

# Avaliação do desempenho de sistemas F-OFDM em canais AWGN

Everton Vinicius da Silva Campos, Luiz Gonzaga de Queiroz Silveira Junior e Marcio Eduardo da Costa Rodrigues

**Resumo**— Neste artigo, avaliamos o desempenho de 5 sistemas F-OFDM em canal AWGN. A técnica utilizada no projeto dos filtros FIR é o janelamento da resposta ao impulso de filtros ideais previamente projetados, com as janelas de Hamming, Hanning, Retangular, Blackman e Blackman-Harris, escolhidas devido ao amplo emprego na literatura. Importantes contribuições foram alcançadas a partir dos resultados obtidos, destacando-se a melhor compreensão das escolhas realizadas para os parâmetros do sistema de transmissão e o impacto na emissão fora da banda, taxa de erro de bit e na relação entre as potências de pico e média do sinal. Portanto, os resultados preliminares obtidos são satisfatórios e encorajam a pesquisa e a avaliação de estratégias para a geração da forma de onda em sistemas 5G.

**Palavras-Chave**— F-OFDM, OFDM, 5G, BER, PAPR.

**Abstract**— In this paper, we evaluate the performance of 5 F-OFDM systems in the AWGN channel. The technique used in the design of the FIR filters is the windowing of the impulse response of previously designed ideal filters, with the Hamming, Hanning, Rectangular, Blackman, and Blackman-Harris windows being chosen due to their extensive uses in the literature. Important contributions were achieved from the obtained results, highlighting the better understanding of the choices made for the transmission system parameters and the impact on the out-of-band emission, bit error rate and the peak-to-average power ratio of the signal. Therefore, the preliminary results obtained are satisfactory and encourage the research and the evaluation of strategies for generating the waveform in 5g systems.

**Keywords**— F-OFDM, OFDM, 5G, BER, PAPR.

## I. INTRODUÇÃO

Para a rede móvel de quinta geração, 5G, poder ser concebida, foi necessário o desenvolvimento de novas tecnologias em relação ao 4G Long Term Evolution (LTE). Entre elas, houve o desenvolvimento de uma forma de onda baseada no OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing), denominada F-OFDM, que faz uso dos mesmos processos originais na cadeia de transmissão, com o emprego adicional de um filtro em cada sub-banda. Com o processo de filtragem, foi possível se aproveitar dos pontos positivos do OFDM, como uma eficiência espectral significativa e uma baixa susceptibilidade à seletividade em frequência, além de reduzir as suas ineficiências, como a emissão fora da banda [1][2].

A busca por uma função de janelamento adequada para o processo de filtragem digital com emprego de filtros de resposta ao impulso finita, FIR (Finite Impulse Response), que

Everton Vinicius da Silva Campos, estudante regularmente matriculado no curso de graduação em Engenharia de Telecomunicações e aluno de Iniciação Científica do PIBIC da UFRN, e-mail: everton.campos.709@ufrn.edu.br; Luiz Gonzaga de Queiroz Silveira Júnior e Marcio Eduardo da Costa Rodrigues, Departamento de Engenharia de Comunicações da UFRN, e-mails: luiz.silveira@ufrn.br; marcio.rodrigues@ufrn.br. Este trabalho foi financiado com recursos da PROPESQ/UFRN.

permanecem estáveis mesmo após a quantização dos coeficientes do filtro, incentivou diversas pesquisas na área. Por exemplo, em [1], o autor propõe a escolha de um filtro otimizado a ser utilizado na estrutura F-OFDM; para isso, utilizou diversas funções janela nas técnicas F-OFDM e comparou seus desempenhos. Após a realização das simulações, o sistema que apresentou menores valores tanto em BER (Bit Error Rate) quanto em OOB (Out of Band Emission), foi o que utilizou a janela de Kaiser. Também, em [3], foram feitas comparações de desempenho de sistemas F-OFDM, fazendo-se uso de variadas funções de janelamento, e o sistema que fez uso da função proposta pelos autores, Blackman-Harris de Nuttall, foi o que obteve os melhores resultados em termos de OOB.

