

Proposta de Janela baseada na Distribuição de Nakagami para o Filtro FIR Utilizado na Tecnologia f-OFDM Candidata para Aplicações 5G

Maykon Renan Pereira da Silva e Flávio Geraldo Coelho Rocha

Resumo—Na quarta geração de redes comunicações móveis sem fio (4G), a tecnologia de multiplexação amplamente utilizada é a OFDM. Embora a OFDM apresente inúmeras vantagens, como alta robustez à interferência inter-simbólica (ISI), as emissões fora de banda (OOBE) apresentadas nesta tecnologia devem ser reduzidas para que as demandas das aplicações da quinta geração de comunicações móveis sem fio (5G) sejam atendidas. Com esse intuito, tecnologias como UFMC, FBMC e f-OFDM têm sido propostas na literatura. Este trabalho propõe uma nova janela baseada na distribuição de Nakagami para o filtro de resposta ao impulso finita (FIR) utilizado na tecnologia f-OFDM. A janela proposta é ajustável e tem a vantagem de não ter expansão em série em sua função de domínio de tempo (o que é computacionalmente mais eficiente) diferente de algumas das janelas ajustáveis presentes na literatura, tais como: Dolph-Chebyshev e Kaiser. Os resultados obtidos por meio de simulações mostram que a janela proposta para o filtro da f-OFDM reduz a emissão fora de banda em comparação às principais funções de janela presentes na literatura e em comparação às tecnologias OFDM, UFMC e FBMC, o que potencializa o uso da f-OFDM para aplicações do 5G que exigem baixa tolerância à interferência entre subbandas

Palavras-Chave—Eficiência Espectral, Função de Janela, Filtro Sinc Janelado, f-OFDM, 5G.

Abstract—In the fourth generation of wireless (4G) mobile communications networks, the widely used multiplexing technology is OFDM. Although OFDM has many advantages, such as high robustness to inter-symbolic interference (ISI), the out-of-band emissions (OOBE) presented in this technology must be reduced so that the demands of the fifth generation of mobile wireless communications (5G) are met. To this end, technologies such as UFMC, FBMC and f-OFDM have been proposed in the literature. This work proposes a new window based on the Nakagami distribution for the FIR filter used in f-OFDM technology. The proposed window is adjustable and has the advantage of not having serial expansion in its time domain function (which is computationally more efficient) unlike some of the adjustable windows in the literature, such as: Dolph-Chebyshev and Kaiser. The results obtained through simulations show that the proposed window for the f-OFDM filter reduces out-of-band emission compared to the main window functions present in the literature and compared to OFDM, UFMC and FBMC technologies, which use of f-OFDM for 5G applications that require low tolerance to interference between subbands.

Keywords—Spectral Efficiency, Window Function, Windowed-Sinc Filter, f-OFDM, 5G.

Os autores fazem parte do Grupo INCOMM (Information and Communication Engineering Group) da Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (UFG), Goiânia-GO, Brasil, e-mail: maykoon.renan@gmail.com, flaviogcr@ufg.br.

I. INTRODUÇÃO

A OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [1] é eficiente para uma ampla variedade de serviços de comunicação digital, especialmente para banda larga móvel (MBB - *Mobile Broadband*), visto que a OFDM obtém alta eficiência espectral ao subdividir o espectro em subportadoras que se sobrepõem de forma ortogonal, o que proporciona à tecnologia OFDM resistência às condições ruins do meio, como atenuação de altas frequências e interferência intersimbólica (ISI - *Intersymbol Interference*). A OFDM utiliza um prefixo cíclico (CP - *Cyclic Prefix*), que é um tipo de redundância de informação, para reduzir os efeitos da ISI sobre o sinal de informação. Dentre as desvantagens da OFDM, destaca-se: o elevado PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) e as emissões fora de banda (OOBE - *Out-Of-Band Emission*) [2], [3].

