados e discussão

### 6.1 Resultados e discussão sobre as simulações

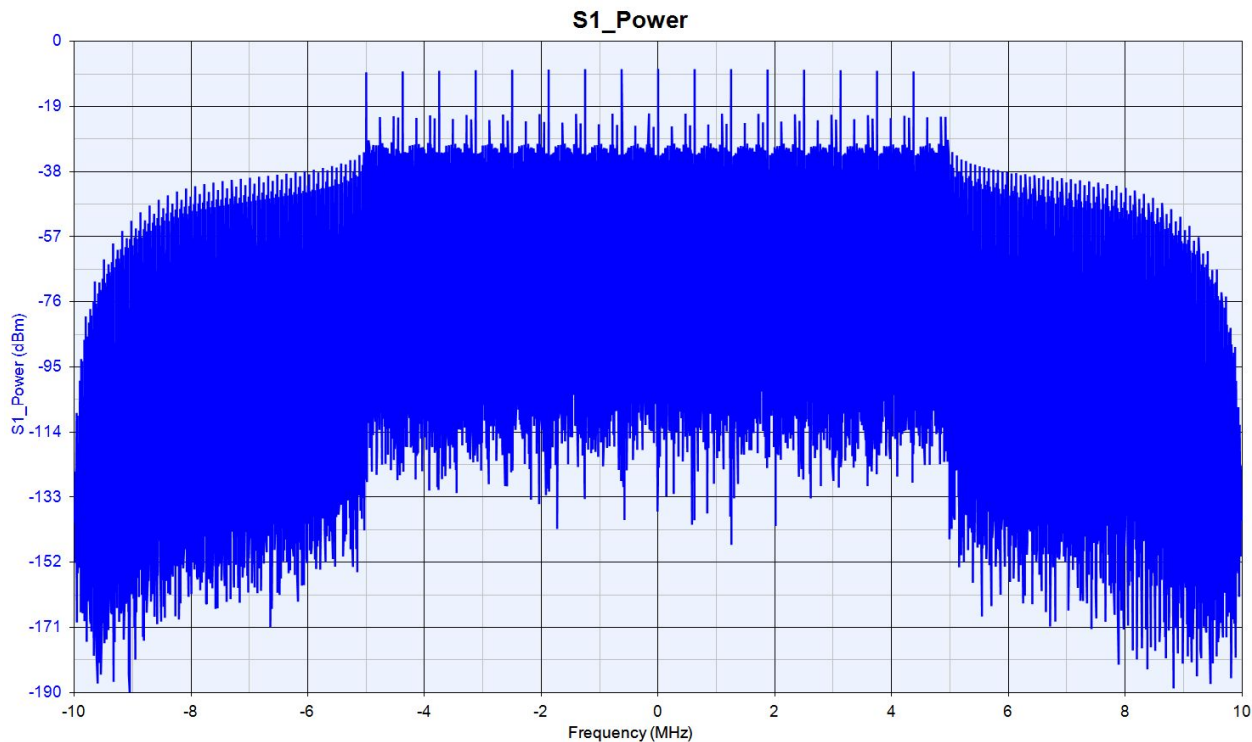
#### 6.1.1 Ocupação de banda

Os resultados a seguir foram obtidos a partir das simulações do SystemVue e ao final será apresentado o resultado para a geração e transmissão real da FBMC.

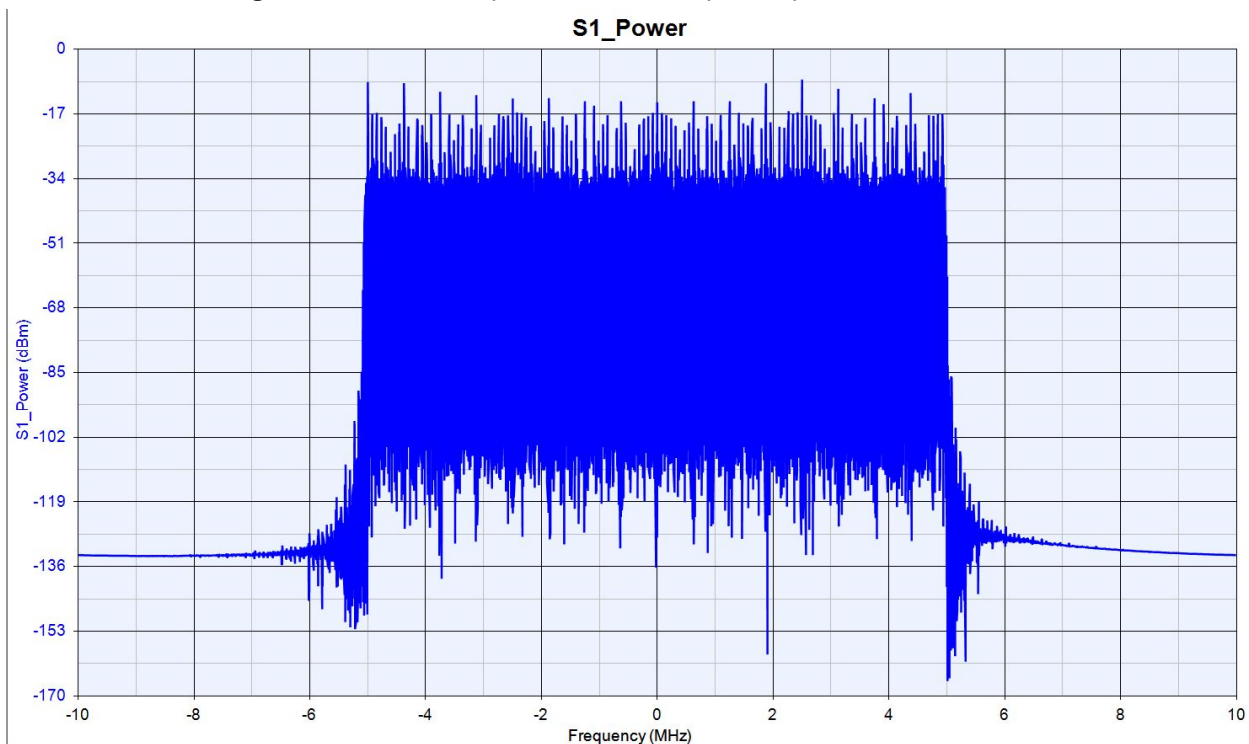
Iniciando a análise pelo espectro de frequência, abaixo temos o conteúdo de frequência da OFDM, F-OFDM e FBMC, respectivamente:



**Figura 17:** Gráfico de potência em dBm por frequência da OFDM.



**Figura 18:** Gráfico de potência em dBm por frequência da F-OFDM.



**Figura 19:** Gráfico de potência em dBm por frequência da FBMC.

A largura de banda de resolução foi de 2 Hz, todos os sinais foram gerados em banda base de -10 MHz até 10 MHz (20 MHz de largura) e o conteúdo de interesse do

sinal ficou entre -5 MHz e 5 MHz (10 MHz de largura). A ocupação de banda de geração e da banda de interesse foram definidos através dos parâmetros de taxa de amostragem, proporção de sobreamostragem e os parâmetros relacionados com as subportadoras (número de subportadoras, pilotos e a localização das subportadoras e pilotos).

Observando as formas de onda geradas através da OFDM e a gerada pela FBMC, vemos que a FBMC ocupa de maneira bem precisa os 10 MHz, com emissões fora da banda abaixo de -85 dBm e curto trecho de transição para atingir o piso de ruído. Esta característica permitiria alocar os canais com menores bandas de guarda, o que aumentaria a densidade de dados por faixa de frequência (um recurso supervalorizado em telecomunicações [9]).

Já a OFDM tem emissões fora da banda que começam em -38 dBm e caem lentamente à medida que se distanciam em frequência. Esta característica e o fato de ter uma fácil implementação fazem com que o uso de filtros de transmissão (F-OFDM) ou outras técnicas para reduzir as emissões fora da banda como o *Weighted Overlap and Add* (WOLA) (ou sobreposição ponderada e adição) [7] sejam consideradas para o uso da OFDM, visto que adicionar tais passos no sistema não aumentariam consideravelmente SUA complexidade.

A F-OFDM teve sua banda controlada pelo filtro de transmissão e podemos observar que já há uma redução nas emissões fora da banda, o que permitiria alocar os canais com menor banda de guarda, porém não tão próximos quanto na FBMC. Mesmo tendo um desempenho melhor na ocupação de banda, é preciso ponderar com os outros parâmetros para concluir se vale a pena ou não aplicar técnicas de redução de emissões fora da banda na OFDM.

