Análise e projeto de ltro FIR aplicado à tecnologia F-OFDM

Salatyel Fellipe da Silva, Leonardo L. de Assis Silva, Flávio Geraldo C. Rocha

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação (EMC) – Universidade Federal de Goiás (UFG) – Av. Universitária, n.º 1488 - quadra 86 - bloco A - 3º piso - Setor Leste Universitário – Goiânia – GO – Brasil

ssalson@hotmail.com, leonardolucas.a.s@gmail.com, flaviogcr@ufg.br

Resumo. *Uma tecnologia candidata a ser utilizada na nova geração de comunicação móvel, o 5G, é a modulação F-OFDM (Filtered-Orthogonal Frequency Division Multiplexing), que consiste basicamente na aplicação de ltros nas sub-bandas da modulação OFDM. Técnicas como o janelamento permitem o projeto de ltros do tipo FIR (Finite Impulse Response) com desempenho variável em função da janela escolhida, mas que em geral fornece maior e ciência ao processo de transmissão e recepção de sinais de dados quando comparada à modulação OFDM. Neste artigo são analisados diferentes tipos de janelas para o ltro FIR a ser utilizado na F-OFDM. Além disso, neste artigo é proposto o uso de técnicas de formatação de pulso para formar o protótipo do ltro FIR com o objetivo de aumentar o seu desempenho. Com o intuito de avaliar a proposta do artigo, são conduzidas simulações de transmissão de imagens utilizando a modulação F-OFDM em comparação à modulação OFDM em termos de BER (Bit Error Rate). Os resultados obtidos nas simulações indicam que o desempenho da F-OFDM é em geral superior ao obtido com a modulação OFDM, mas variável conforme o projeto de ltro utilizado. Nas simulações foram obtidos valores reduzidos de BER utilizando o ltro proposto: uma combinação da técnica de formatação de pulso aplicada ao protótipo do ltro FIR com a escolha adequada da janela a ser utilizada. Os resultados obtidos indicam a relevância do projeto do ltro da modulação F-OFDM para torná-la candidata a ser utilizada em novas arquiteturas de comunicações de dados, incluindo o 5G.*

Abstract. *A candidate technology to be used in the new generation of mobile communication, the 5G, is the F-OFDM (Filtered-Orthogonal Frequency Division Multiplexing) modulation, which basically consists of the application of lters in the OFDM modulation subbands. Techniques such as windowing allow the design of FIR (Finite Impulse Response) lters with variable performance depending on the chosen window, but which generally provides greater e ciency in the transmission and reception of data signals when compared to the OFDM modulation. In this article di erent types of windows are analyzed for the FIR lter design to be used in F-OFDM. In addition, this article proposes the use of pulse shaping techniques to design the FIR lter prototype in order to increase its performance. In order to evaluate the proposal of the article, simulations of image*

transmission using F-OFDM modulation are carried out in comparison to OFDM modulation in terms of BER (Bit Error Rate). The results obtained in the simulations indicate that the performance of F-OFDM is generally higher than that obtained with OFDM modulation, but variable according to the lter design. In simulations, reduced BER values were obtained using the proposed lter: an application of the pulse shaping technique to the FIR lter prototype combined to the appropriate choice of the window to be used in the lter. The results indicate the relevance of the F-OFDM modulation lter design to make F-OFDM a modulation candidate to be used in new data communications architectures, including 5G.

1. Introdução

As tecnologias evoluem continuamente, e recentemente tem sido propostas alternativas a serem utilizadas na próxima geração de sistemas de comunicação móvel, o 5G. Para esse novo padrão de comunicação, espera-se um aumento signi cativo na taxa de dados em relação a geração antecessora (com a nova tecnologia espera-se taxas acima de 1 Gbps). Além disso, a tendência é que a quantidade de equipamentos usuários (*User Equipments* – UEs) aumente muito, o que não poderá ser suportado pelas tecnologias existentes. Visando responder aos desa os do 5G, tecnologias promissoras, tais como MIMO (*Multiple-Input and Multiple-Output*) de larga escala (massive MIMO – ma-MIMO), protocolos para dispositivos inteligentes e autônomos, comunicações utilizando ondas milimétricas (mmWave), entre outras têm sido analisadas de modo combinado [Zhang et al. 2015], [Abdoli, Jia e Ma 2015], [Guerra 2016].

Adicionalmente às tecnologias supracitadas, é preciso citar tecnologias de modulação e multiplexação de dados, indispensáveis para se obter a taxa de dados solicitada pelo 5G, assim como a baixa latência requerida. A OFDM (*Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) tem sido a principal tecnologia de modulação e multiplexação de dados para padrões de comunicações móveis sem o, incluindo o padrão IEEE 802.11 e também o 4G.