A tecnologia OFDM é utilizada em diversos padrões de rede sem fio, tais como: Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) e LTE (*Long Term Evolution*). O 4G LTE é a principal tecnologia de comunicação móvel sem fio da atualidade, no entanto, com as demandas dos usuários, que crescem de forma exponencial, o 4G será em breve substituído pelo 5G [2]. O principal objetivo de evolução das redes de quarta geração para o 5G é baseada nos seguintes desafios que não foram/são efetivamente tratados pelo 4G, isto é, maior capacidade de canal, maior taxa de transmissão de dados, menor latência fim a fim, hiperconectividade, custo reduzido e melhoria na qualidade da experiência de navegação do usuário [2], [3]. Para atender a essa demanda, deseja-se manter as vantagens que a OFDM oferece e ao mesmo tempo diminuir suas desvantagens. Com essa motivação, estudos têm mostrado que algumas tecnologias de modulação para sistemas de comunicação sem fio de última geração podem apresentar baixas emissões fora de banda (OOBE) do sinal transmitido quando comparadas à tecnologia OFDM pelo fato de implantarem filtragem na forma de onda transmitida [3], como por exemplo, as tecnologias FBMC (*Filter Bank Multi-Carrier*) [4], UFMC (*Universal Filtered Multi-Carrier*) [5] e f-OFDM (*filtered-Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [6], [7].

A versatilidade proporcionada pela tecnologia f-OFDM (uso de diferentes subbandas para diferentes aplicações) e os ganhos obtidos em termos de eficiência espectral pode torná-la promissora para uso em diversas aplicações do 5G, quando comparada às tecnologias OFDM, UFMC e FBMC. Para tanto, a f-OFDM deve apresentar avanços significativos em termos

de redução da OOB, diminuição da BER e aumento da vazão. Isso é um motivador para este trabalho, isto é, este trabalho propõe uma função de janela baseada na distribuição de Nakagami para o Filtro FIR (*Finite Impulse Response*) utilizado na tecnologia f-OFDM com o objetivo de reduzir OOB e obter ganhos de desempenho em comparação às demais tecnologias comparadas.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: Na Seção II é feito um breve estudo sobre janelas; a Seção III apresenta a tecnologia f-OFDM e o filtro FIR do tipo *sinc* janelado utilizado por essa tecnologia; na Seção IV é apresentada uma proposta de janela ajustável de 2 parâmetros para o filtro FIR *sinc* janelado utilizado na tecnologia f-OFDM; na Seção V é avaliada a eficiência da janela proposta em comparação a outras funções de janela presentes na literatura: Blackman, Exponencial, Bartlett, Hamming, Gaussiana, Dolph-Chebyshev, Nuttall, Kaiser e Hann (também conhecida como janela Hanning) [8]. Além disso, o desempenho da tecnologia f-OFDM é comparada a outras tecnologias candidatas a serem utilizadas no 5G, sendo elas: OFDM, FBMC e UFMC, em termos de PSD (*Power Spectral Density*), OOB (*Out-Of-Band Emission*), BER (*Bit Error Rate*) e vazão (*Throughput*); na Seção VI são apresentadas as conclusões obtidas.

II. FUNÇÕES DE JANELAMENTO

Em processamento de sinais, uma função de janela é uma função matemática com valor zero fora de algum intervalo escolhido. Matematicamente, quando outra função ou forma de onda é multiplicada por uma função de janela, o produto também é valor zero fora do intervalo [8]. Janelas são frequentemente comparadas e classificadas em termos de suas características espectrais, como por exemplo: largura do lóbulo principal, *ripple ratio* (atenuação mínima do lóbulo lateral em relação ao lóbulo principal) e *roll-off* (parâmetro que descreve a distribuição de energia presente nos lóbulos laterais). Funções de janela são amplamente utilizadas para diferentes aplicações de processamento de sinais, como por exemplo: análise de sinal e estimativa espectral de potência [9], [10], projeto de filtro digital [11], [12].