### 6.1.2 Distribuição em potência

Partindo para análise da CCDF (*Complementary Cumulative Distribution Function* ou função de distribuição cumulativa complementar), primeiro é preciso entender o que é a CCDF. A CCDF nos permite avaliar a porcentagem do sinal ou o tempo que o sinal gasta em determinada potência em relação à média [13] através da determinação da função de distribuição de potência (PDF ou *Power Distribution Function*) em relação à média, o cálculo da função de distribuição cumulativa (CDF ou *Cumulative Distribution Function*), que indica a partir de qual ponto em potência está o conteúdo do sinal, e a função de densidade cumulativa complementar que é 1-CDF. A imagem abaixo representa as operações:

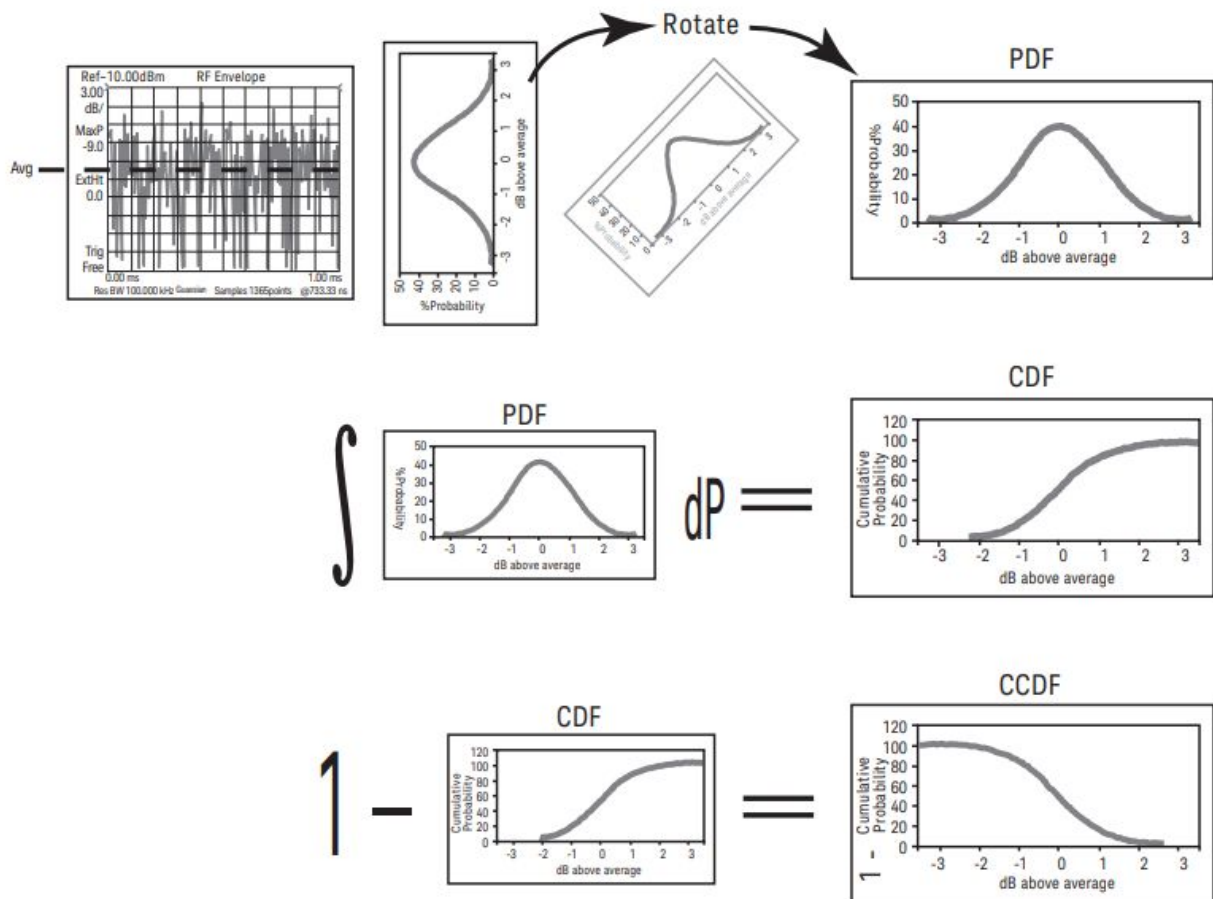


Figura 20: Passos para o cálculo da CCDF [13].

Seguindo a mesma ordem anterior, os gráficos de CCDF serão apresentado para OFDM, F-OFDM e FBMC, respectivamente.

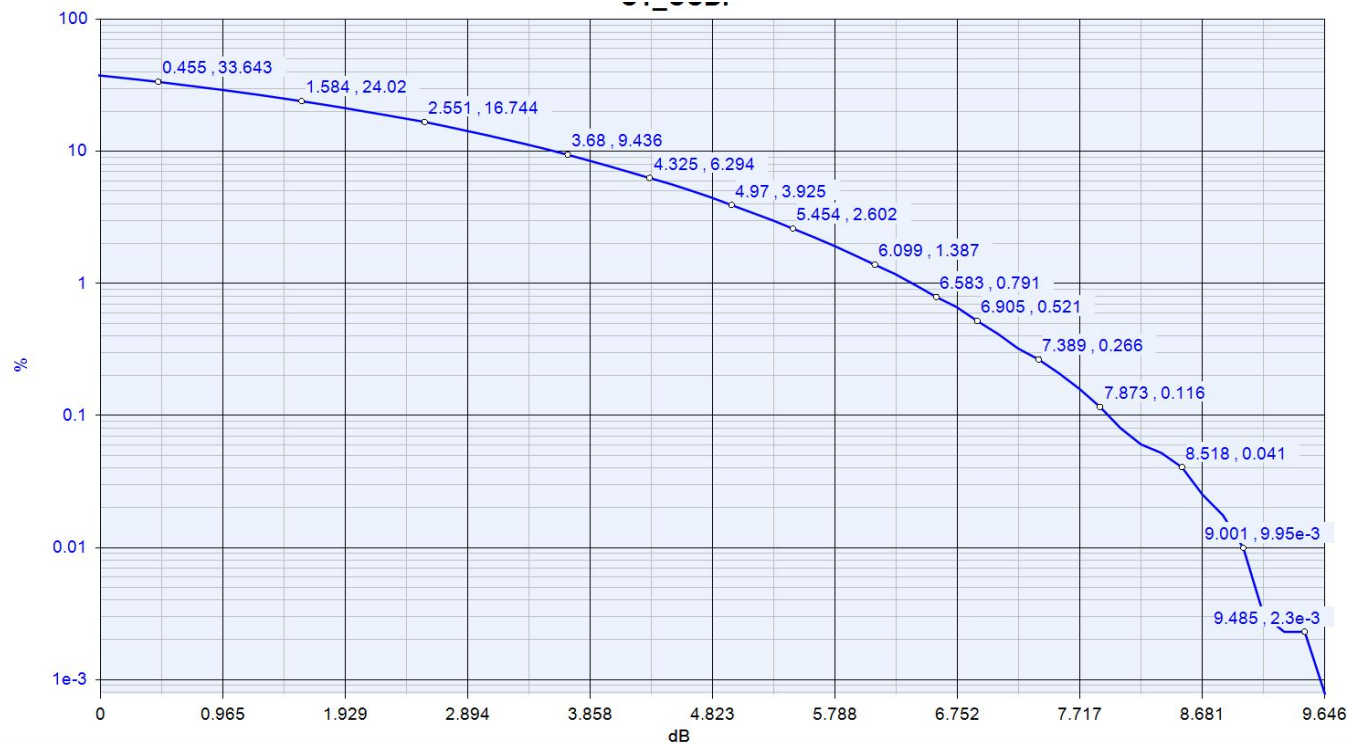


Figura 21: Porcentagem do sinal vs nível potência de transmissão em relação à média para a OFDM.