Conforme evidenciado em diversos estudos anteriores, inclusive os mencionados, as diferentes funções de janelamento impactam de maneira variada no desempenho do sistema F-OFDM. Seguindo essa linha de pesquisa, o presente trabalho, que foi realizado com o software MATLAB® versão R2023a e sua licença de estudante, tem como principal objetivo avaliar o desempenho da forma de onda F-OFDM, empregando uma variedade de funções de janelamento clássicas, sendo elas: Hamming, Hann, Retangular, Blackman e Blackman-Harris, além de empregar as modulações 64-QAM e 256-QAM. Para essa análise, foram obtidos resultados numéricos em termos de PAPR (Peak to Average Power Ratio) e BER, e analisada a OOB, por meio das PSDs (Power Spectral Density), permitindo tanto uma comparação entre os sistemas F-OFDM com as variadas funções de janelamento quanto com o OFDM padrão. O código utilizado neste trabalho foi adaptado de um exemplo disponível na documentação do MATLAB, na categoria Communications Toolbox [4].

## II. METODOLOGIA

Para as simulações, foram empregados os parâmetros originais do código [4], assim como exibido na Tabela I.

TABELA I. PARÂMETROS UTILIZADOS EM TODAS AS SIMULAÇÕES.

Modulação	64-QAM / 256-QAM
Tamanho da FFT	1024
Comprimentos do Prefixo Cíclico	256
Ordem do Filtro	512

Com o uso do código [4], inicialmente foi gerado um conjunto de dados pseudoaleatórios, com base em valores binários, para simular o sinal. Com a função “qammod”, os bits transformaram-se em símbolos, em seguida, aplicou-se a função “ifft” e adicionou-se o prefixo cíclico, obtendo-se o sinal OFDM, que, por sua vez, foi filtrado para gerar o sinal F-OFDM.

A adaptação do código [4] consiste no uso de filtros criados por meio da função “filterDesigner”, ao invés do uso do filtro original. Dessa forma, foi possível escolher a ordem e a função de janelamento, a unidade nas especificações de frequência foi configurada como normalizada e, com isso, a frequência de corte definida como 0,6. Com o projeto concluído, os coeficientes do filtro foram exportados para o espaço de trabalho do software e utilizados como entrada na função “dsp.FIRFilter”.

Como forma de simular um sistema de comunicação em presença de ruído, foi adicionado ao sinal F-OFDM o AWGN por meio da função “awgn”. No lado do receptor da transmissão, o sinal ruidoso foi filtrado, em sequência, feita a retirada do prefixo cíclico do sinal e aplicada a função “fft”.

Para obter os parâmetros a serem utilizados na análise do sistema, foi utilizada a função “periodogram” para posterior plotagem das PSDs; a função “comm.ErrorRate”, que compara o sinal transmitido com o sinal recebido, obtendo-se assim a taxa de erro de bit; e a função “powermeter”, para o cálculo da relação entre as potências de pico e média (PAPR).

### III. RESULTADOS

Na Figura 1, é possível observar as PSDs, tanto do OFDM, quanto das técnicas F-OFDM, nos quais foram utilizadas as funções de janelamento Hamming, Hann, Retangular, Blackman e Blackman-Harris. Com os resultados, nota-se, que nos sistemas F-OFDM, a emissão fora de banda (OOBE) é consideravelmente menor que no sistema OFDM padrão. Dentre as janelas utilizadas, destacou-se a de Blackman, que conseguiu atingir uma atenuação na banda de rejeição de cerca de 230dB.

Em relação à taxa de erro de bit (BER), os resultados das simulações, nas quais foram utilizadas as modulações 64-QAM e 256-QAM, podem ser vistos na Figura 2. A partir das avaliações e comparações de desempenho em termos de BER x  $E_b/N_0$ , é possível observar maiores taxas de erro em todos os sistemas que fizeram uso da modulação 256-QAM, explicado pelo fato de ser uma modulação de ordem mais elevada, sendo capaz de transmitir uma maior taxa de dados, porém, mais suscetível a erros. Comparando o resultado dos sistemas que utilizaram a mesma modulação, vê-se um desempenho muito similar, assim como evidenciado em trabalhos como em [5].

A Tabela 2 mostra os resultados de PAPR do OFDM e dos sistemas F-OFDM. Nela, é vista uma maior PAPR para as técnicas F-OFDM, o que já é esperado, levando em consideração que o PAPR é o cálculo da potência máxima sob a potência média, sendo assim, quando ocorre o processo de filtragem nos sistemas F-OFDM, a potência média é diminuída e, por consequência, há um aumento no PAPR.