Aplicando a transformada de Fourier a uma função de janela tem-se sua resposta em frequência que, para janelas simétricas, sempre pode ser expressa como uma série de cossenos. O exemplo mais simples disso é a janela retangular, definida como:

$$w_R(nT) = \begin{cases} 1, & |n| \leq \frac{N_w-1}{2} \\ 0, & \text{caso contrário,} \end{cases} \quad (1)$$

onde $n = 0, 1, 2, \dots, (N_w - 1)/2$ e N_w é o comprimento da janela. A resposta em frequência para uma janela retangular é definida como [8]:

$$w_R(e^{j\omega T}) = \sum_{n=0}^{(N_w-1)/2} w_R(nT) \cos(\omega nT). \quad (2)$$

Algumas funções de janelas foram propostas na literatura reescrevendo a janela retangular por meio de uma série de cossenos. Algumas janelas desta classe são as janelas Blackman, Hann e Hamming [8].

Uma função de janela pode ser do tipo fixa ou ajustável [13], [11]. As janelas fixas têm apenas um parâmetro independente responsável por controlar o comprimento da mesma (N_w). Janelas ajustáveis possuem dois ou mais parâmetros independentes, o comprimento da janela, como em janelas fixas e um ou mais parâmetros adicionais que podem controlar outras características da janela, *ripple ratio* e *roll-off*, por exemplo. As janelas ajustáveis tem sido propostas pela exploração de certas características de funções polinomiais (Gegenbauer e Chebyshev) [14], [15] e distribuições de probabilidade (Poisson e Gaussiana) [8], [16]. Dentre as janelas ajustáveis conhecidas na literatura, pode-se destacar: Dolph-Chebyshev [15] e Kaiser [9].

III. SISTEMA F-OFDM E PROJETO DE FILTRO *Sinc* JANELADO

Na f-OFDM, a alocação de recursos poderá ser mais flexível para diferentes tipos de serviços, ou seja, a largura de banda atribuída poderá ser dividida em várias subbandas e, em cada subbanda, um sistema OFDM convencional poderá ser adaptado para atender às necessidades de determinado tipo de serviço e às características do canal associado. Além disso, a f-OFDM também fornece reduções significativas no consumo da banda de guarda, levando a uma utilização mais eficiente do espectro [7].

Um esquema simplificado da tecnologia f-OFDM é representado na Figura 1. Como mencionado anteriormente, diferentes sistemas OFDM (possivelmente outras formas de onda) com diferentes tamanhos de subportadora, comprimento de CP e duração de TTI (*Transmission Time Interval*) podem estar contidos em diferentes subbandas [7].

Na f-OFDM, o transmissor gera o sinal OFDM com base no bloco atribuído de M subportadoras consecutivas que são mapeados em símbolos consecutivos por meio da IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) de ordem N [6]. Matematicamente, o sinal no transmissor é obtido da seguinte forma:

$$s(n) = \sum_{l=0}^{L-1} s_l(n - l(N + N_g)), \quad (3)$$

onde,

$$s_l(n) \triangleq \sum_{m=m'}^{m'+M-1} d_{l,m} e^{j2\pi mn/N}, \quad -N_g \leq n \leq N, \quad (4)$$

onde N_g é o tamanho do prefixo cíclico, $d_{l,m}$ é um conjunto de dados complexos na subportadora m do símbolo OFDM l , L denota o número de símbolos OFDM e $\{m', m'+1, \dots, m'+M-1\}$ é o intervalo entre subportadoras [7]. O sinal f-OFDM é obtido passando o sinal $s(n)$ através de um filtro FIR, da seguinte forma:

$$\tilde{s}(n) = s(n) * f(n). \quad (5)$$

No lado do receptor, o sinal recebido é primeiro passado através do filtro $f(-n)$, que corresponde ao filtro do transmissor. O sinal resultante é então passado através do receptor OFDM, após dividir o sinal filtrado em símbolos OFDM consecutivos e remover o CP, um comprimento- N FFT