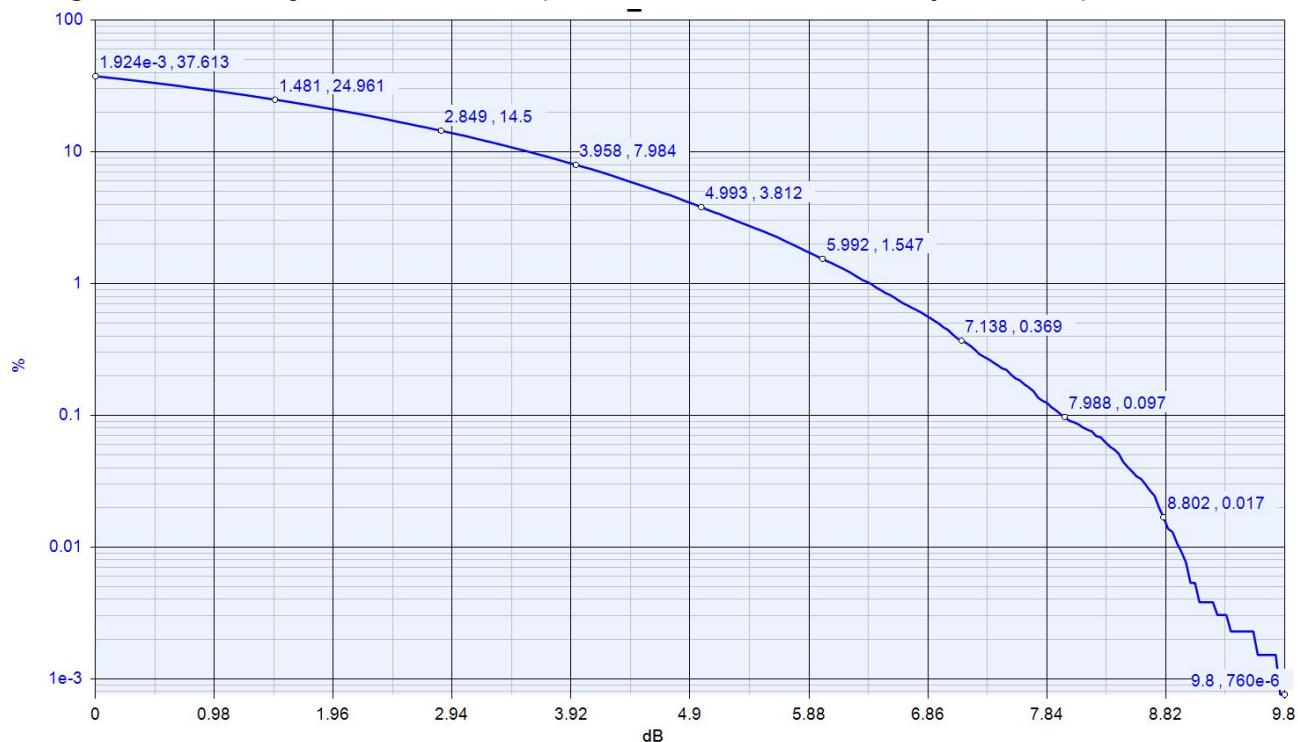


Figura 22: Porcentagem do sinal vs nível potência de transmissão em relação à média para a F-OFDM.



**Figura 23:** Porcentagem do sinal vs nível potência de transmissão em relação à média para a FBMC.

A curva de CCDF mais íngreme, ou seja, que atinge o 0% mais rapidamente, indica que a potência de pico do sinal está mais próxima da média. Desta maneira, o amplificador irá precisar de uma faixa menor de operação linear para que ele não distorça o sinal, o que reduz o custo e qualidade necessária neste componente [13]. A nomenclatura desta característica nos sinais se chama PAPR ou *Peak to Average Power Ratio* e determina a proporção entre a potência de pico e média.

A OFDM tem o melhor desempenho em termos de PAPR com pico de 9,65 dB acima da média e uma descida íngreme para atingir tal valor.

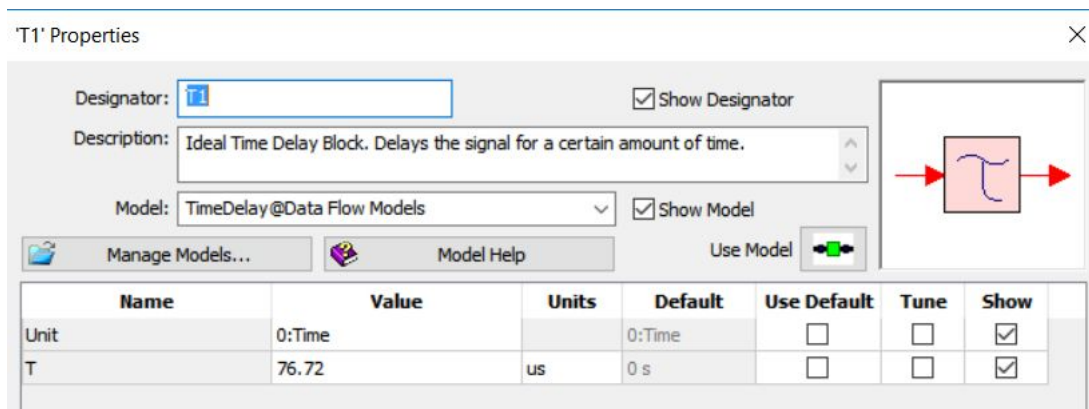
A F-OFDM tem o pico de 9,8 dB acima da média e uma descida não tão íngreme quanto a do OFDM. A aplicação de um filtro melhora a ocupação de banda, mas piora a PAPR, porém, como cada Hz tem muito valor comercial [9], visto que as empresas somente podem usar uma largura de banda limitada de espectro para os serviços, aumentar o custo do amplificador para controlar a ocupação de banda pode ser vantajoso.

A FBMC apresenta uma curva mais alta de CCDF com pico máximo em 10,432 dB. O pior desempenho em termos de PAPR, mas considerando a ocupação de banda quase perfeita, a FBMC é a melhor opção até o momento.

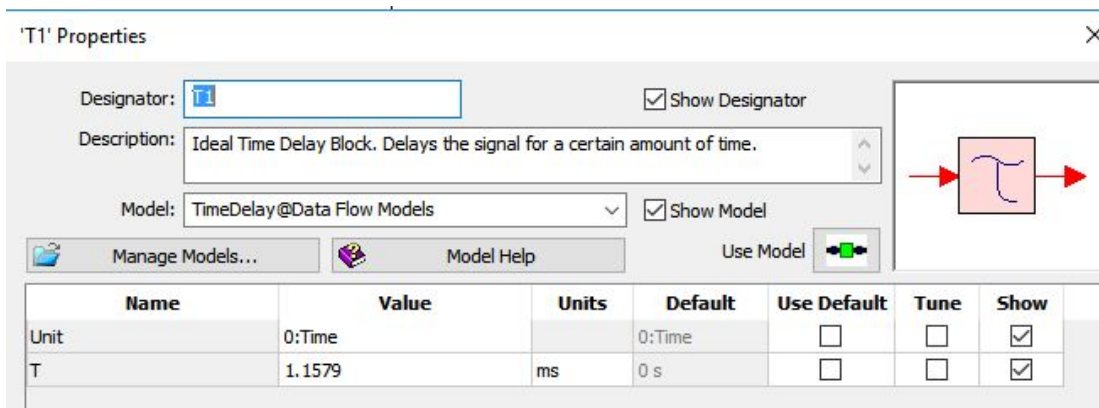
### 6.1.3 Complexidade de geração e recepção

Esta análise será feita considerando o tempo entre a entrada e saída dos bits no sistema. Com este tempo, é possível quantificar a necessidade computacional necessária para transmitir e receber os sinais através de cada forma de onda.

As imagens abaixo mostram o tempo de atraso aplicado para sincronizar os bits transmitidos com os bits de referência.



**Figura 24:** Tempo de atraso aplicado nos bits de referência na OFDM e F-OFDM.



**Figura 25:** Tempo de atraso aplicado nos bits de referência na FBMC.

O atraso para a OFDM e F-OFDM foi de 76,72  $\mu$ s, enquanto da FBMC foi de 1,1579 ms, isto é, 15x maior se comparado à OFDM e F-OFDM. Então, é fácil concluir que o processamento necessário para a FBMC é muito maior e, gastar tanto tempo no processamento quando se quer enviar uma quantidade massiva de dados com a menor latência, torna a FBMC uma péssima candidato neste quesito.