Entretanto, para viabilizar a próxima geração de comunicação móvel, são necessárias formas de ondas alternativas, as quais não apresentem as limitações existentes em sistemas OFDM ou que pelo menos não apresentem custos ou limitações tecnológicas proibitivas para sua utilização em sistemas 5G [Guerra 2016]. Em geral, os novos requisitos de desempenho enfrentados pela forma de onda 5G podem ser atendidos pela F-OFDM (*Filtered-Orthogonal Frequency-Division Multiplexing*) e a e ciência geral do espectro pode ser melhorada. Entre todas as candidatas à forma de onda 5G a F-OFDM aparece como a mais promissora, em termos de desempenho geral, complexidade associada ao custo e viabilidade no caminho de evolução do atual 4G para a geração futura quando comparada a outras candidatas, tais como GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*), FBMC (*Filter Bank Multi-Carrier*) e UFMC (*Universal Filtered Multi-Carrier*) [Zhang et al. 2015].

A principal diferença entre a modulação F-OFDM e a modulação OFDM é que a F-OFDM utiliza um ltro FIR (*Finite Impulse Response*) para ltrar a parte do espectro desejada, potencializando as frequências de interesse e mitigando as demais. O ltro FIR

utilizado na F-OFDM emprega uma técnica chamada de janelamento. De fato, as funções de janelamento são amplamente utilizadas no processamento digital de sinais para aplicações em análise e estimativa de sinais e projeto de ltros digitais. As janelas utilizadas para calcular a transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT) reduzem os efeitos de vazamento de sinal, mas não conseguem eliminar totalmente este efeito. Além disso, cada tipo de janela afeta o espectro de uma maneira diferente. Muitas janelas diferentes foram propostas ao longo do tempo, cada uma com suas vantagens e desvantagens em relação às outras. Algumas são mais e cazes para tipos especí cos de sinais (por exemplo, sinais senoidais), outras melhoram a resolução de frequência (isto é, facilitam a detecção da frequência exata de um pico no espectro), já algumas melhoram a precisão da amplitude (ou seja, indicam com maior precisão o nível do pico). Portanto, o tipo de janela deve ser escolhido para cada aplicação especí ca objetivando os melhores resultados [Patil 2015].

Duas das principais aplicações das janelas no processamento digital de sinais são: análise de dados baseada em Transformada Rápida de Fourier (FFT) e projeto de ltros, tais como ltros de Resposta de Impulso Finita (FIR – *Finite Impulse Response*) e ltros de Resposta de Impulso In nita (IIR – *In nite Impulse Response*). Para análise de FFT, as janelas são empregadas para suprimir o chamado "efeito de vazamento" e, para o projeto de ltros FIR utilizando o "método de janelas", as oscilações de Gibbs são atenuadas (o chamado fenômeno de Gibb ocorre na forma de oscilações indesejáveis perto das bordas da largura de banda do ltro) [Patil 2015]. O ltro FIR, que é o foco deste artigo, é um tipo de ltro digital caracterizado por uma resposta ao impulso que se torna nula após um tempo nito, diferentemente do ltro IIR que possui duração in nita.

A resposta ao impulso dos ltros ideais é de duração in nita, porém, não é possível avaliar a resposta de frequência correspondente e implementar o ltro por hardware ou software. Assim, a resposta ao impulso deve ser truncada em ambas as extremidades em relação à faixa central, todavia um corte súbito tenderá a causar efeitos indesejáveis. A escolha adequada de janelas para o ltro poderá reduzir tais efeitos indesejados.

Neste artigo, serão analisadas algumas janelas já conhecidas nos estudos de processamento de sinais. Essa análise de diferentes tipos de janelas tem por objetivo encontrar aquelas com melhores características a m de, conciliadas a técnicas de formatação de pulso, melhorar o desempenho do projeto de ltro FIR a ser utilizado na F-OFDM, com o intuito de torná-la uma tecnologia candidata a ser utilizada na tecnologia de comunicação móvel de 5ª geração (5G).

O restante do artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2 é apresentada a tecnologia F-OFDM; a seção 3 discorre sobre o projeto do Filtro FIR utilizado na F-OFDM; a seção 4 descreve diferentes tipos de janelas empregada no Filtro FIR; a seção 5 apresenta uma análise comparativa das janelas descritas na seção 4; a seção 6 apresenta a proposta de uso e ciente de projeto de ltro FIR combinando a escolha apropriada de janela a uma técnica de formatação de pulso, ainda na seção 6 são apresentados os resultados obtidos em termos de BER na transmissão de imagens, comparando o F-OFDM com o OFDM; por m, na seção 7, são apresentadas as conclusões obtidas neste trabalho.