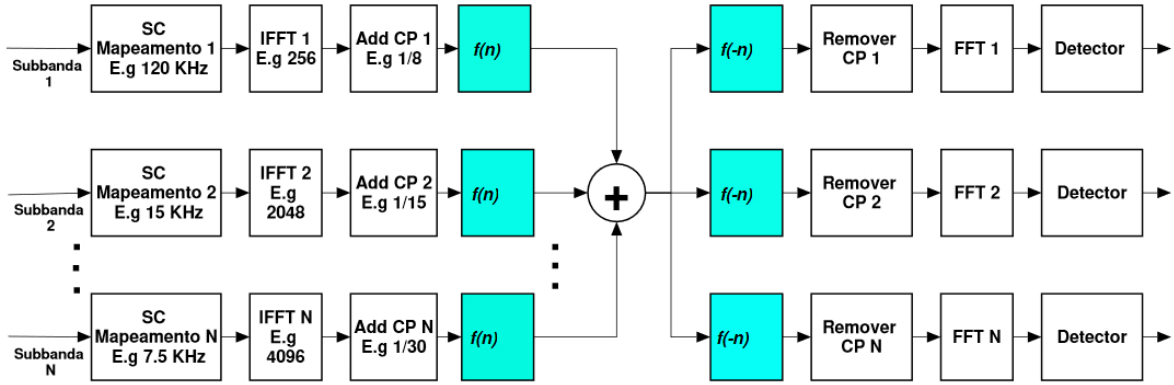


Fig. 1. Esquema de transmissão e recepção do sistema f-OFDM. Adaptado de [7].

é aplicado a cada símbolo OFDM. Após a equalização do canal, os símbolos de dados são extraídos das subportadoras correspondentes [6].

Em [6] é proposta uma abordagem para fornecer um equilíbrio entre a frequência e a localização temporal do filtro. O protótipo do filtro $f(n)$ é uma função $p(n)$ do tipo *sinc*, então sua resposta em frequência é retangular. Ao aplicar um truncamento suave ao filtro $f(n)$ por meio de uma função de janela $w(n)$, obtém-se um filtro causal do tipo *sinc* janelado, da seguinte forma:

$$f(n) \triangleq p(n) * w(n). \quad (6)$$

O filtro do tipo *sinc* janelado ($f(n)$) é estável e de fácil implementação. Quando aplicado na tecnologia f-OFDM sua resposta ao impulso possui lóbulos laterais que desvanecem rapidamente, o que reduz a ISI entre símbolos OFDM [7].

Na Seção IV, os autores propõem uma nova função de janela ($w(n)$) baseada na distribuição de Nakagami para o projeto de filtro *sinc* janelado com o objetivo de potencializar o uso da tecnologia f-OFDM em aplicações 5G e reduzir a interferência entre subbandas.

IV. PROPOSTA DE JANELA AJUSTÁVEL PARA O FILTRO FIR UTILIZADO NA TECNOLOGIA F-OFDM

A distribuição de Nakagami [17] tem sido usada para modelar atenuação de sinais em redes sem fio que percorrem múltiplos caminhos [18], [19] e análise espectral [20]. Devido sua aplicabilidade em telecomunicações, a distribuição de Nakagami foi escolhida para a construção de uma janela ajustável com aplicação em um projeto de filtro FIR *sinc* janelado para tecnologia f-OFDM. A janela proposta tem como ponto de partida a sua PDF (*Probability Density Function*), definida como [21]:

$$f(t; m, \Omega) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} t^{2m-1} e^{-\frac{m}{\Omega}t^2}, m \geq 1/2, \Omega > 0, \quad (7)$$

onde m é o parâmetro de forma, Ω é o parâmetro de amplitude e $\Gamma(\cdot)$ representa a função Gamma. Posteriormente é aplicada

a FCT (*Fourier Cosine Transform*) em (7), dada por:

$$W_{\Omega}(\omega) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} f(t) \cos(\omega t) dt, \\ = \frac{2}{\pi} \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} \int_0^{\infty} t^{2m-1} e^{-\frac{m}{\Omega}t^2} \cos(\omega t) dt. \quad (8)$$