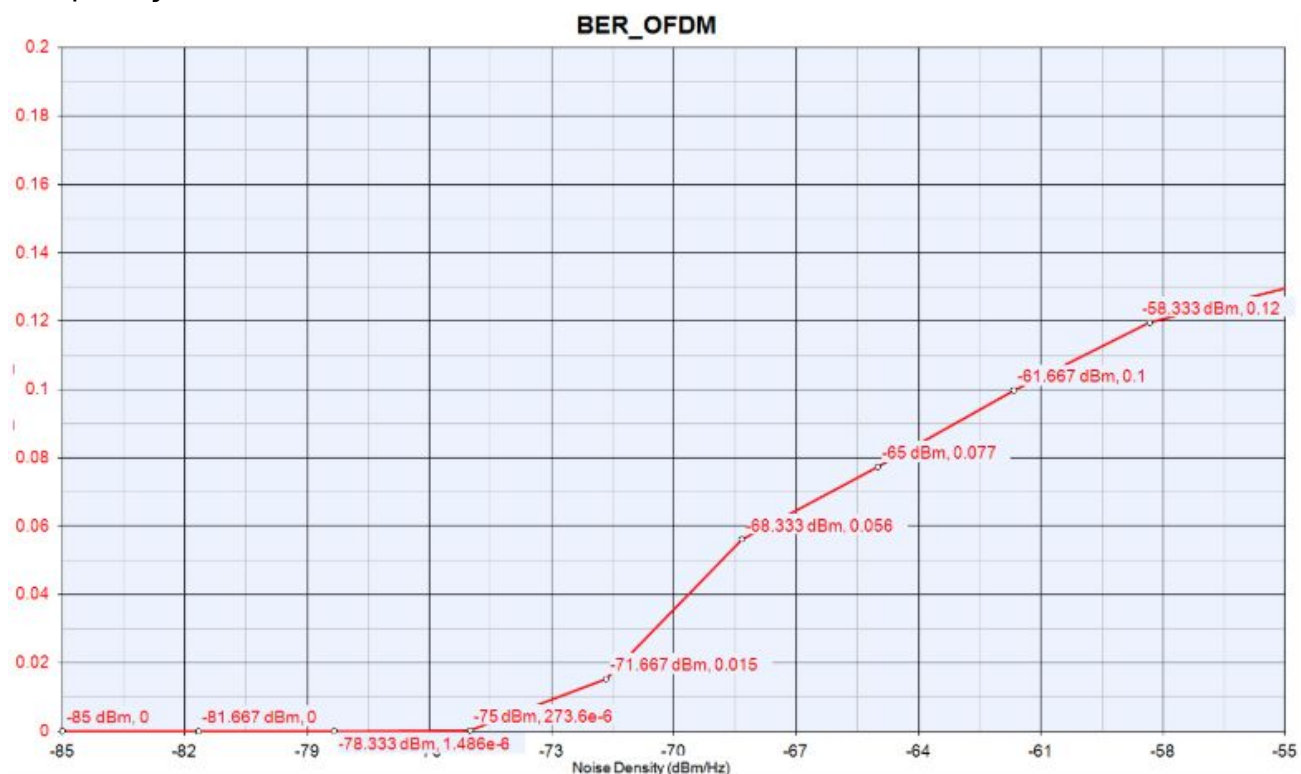
Outra informação importante é que a aplicação de um filtro na OFDM (F-OFDM) não surtiu efeito em termos de tempo de processamento, o que, levando em consideração a redução das emissões fora da banda, faz com que a F-OFDM tenha o melhor desempenho neste quesito.



### 6.1.4 Taxa de erro de bit

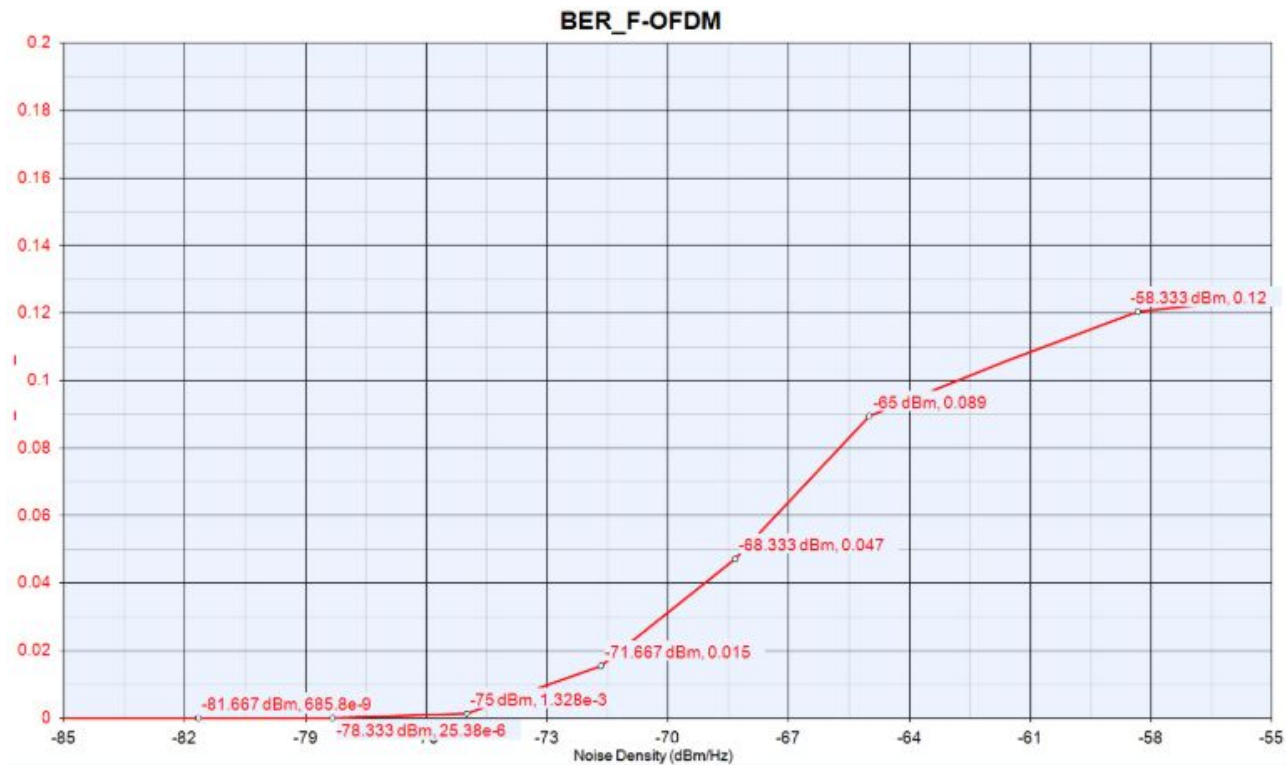
A taxa de erro de bit ou BER (*Bit Error Rate*) foi avaliada em termos da densidade potencia do ruído inserida no canal e não pela SNR, para simplificar o entendimento do efeito do ruído no sistema e não depender da variação no formato de cálculo de potência do sinal.

Seguindo a ordem anterior, abaixo estão as imagens da BER por densidade de potência do ruído inserido variando de -85 dBm/Hz até -55 dBm/Hz para cada esquema de multiplexação:

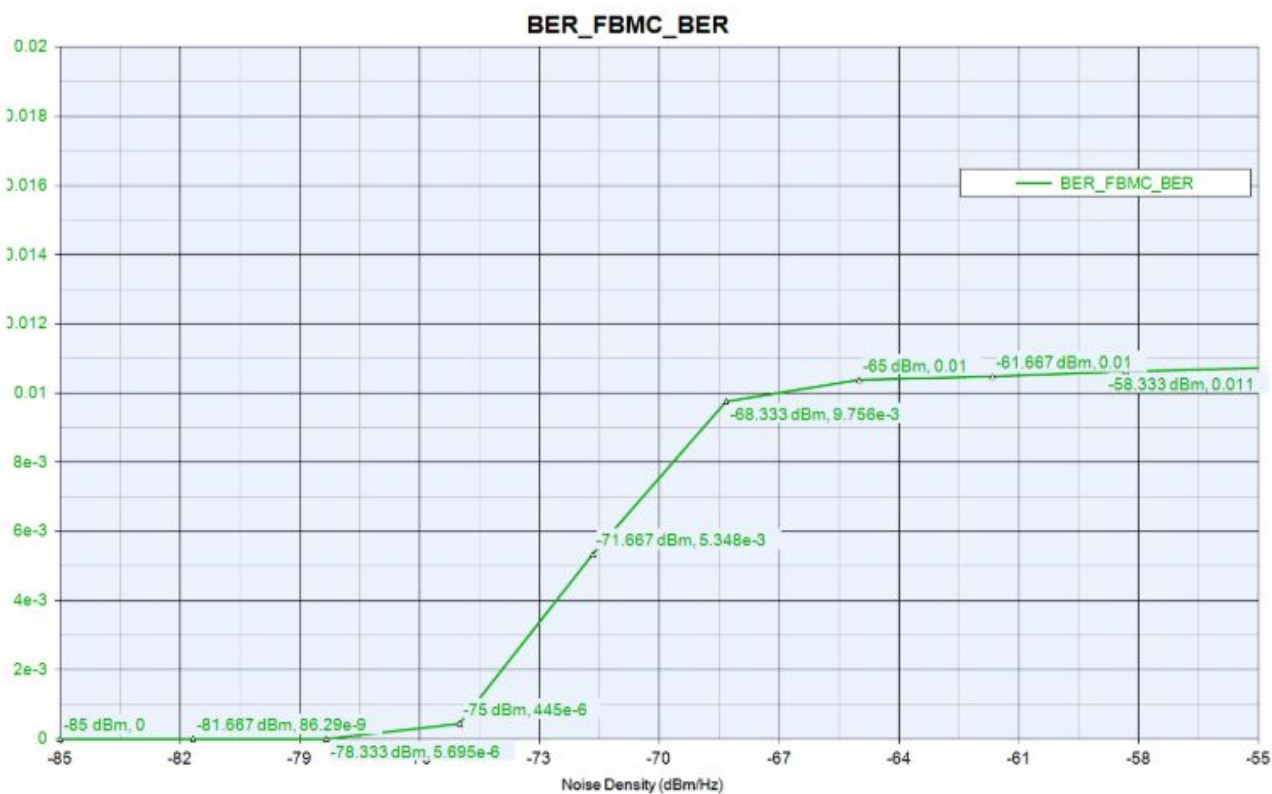


**Figura 26:** BER vs densidade de potencia do ruído inserido no canal para a OFDM.





**Figura 27:** BER vs densidade de potencia do ruído inserido no canal para a F-OFDM.



**Figura 28:** BER vs densidade de potencia do ruído inserido no canal para a FBMC.

Os desempenhos da OFDM e F-OFDM foram similares, porém a OFDM foi relativamente superior com a densidade de potencia do ruído abaixo de  $-72,5$  dBm/Hz. Acima de  $-72,5$  dBm/Hz o desempenho é praticamente igual.

A FBMC teve uma performance inferior à OFDM para densidade de potencia do ruído baixa (abaixo de  $-72,5$  dBm/Hz), porém muito superior para densidade de potencia do ruído maior, chegando a ser 10 vezes menor no final do gráfico. A F-OFDM tem o pior desempenho.

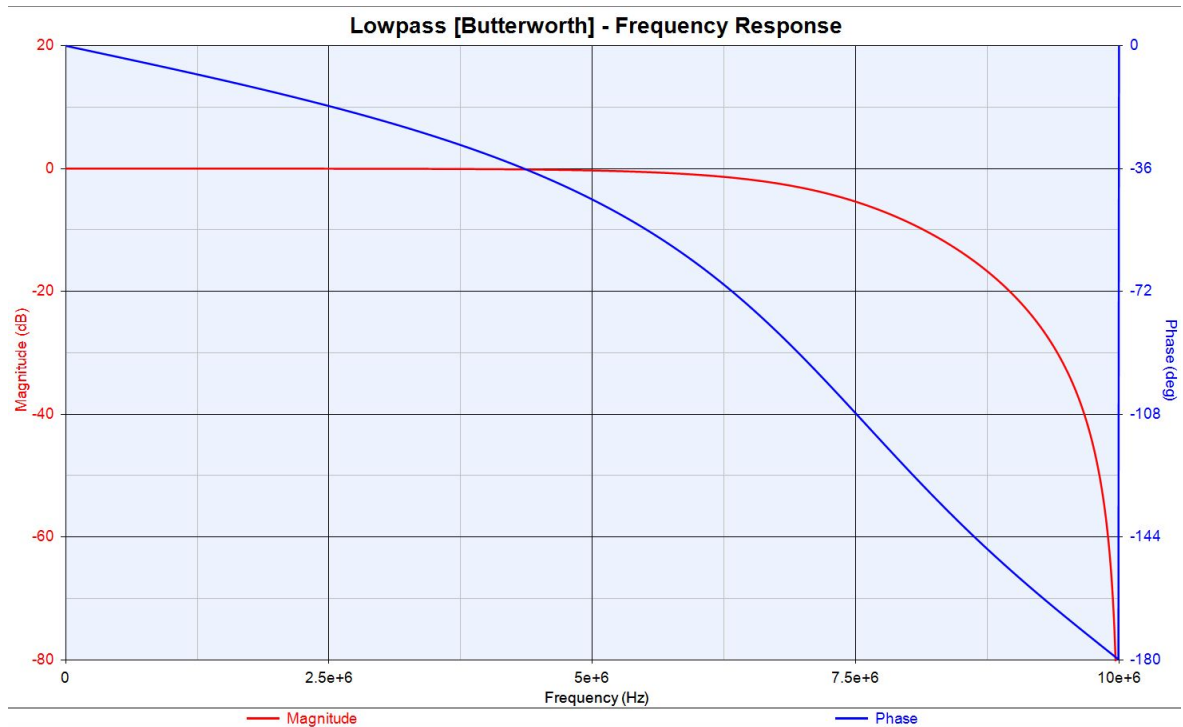
Levando em consideração que a FBMC precisa de muito mais componentes de tratamento de sinal (preâmbulo com sequência Zadoff-Chu e sincronização mesmo para o canal ideal) que a OFDM e F-OFDM para funcionar, ou seja, a FBMC tem uma complexidade muito maior, entregar um melhor desempenho de BER é o mínimo esperado para esta técnica.

Da mesma forma que inserir um componente para reduzir as emissões fora da banda da OFDM não aumentou o tempo de processamento do sinal, é possível considerar a inserção de componentes corretores de erro e codificação dos bits, para melhorar o desempenho neste quesito.

#### **6.1.4.1 BER reduzindo a largura de banda da F-OFDM**

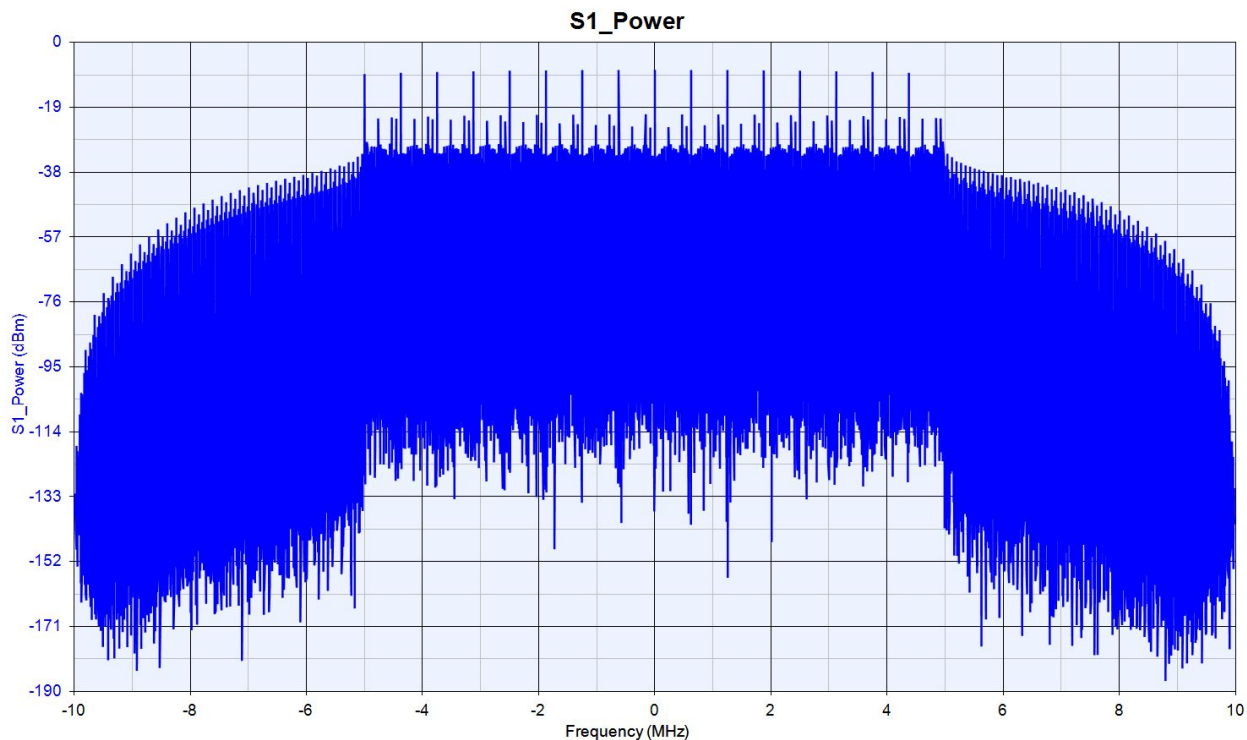
A **Figura 14** apresenta as respostas em magnitude e em fase do filtro aplicado à F-OFDM com uma largura de banda mais alta (uma filtragem mais relaxada). Nesta seção será explorada como a diminuição na largura de banda do filtro de saída afeta a BER do sistema.