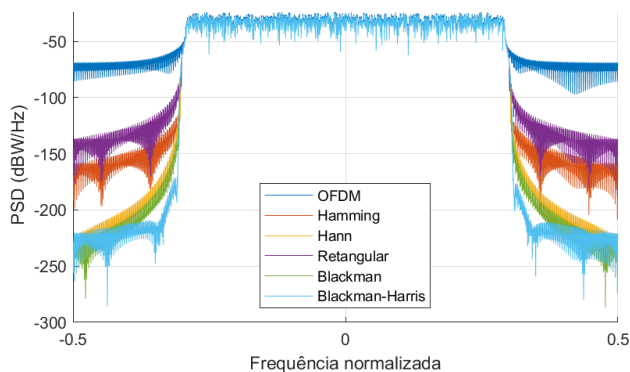


Fig. 1. PSDs do OFDM e F-OFDM com variadas funções de janelamento.

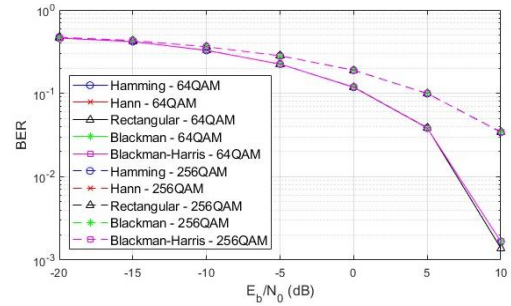


Fig. 2. Relação BER x  $E_b/N_0$  dos sistemas F-OFDM, utilizando as modulações de 64-QAM e 256-QAM.

TABELA II. PAPR RESULTANTE DAS SIMULAÇÕES.

	64-QAM	256-QAM
PAPR OFDM	9,7354	7,7204
PAPR FOFDM (Hamming)	11,1972	9,1842
PAPR FOFDM (Hann)	11,1974	9,1840
PAPR FOFDM (Retangular)	11,1953	9,1864
PAPR FOFDM (Blackman)	11,1974	9,1841
PAPR FOFDM (Blackman-Harris)	11,1974	9,1842

### IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho, avaliamos o desempenho de sistemas F-OFDM sobre canais sujeitos ao ruído AWGN, usando-se a técnica do janelamento com 5 janelas clássicas, que são empregadas amplamente na literatura especializada. A partir das comparações de desempenho entre os sistemas avaliados, é possível observar as vantagens de não se utilizar o OFDM na geração da forma de onda dos sistemas 5G. Esse trabalho de iniciação científica está em seu estágio inicial e será prorrogado com a renovação desse projeto pelo autor orientador, visto que, ainda há diversas lacunas a serem exploradas, como a aplicação de efeitos causados por multipercursos, o estudo de filtros otimizados, além da utilização de medidas de combate ao alto PAPR.

### AGRADECIMENTOS

O primeiro autor, estudante de Engenharia de Telecomunicações, agradece a PROPESQ / UFRN pelo apoio financeiro na realização desse estudo.

### REFERÊNCIAS

- [1] A. Thakre, "Optimal Filter Choice for Filtered OFDM. 2019 3rd International conference on Electronics", Communication and Aerospace Technology (ICECA), pp. 1035-1039. jun. 2019.
- [2] F. Conceição, et al., "A Survey of Candidate Waveforms for beyond 5G Systems", Electronics 2021, 10, 21. dec. 2020.
- [3] L. Yang e Y. Xu, "Filtered-OFDM System Performance Research Based on Nuttall's Blackman-Harris Window", 2017 IEEE 17th International Conference on Communication Technology (ICCT), pp. 687-691. out. 2017.
- [4] MathWorks. "F-OFDM vs OFDM Modulation." *MathWorks Documentation*. Disponível em: <https://www.mathworks.com/help/comm/ug/f-ofdm-vs-ofdm-modulation.html>.
- [5] M. Liu, et al., "Design of filters based on generic function model for reducing out-of-band emissions of the F-OFDM systems", AEU - International Journal of Electronics and Communications, vol. 139. jul. 2021.