De acordo com [22], a FCT de (8) pode ser calculada da seguinte forma. Seja $h(t)$ uma função do tipo:

$$h(t) = t^{2n} g(t), \quad (9)$$

a FCT de $h(t)$ pode ser calculada da seguinte forma:

$$W_{\Omega}(\omega) = H(\omega) = (-1)^n \frac{d^{2n} G(\omega)}{d\omega^{2n}}, \quad (10)$$

onde $G(\omega)$ é dada por [22]:

$$G(\omega) = \frac{2}{\pi} \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} \int_0^{\infty} e^{-\frac{m}{\Omega}t^2} \cos(\omega t) dt, \\ = \frac{2}{\pi} \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} \frac{\sqrt{\pi} e^{-\omega/4\frac{m}{\Omega}}}{2\frac{m}{\Omega}}. \quad (11)$$

Substituindo (11) em (10), tem-se:

$$W_{\Omega}(\omega) = (-1)^{2m-1} \frac{2}{\pi} \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} \frac{d^{2m-1} \left(\frac{\sqrt{\pi} e^{-\omega/4\frac{m}{\Omega}}}{2\frac{m}{\Omega}} \right)}{d\omega^{2m-1}}. \quad (12)$$

A janela de Nakagami pode ser estimada para valores de $m \geq 1/2, \forall m \in \mathbb{R}$. Entretanto, foi feita uma análise para a variação de m a fim de potencializar a eficiência espectral. Constatou-se que para $m \geq 3$, a ordem da derivada em (12) torna a estimação da janela cada vez mais complexa e não proporciona melhorias em termos de eficiência espectral. Então, assume-se $m = 5/2$. Logo:

$$W_{\Omega}(\omega) = (-1)^{2\frac{5}{2}-1} \frac{2}{\pi} \frac{2\frac{5}{2}}{\Gamma(\frac{5}{2})\Omega^{\frac{5}{2}}} \frac{d^{2\frac{5}{2}-1} \left(\frac{\sqrt{\pi} e^{-\omega/4\frac{5}{2\Omega}}}{2\frac{5}{2\Omega}} \right)}{d\omega^{2\frac{5}{2}-1}}, \quad (13)$$

onde $\Gamma(\frac{5}{2})$ pode ser calculado pela seguinte relação:

$$\Gamma(z) = \int_0^{\infty} x^{z-1} e^{-x} dx, \\ \Gamma\left(\frac{5}{2}\right) = \int_0^{\infty} x^{\frac{5}{2}-1} e^{-x} dx = \frac{3}{4} \sqrt{\pi}, \quad (14)$$

logo,

$$\begin{aligned} W_{\Omega}(\omega) &= \frac{2}{\pi} \frac{8^{\frac{5}{2}}}{6^{\frac{5}{2}} \Omega^{\frac{5}{2}}} \frac{d^4 e^{-\omega/4a}}{d\omega^4}, \\ &= \frac{2}{75\pi} e^{-\Omega\omega^2/10} (75 - 30\Omega\omega^2 + \Omega^2\omega^4), \end{aligned} \quad (15)$$

então, para $\omega = 2\pi n/N_w$ a janela de Nakagami é dada por:

$$w_{\Omega} = \lambda e^{-\Omega \left(\frac{2\pi n}{N_w}\right)^2 / 10} \left[75 - 30\Omega \left(\frac{2\pi n}{N_w}\right)^2 + \Omega^2 \left(\frac{2\pi n}{N_w}\right)^4 \right], \quad (16)$$

onde $\lambda = 2/75\pi$ e $-(N_w - 1)/2 \leq n \leq (N_w - 1)/2$.

A janela de Nakagami tem a vantagem de não ter expansão em série em sua função de domínio de tempo (o que é computacionalmente mais eficiente) diferente de algumas das janelas ajustáveis presentes na literatura que apresentam essa desvantagem, por exemplo: Dolph-Chebyshev e Kaiser.