O segundo filtro (considerando a análise de BER anterior da F-OFDM) aplicado gerou uma pequena diminuição na largura de banda e a resposta de acordo com a figura abaixo:



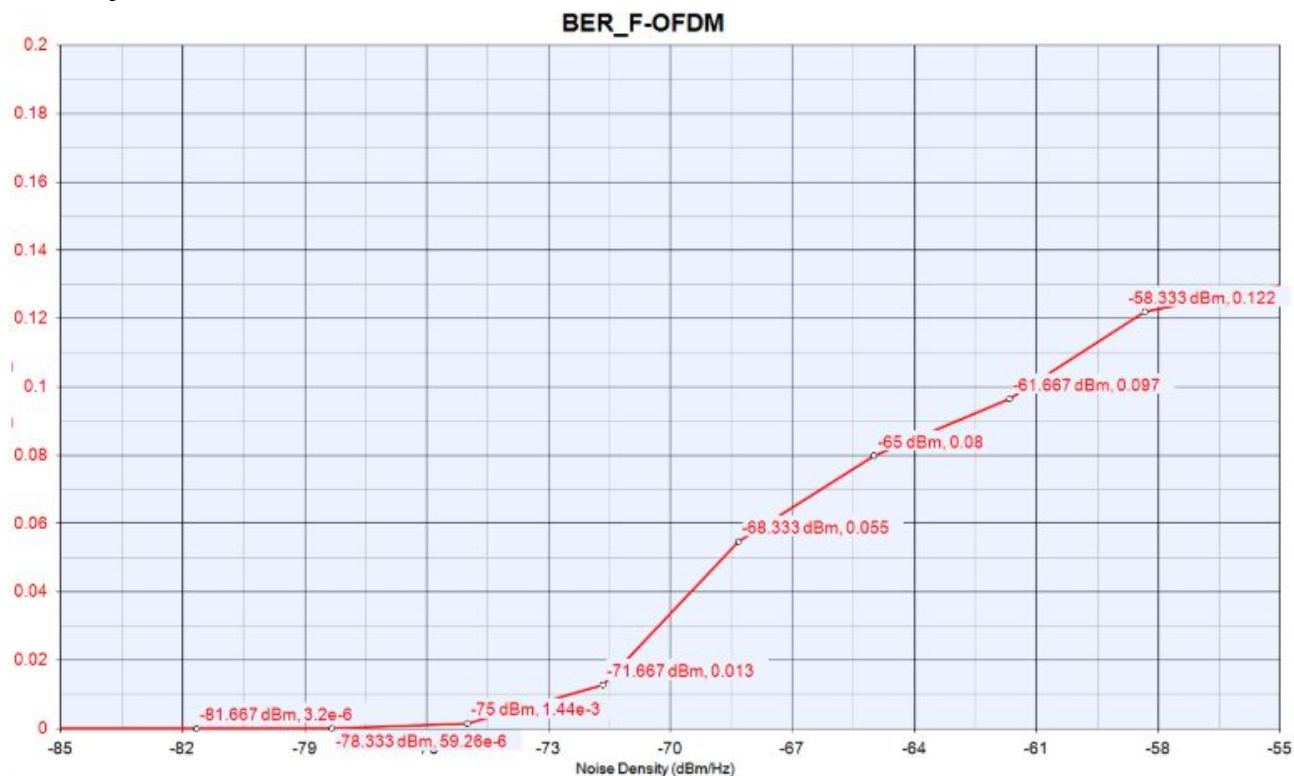
**Figura 29:** Respostas em magnitude e em fase do segundo filtro.

A implicação da aplicação do filtro no espectro do sinal transmitido está apresentada na figura abaixo:



**Figura 30:** Gráfico de magnitude em dBm por frequência da F-OFDM com o segundo filtro.

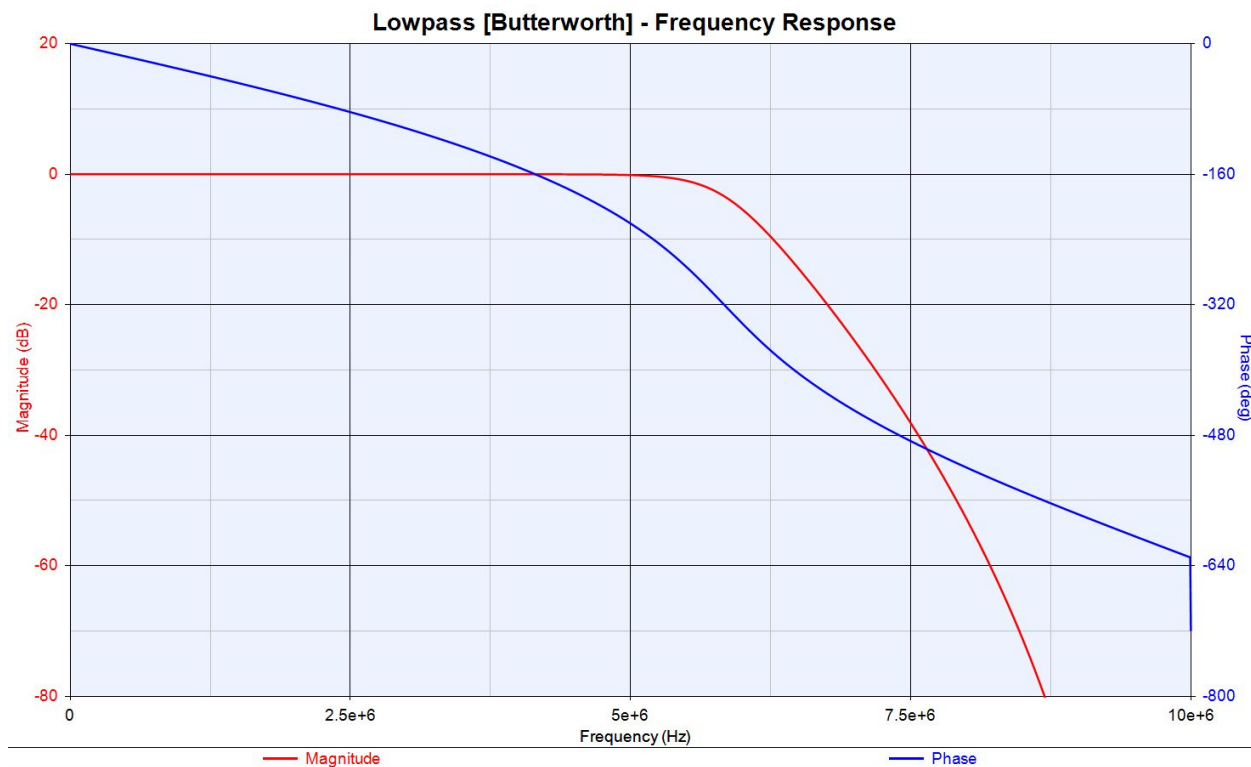
Aparentemente não houve uma redução tão significativa na ocupação de banda do sinal. O gráfico da BER dará uma melhor noção do quanto o sistema foi afetado por essa diminuição da banda do sinal.