A janela de Nakagami gera uma família de funções de janela, como mostra a Figura 2. Com o ajuste dos seus parâmetros: o comprimento da janela (N_w) e o parâmetro de amplitude (Ω), pode-se controlar a largura do lóbulo principal, *roll-off* e *ripple ratio* para várias aplicações, dentre elas, para aplicação no projeto de filtro *sinc* janelado na tecnologia f-OFDM.

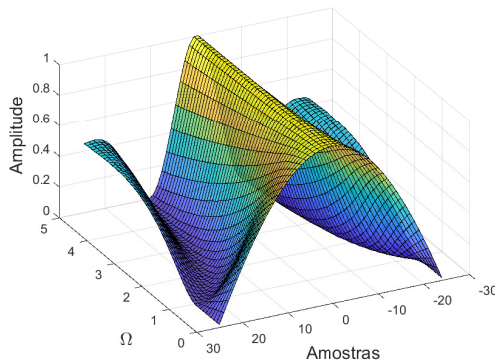


Fig. 2. Classe de janelas de Nakagami no domínio do tempo para diferentes valores de Ω .

V. RESULTADOS

Nesta seção, apresenta-se os resultados em termos de densidade espectral de potência (PSD), emissão fora de banda (OOBE), taxa de erro de *bit* (BER) e vazão (*Throughput*) para as técnicas de modulação OFDM, UPMC, FBMC e f-OFDM.

A Figura 3 apresenta uma análise de desempenho em termos de densidade espectral de potência (PSD) para a f-OFDM utilizando 10 diferentes tipos de funções de janelas no filtro digital *sinc* janelado, sendo elas: Exponencial, Bartlett, Hamming, Gaussiana, Dolph-Chebyshev, Nuttall, Kaiser, Hann, Blackman e a janela proposta (Nakagami). Pode-se avaliar as funções de janela por meio da eficiência espectral que mede a eficiência com que um dado sistema de comunicação usa a largura de banda de um canal. Analisando a Figura 3, para uma largura de banda de 10MHz, constata-se que o sistema f-OFDM (janela de Nakagami para o filtro *sinc* janelado)

apresentou uma menor emissão fora de banda(OOBE), onde a PSD apresentou um decaimento até -200dB , ou seja, obteve o melhor desempenho no uso do espectro, para um $\Omega = 0,94$, seguido da tecnologia f-OFDM (janela de Blackman para o filtro *sinc* janelado) que obteve uma PSD com um decaimento até -190dB e, a tecnologia f-OFDM (janela de Hann para o filtro *sinc* janelado) por sua vez obteve uma PSD com um decaimento até -180dB .

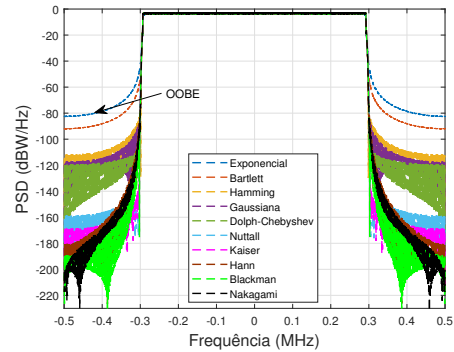


Fig. 3. PSD das janelas utilizadas na tecnologia f-OFDM.

Também é apresentada a PSD para as tecnologias OFDM, UPMC, FBMC e f-OFDM, sendo a última utilizando a janela de Hann e janela de Nakagami. De acordo com a Figura 4, para uma largura de banda de 10MHz, constata-se que os sistemas f-OFDM (janela de Nakagami para o filtro utilizado) e f-OFDM (janela de Hann para o filtro utilizado) apresentaram uma menor emissão fora de banda (OOBE), pois a PSD apresentou um decaimento até -200dB e -180dB , respectivamente, seguido pelo sistema FBMC que apresentou uma PSD com um decaimento até -160dB . Já a OFDM obteve o pior desempenho em termos de OOBE, pois a PSD apresentou um decaimento de até -40dB , o que já era esperado, já que é uma das desvantagens desta técnica de modulação.

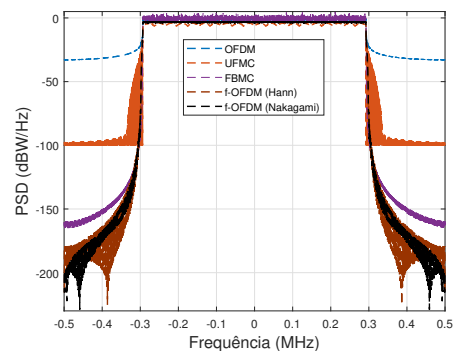


Fig. 4. PSD das janelas utilizadas na tecnologia f-OFDM.

A Figura 5 apresenta o desempenho dos sistemas OFDM, UPMC, FBMC e f-OFDM em termos da relação entre BER e SNR (*Signal-to-Noise Ratio*). O gráfico da Figura 5 foi obtido com uma média de 30 simulações. Analisando a Figura 5, de modo geral, a técnica de modulação f-OFDM com a Janela de Hann e com a janela de Nakagami apresentaram

desempenho similar entre elas e, os melhores desempenhos quando comparadas às outras técnicas de modulação.

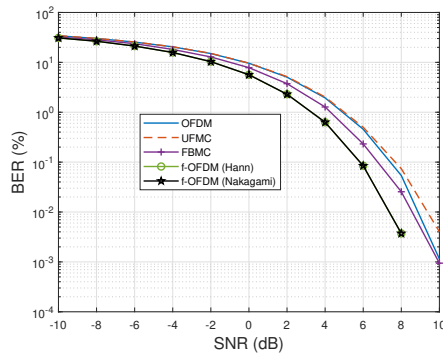


Fig. 5. BER para as técnicas de modulação OFDM, UFMc, FBMC e f-OFDM

A Figura 6 apresenta a relação entre taxa de transferência de dados (vazão) e SNR para um cenário de transmissão/recepção usando as modulações OFDM e f-OFDM. Nesta simulação compara-se o desempenho do tecnologia OFDM utilizada atualmente em redes LTE com a tecnologia f-OFDM, uma possível substituta da tecnologia OFDM nas redes 5G. Analisando a Figura 6 percebe-se que a tecnologia f-OFDM (utilizando a janela proposta) apresentou uma ligeira vantagem em termos de vazão para uma qualidade de canal inferior, principalmente entre 4dB e 11dB, aproximadamente, em relação à tecnologia OFDM.

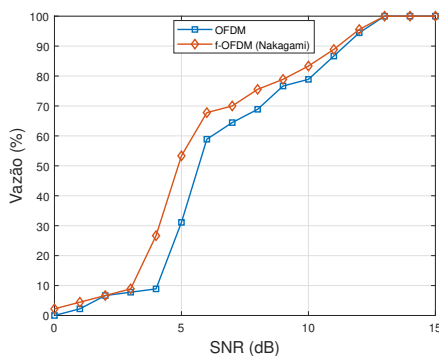


Fig. 6. Vazão de dados em um cenário simplificado de rede móvel utilizando as tecnologias OFDM e f-OFDM (janela de Nakagami).

VI. CONCLUSÕES

Com o intuito de potencializar os ganhos de OOB e BER ao se substituir a tecnologia f-OFDM pela tradicional OFDM, este trabalho propôs uma nova janela ajustável baseada na distribuição de Nakagami com o intuito de aplicá-la ao filtro *sinc* janelado da f-OFDM. A janela de Nakagami apresentou resultados interessantes para densidade espectral de potência, reduzindo a OOB quando aplicada ao filtro *sinc* janelado, além disso, mostrou-se ser uma janela com desempenho superior à janela de Hann, que por sua vez é frequentemente utilizada na literatura em simulações envolvendo a f-OFDM.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior -Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