**Figura 31:** BER vs densidade de potência do ruído inserido no canal para a F-OFDM com o segundo filtro.

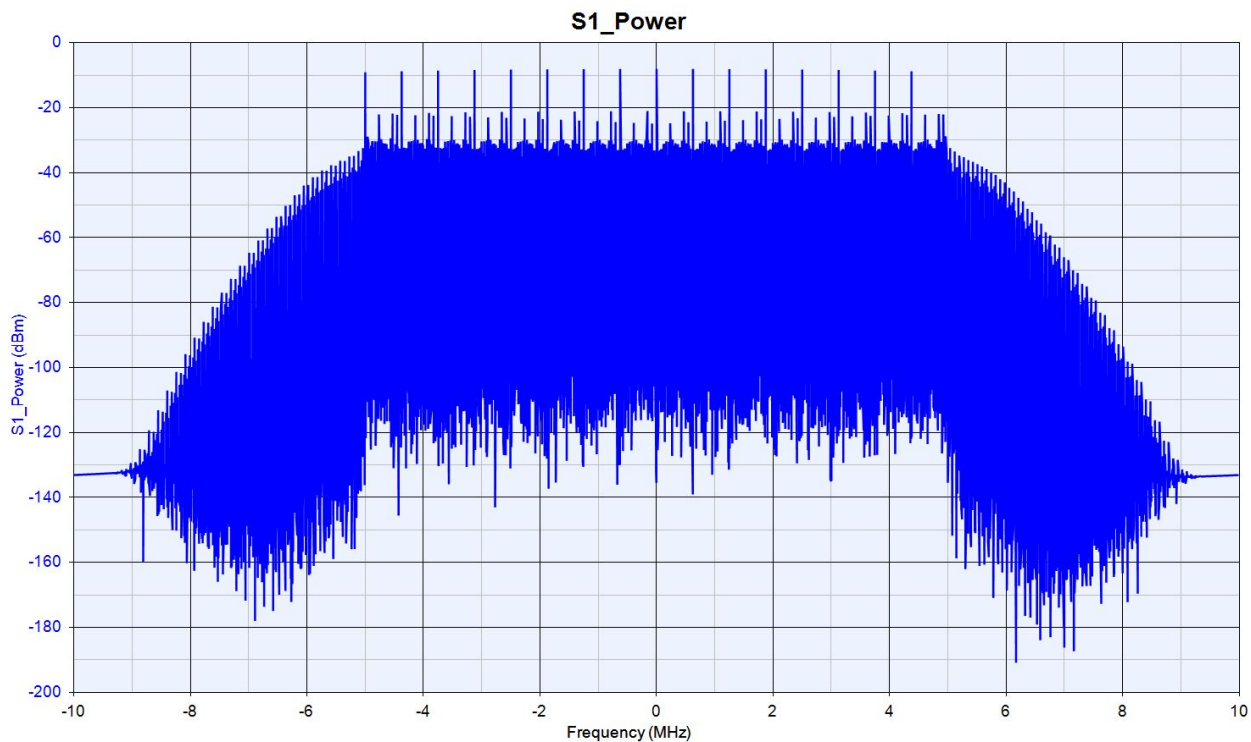
Para densidade de potencia do ruído em -81,667 dBm/Hz e -78,333 dBm/Hz, a F-OFDM com o segundo filtro teve um desempenho aproximadamente 5 vezes e 3 vezes pior comparado os os dois filtros anteriores. Para potências de ruído maiores, o desempenho foi parecido.

O terceiro filtro aplicado está apresentado na figura a seguir:



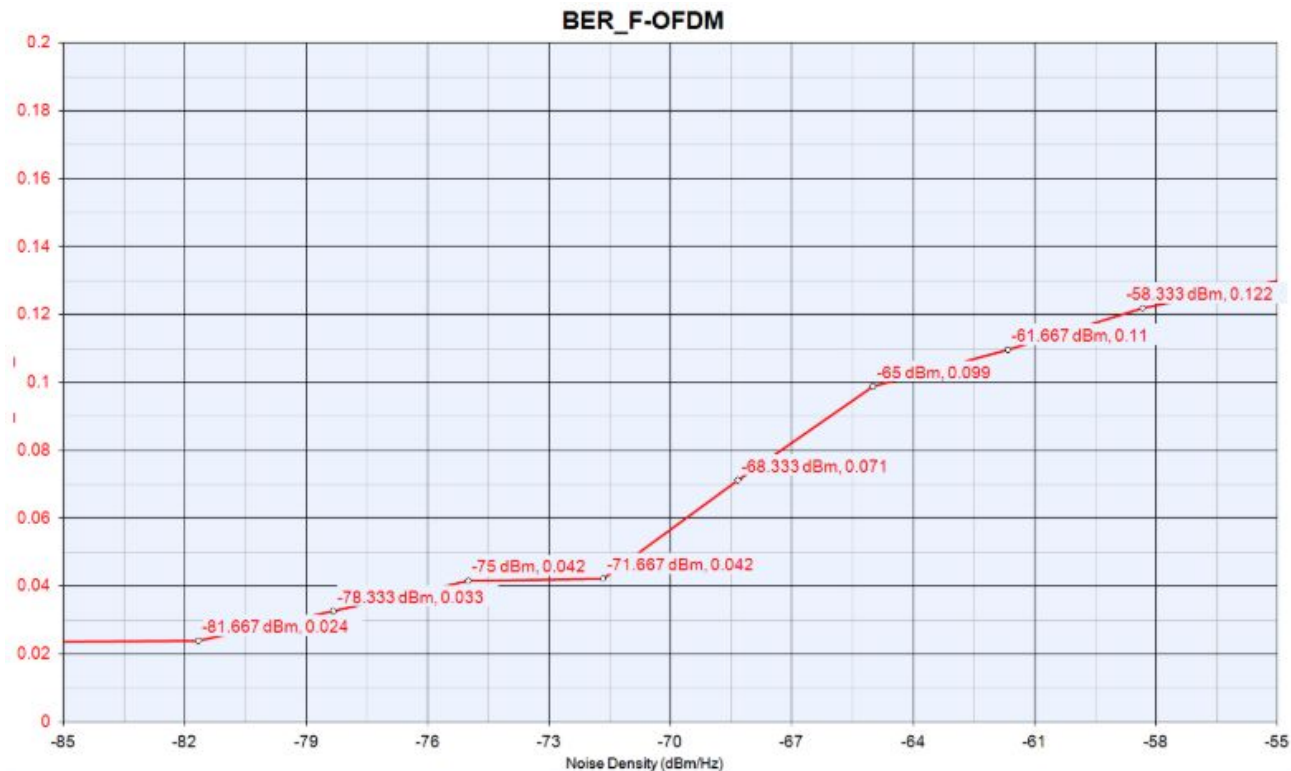
**Figura 32:** Resposta em magnitude e fase do terceiro filtro.

Este terceiro filtro reduz a banda do sinal drasticamente. O espectro de tal sinal está ilustrado na figura abaixo:



**Figura 33:** Gráfico de magnitude em dBm por frequência da F-OFDM com o terceiro filtro.

Na **Figura 33**, é possível notar o tamanho da redução das emissões fora da banda. Para verificar o impacto de tal redução no espectro do sinal na BER, a imagem abaixo apresenta a BER do sinal para o terceiro filtro aplicado na F-OFDM:



**Figura 34:** BER vs densidade de potência do ruído inserido no canal para a F-OFDM com o terceiro filtro.

Então, uma redução tão drástica na largura de banda do sinal faz com que o taxa de bits errados alcance um valor impraticável para o sistema, pois a taxa de erros é muito elevada. Considerando que para o caso real será utilizada a aplicação de métodos de equalização mais complexos e métodos de correção de bits para lidar com as distorções do canal, é fácil concluir que o trabalho e complexidade de tais técnicas seriam tão grandes que, mesmo com uma alta redução da largura de banda, não valeria a pena utilizá-los.

Com estes dados, podemos concluir que existe um desafio para reduzir a largura do espectro do sinal fora da banda mantendo uma taxa de erros aceitável para que a aplicação da correção de bits tenha uma menor complexidade e conseqüentemente precise de menos processamento.

## 6.2 Resultados e discussão sobre a medição real

### 6.2.1 Geração e medição da FBMC

A BER neste caso não pode ser calculada aplicando uma varredura no software, pois os blocos de geração e recepção ficaram em aba separadas devido ao fluxo de enlace com software externo do SystemVue. O ruído foi aplicado ao canal somente na

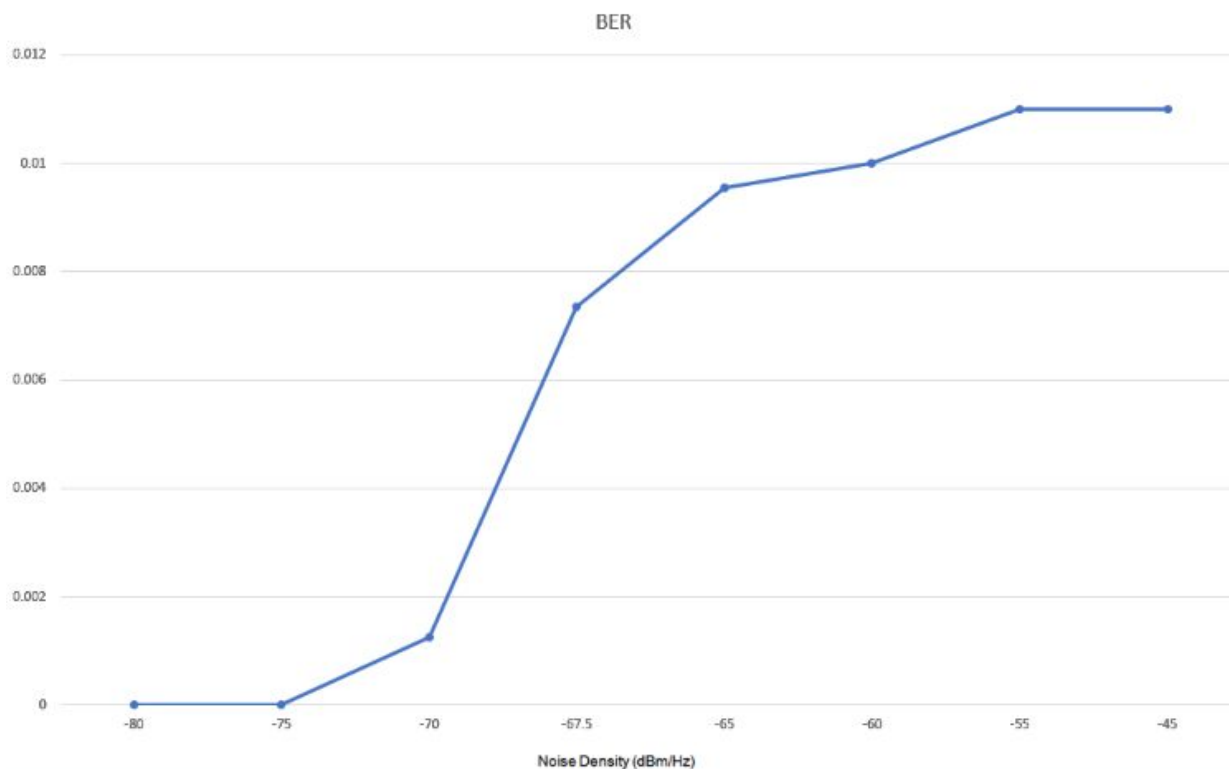
parte real do sinal, para facilitar a sincronização dos dados, e o tempo de geração dos bits foi reduzido, para não estourar a memória alocada, resultando em 40.000 bits gerados.

A tabela abaixo mostra na primeira coluna densidade de potencia do ruído aplicado e a BER na segunda coluna:

**Tabela 1: BER para geração e medição real**

Noise Density (dBm/HZ)	BER
-80	0
-75	0
-70	1.26E-03
-67.5	7.36E-03
-65	9.54E-03
-60	1.00E-02
-55	1.10E-02
-45	1.10E-02

O gráfico relacionado à **Tabela 1** está abaixo:



**Figura 35:** BER vs densidade de potencia do ruído inserido no canal para a FBMC real.

Levando em conta todas as considerações, é possível afirmar que o desempenho foi parecido com o da simulação da FBMC. Talvez piorasse um pouco se o ruído fosse



inserido na parte imaginária do sinal, mas como a transmissão foi feita com um cabo curto e de boa qualidade, os efeitos do canal são mínimos.

## 7. Conclusão

Considerando as especificações esperadas para a fase final do 5G NR como o MIMO massivo, ultra baixa latência, baixo consumo e baixa complexidade do receptor, etc. [14], e também considerando os resultados aqui apresentados, a experiência durante o desenvolvimento do trabalho e a literatura sobre o assunto, a técnica de multiplexação em frequência para o 5G NR é definitivamente a OFDM, porém com alguns incrementos como codificação para correção de erros, janelamento para controle das emissões fora da banda, etc..

Aplicar um filtro por subportadora, que é o caso da FBMC, faz com que a largura de banda do sinal praticamente não tenha emissões fora da banda de interesse, permitindo que diferentes canais sejam alocados com maior proximidade no espectro, porém o custo é uma maior complexidade, exigindo equalizadores mais robustos, melhor processamento e amplificadores com maior faixa linear. O resultado disso foi um atraso 15 vezes maior entre a entrada e a saída do sistema, embora, os blocos FBMC do SystemVue já possuam etapas mais avançadas que os blocos usados para a OFDM, como a sincronização e outros blocos para lidar com a quantidade de filtros aplicados, é um número muito elevado quando se espera um sistema que suporte na casa de gigabits por segundo [14].

A operação simples da OFDM permite um melhor encaixe das incrementações como codificações avançadas, equalização, sincronização, prefixo cíclico, etc.. Assim, o aumento da complexidade para lidar com as adversidades do canal ou outras características do sistema que têm relação com a técnica de multiplexação utilizada (i.e. MIMO) é controlado pelos fatores externos à técnica e devem considerar a operação simples da OFDM em sua implementação.

Por fim, o OFDM já foi testado e definido para ser usado no 5G, e já foram feitos testes funcionais com dispositivos produto final (Samsung Galaxy S10) confirmando a eficiência do uso dessa técnica.

Embora já era sabido o resultado final, o processo para entender os conceitos por trás do funcionamento das técnicas de multiplexação em frequência e a implicação disso no desenvolvimento de uma nova tecnologia com alta complexidade que terá um grande impacto na sociedade [14] é de grande importância para traçar quais são as principais características das técnicas e como elas afetam a transmissão de dados e complexidade das correções exigidas em nível sistema. Ou seja, estudar por meio de comparação tais técnicas deu ferramentas para conseguir ponderar a importância das diferentes características, como elas impactam o resultado final e de qual maneira se consegue melhorar o sistema.

## Bibliografia

- [1] Qualcomm Incorporated. Everything You Need to Know About 5G. Disponível em: <<https://www.qualcomm.com/invention/5g/what-is-5g>>. Acessado em: 19/08/2019.
- [2] Anwer Al-Dulaimi, Xianbin Wang, and Chih-Lin I. 5G Networks: Fundamental Requirements, Enabling Technologies, and Operations Management, First Edition [Internet]. IEEE, 2018. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8496441>>.
- [3] 3GPP. Release 15: TR 21.915. Disponível em: <[https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/21\\_series/21.915/21915-100.zip](https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/21_series/21.915/21915-100.zip)>.
- [4] Yong Soo Cho, Jaekwon Kim, Won Young Yang and Chung G. Kang. *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB®*: Introduction to OFDM [Internet]. Wiley-IEEE Press, 2010. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/servlet/opac?bknumber=5675894>>.
- [5] 3GPP. LTE. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/technologies/keywords-acronyms/98-lte>>. Acessado em: 19/08/2019.
- [6] 3GPP. TDocs (written contributions) at meeting. Meeting: R1-84b - 2016-04-11 to 2016-04-15, Busan, 2016. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/DynaReport/TDocExMtg--R1-84b--31661.htm>>.
- [7] Qualcomm Incorporated. TDoc: R1-162199: Waveform Candidates. 3GPP TDocs (written contributions) at meeting: Meeting: R1-84b - 2016-04-11 to 2016-04-15. Busan, 2016. Disponível em: <[https://www.3gpp.org/ftp/TSG\\_RAN/WG1\\_RL1/TSGR1\\_84b/Docs/R1-162199.zip](https://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/WG1_RL1/TSGR1_84b/Docs/R1-162199.zip)>.
- [8] Intel Corporation. TDoc: R1-162384: Considerations on waveform selection for new radio interface. 3GPP TDocs (written contributions) at meeting: Meeting: R1-84b - 2016-04-11 to 2016-04-15. Busan, 2016. Disponível em: <[https://www.3gpp.org/ftp/TSG\\_RAN/WG1\\_RL1/TSGR1\\_84b/Docs/R1-162384.zip](https://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/WG1_RL1/TSGR1_84b/Docs/R1-162384.zip)>.
- [9] Richard V. Snyder. Filter Design for Modern Communication Systems. IEEE, 2013. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6421699>>.
- [10] Panasonic. TDoc: R1-162551: Considerations on waveform selection for new radio interface. 3GPP TDocs (written contributions) at meeting: Meeting: R1-84b - 2016-04-11 to 2016-04-15. Busan, 2016. Disponível em: <[https://www.3gpp.org/ftp/TSG\\_RAN/WG1\\_RL1/TSGR1\\_84b/Docs/R1-162551.zip](https://www.3gpp.org/ftp/TSG_RAN/WG1_RL1/TSGR1_84b/Docs/R1-162551.zip)>.
- [11] J. Zhao, A.D. Ellis. Spectral Efficiency Enhancement Using Coherent WDM with Multi-Level Offset-QAM. IEEE, 2011. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6066140>>.
- [12] Hachim Azzahhafi, Moussa El Yahyaoui, Ali El Moussati. Performance Analysis of Frequency Spreading FBMC in Mobile Radio Channel. IEEE, 2019. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/document/8618823>>.
- [13] Keysight Technologies. Characterizing Digitally Modulated Signals with CCDF Curves. Disponível em: <<https://literature.cdn.keysight.com/litweb/pdf/5968-6875E.pdf>>.
- [14] Qualcomm Incorporated. 5G Waveform & Multiple Access Technique. Disponível em: <<https://www.qualcomm.com/media/documents/files/5g-research-on-waveform-and-multiple-access-techniques.pdf>>. . . Acessado em: 11/15/2019.