REFERÊNCIAS

- [1] B. Lathi, *Modern Digital and Analog Communication Systems (The Oxford Series in Electrical and Computer Engineering)*, 4th ed. New York: Oxford University Press, 1993.
- [2] Y. Liu, X. Chen, Z. Zhong, B. Ai, D. Miao, Z. Zhao, J. Sun, Y. Teng, and H. Guan, "Waveform design for 5g networks: Analysis and comparison," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 19 282–19 292, 2017.
- [3] A. Al-Dulaimi, X. Wang, and C.-L. I, *5G Networks: Fundamental Requirements, Enabling Technologies, and Operations Management*, 1st ed. Wiley-IEEE Press, 2018.
- [4] F. Schaich, "Filterbank based multi carrier transmission (fbmc) — evolving ofdm: Fbmc in the context of wimax," *European Wireless Conference (EW)*, 2010.
- [5] V. Vakilian, T. Wild, F. Schaich, S. ten Brink, J.-F. Frigon, and E. P. de Montreal, "Universal-filtered multi-carrier technique for wireless systems beyond lte," *Globecom 2013 Workshop - Broadband Wireless Access*, 2013.
- [6] J. Abdoli, M. Jia, J. Ma, and H. Technologies, "Filtered ofdm: A new waveform for future wireless systems," *IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 2015.
- [7] X. Zhang, M. Jia, L. Chen, J. Ma, J. Qiu, C. R. . D. Centre, and H. Technologies, "Filtered-ofdm — enabler for flexible waveform in the 5th generation cellular networks," *IEEE Globecom, San Diego*, 2015.
- [8] F. J. Harris, "On the use of windows for harmonic analysis with the discrete fourier transform," *Proceedings of the IEEE*, vol. 66, no. 1, pp. 51–83, 1978.
- [9] J. F. Kaiser and R. W. Schafer, "On the use of the io-sinh window fax spectrum analysis," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 28, no. 1, pp. 105–107, 1980.
- [10] S. Kumar, K. Singh, and R. Saxena, "Analysis of dirichlet and generalized hamming window functions in the fractional fourier transform domains," *Elsevier Signal Processing*, vol. 2011, no. 91, p. 600–606, 2011.
- [11] S. W. A. Bergen and A. Antoniou, "Design of nonrecursive digital filters using the ultraspherical window function," *EURASIP Journal on Applied Signal Processing*, vol. 12, pp. 1910–1922, 2005.
- [12] M.-F. Tang and B. Su, "Joint window and filter optimization for new waveforms in multicarrier systems," *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2018, no. 63, 2018.
- [13] D. F. Elliott, *Handbook of Digital Signal Processing: Engineering Applications*. San Diego, California, USA: Academic Press, 1987.
- [14] A. G. Deczky, "Unispherical windows," *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, no. 1, pp. 11–85, 2001.
- [15] P. Lynch, "The dolph-chebyshev window: A simple optimal filter," *American Meteorological Society*, 1996.
- [16] J. O. Smith, *Spectral Audio Signal Processing*. Center for Computer Research in Music and Acoustics (CCRMA), Stanford University, USA: W3K Publishing, 2011.
- [17] M. Nakagami, "The m-distribution—a general formula of intensity distribution of rapid fading," *Statistical Methods in Radio Wave Propagation*, pp. 3–6, 1960.
- [18] F. Ramos-Alarcon, V. Kontorovich, and M. Lara, "Outage probability in nakagami channels using fade duration distribution approximate results," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 58, no. 4, pp. 1009–1013, 2010.
- [19] R. Sanchez-Iborra, M.-D. Cano, and J. Garcia-Haro, "Performance evaluation of qoe in voip traffic under fading channels," *World Congress on Computer and Information Technology (WCCIT)*, 2013.
- [20] D. Xie and W. Zhang, "Estimating speech spectral amplitude based on the nakagami approximation," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 21, no. 11, pp. 1009–1013, 2014.
- [21] A. Papoulis and S. U. Pillai, *Probability, Random Variables and Stochastic Processes Athanasios*, 4th ed. Boston: McGraw-Hill, 2002.
- [22] A. Erdelyi, W. Magnus, F. Oberhettinger, and F. G. Tricomi, *Tables of Integral Transforms*. California Institute of Technology, USA: McGraw-Hill Book Company, Inc., 1954.