2. F-OFDM: Aplicação de um Filtro FIR para melhoria de desempenho do OFDM

A técnica de modulação OFDM consiste em um esquema de transmissão e de recepção baseado em multiportadoras. Na OFDM, os dados são sempre multiplexados utilizando-se primeiramente algum esquema de modulação digital (QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) ou PSK (*Phase Shift Keying*), por exemplo), por isso a OFDM é referida de forma intercambiável na literatura como modulação e multiplexação. Em seguida, esses dados modulados são colocados em paralelo, sendo realizado o processamento desses dados através da IFFT(*Inverse Fast Fourier Transform*), transformando assim o sinal no domínio do tempo. Posteriormente, é adicionado o pre xo cíclico (*Cyclic Pre x* – CP) para combater a ISI (*Inter Symbol Interference*). Os dados modulados no domínio do tempo são convertidos de digitais para analógicos e então serializados. Por m, o sinal é transladado de banda-base para banda passante via multiplicação pela frequência da portadora para, então, ser transmitido. Do lado do receptor é feito o mesmo procedimento, basicamente, mas na ordem contrária e utilizando-se a FFT no lugar da IFFT, visto que a informação original no transmissor encontra-se no domínio da frequência [Guerra 2016].

O sistema OFDM apresenta diversas vantagens, tais como: a capacidade de transformar canais de comunicação com seletividade em frequência em canais aproximadamente planos, robustez contra desvanecimento multipercurso, fácil implementação através do uso de algoritmos baseados na transformada rápida de Fourier (*Fast Fourier Transform* – FFT). Apesar dessas vantagens, a modulação OFDM também possui certas características indesejáveis pelo fato de ter uma grande sensibilidade na sincronização de frequência. Como já mencionado, sistemas de comunicações baseados no OFDM podem utilizar o pre xo cíclico para combater os efeitos da Inteferência Intersimbólica (ISI), o qual funciona como uma redundância para o sinal transmitido e que está sujeito à dispersão temporal do canal [Guerra 2016].

Para evitar as limitações da OFDM acima mencionadas e para enfrentar os novos desa os que surgem com a novas gerações de comunicações de dados, foi desenvolvido a F-OFDM (OFDM ltrado). Com divisão e ltragem baseadas em sub-bandas, sistemas F-OFDM independentes estão estreitamente contidos na largura de banda atribuída. Desta forma, a F-OFDM é capaz de superar as desvantagens da OFDM enquanto retém as suas vantagens [Zhang et al. 2015; Abdoli, Jia e Ma 2015]. Para habilitar a ltragem baseada em sub-banda e, assim, aproveitar os benefícios sugeridos pela F-OFDM, são necessários projetos e cientes de ltros. Em geral, o projeto do ltro envolve a negociação (*trade-o*) entre as características do domínio do tempo e da frequência, e também é fundamentado pela complexidade da implementação. O vazamento de energia do sinal no domínio do tempo deve ser contida para mitigar a interferência entre símbolos (ISI), também é interessante melhorar a nitidez da região de transição no domínio da frequência, com o intuito de reduzir interferência entre canais vizinhos (ICI - *Inter Carrier Interference*).

3. Projeto e implementação do ltro FIR para o F-OFDM

Para projetar o ltro FIR com janelamento, dois parâmetros devem ser selecionados: a frequência de corte, f_c, e o comprimento do *kernel* do ltro, M. A frequência de corte é expressa como uma fração da taxa de amostragem e, portanto, deve estar entre 0 e 0,5. O valor para M de ne o fator de *roll-o* (o quão rápida a amplitude da resposta em frequência de uma função decai), o valor de M está relacionado com a lagura de banda de transição B por meio da seguinte aproximação [Smith 1999]:

$$M \approx \frac{4}{B} \tag{1}$$

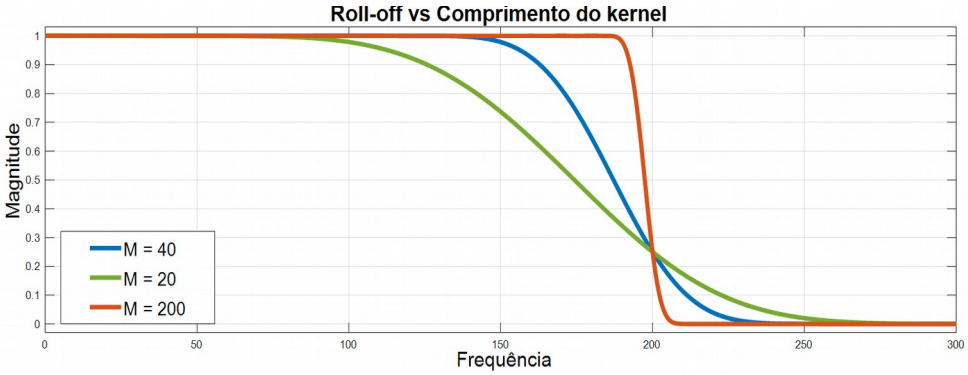


Figura 1. Comparação do *roll-o* de acordo com o valor de *M*

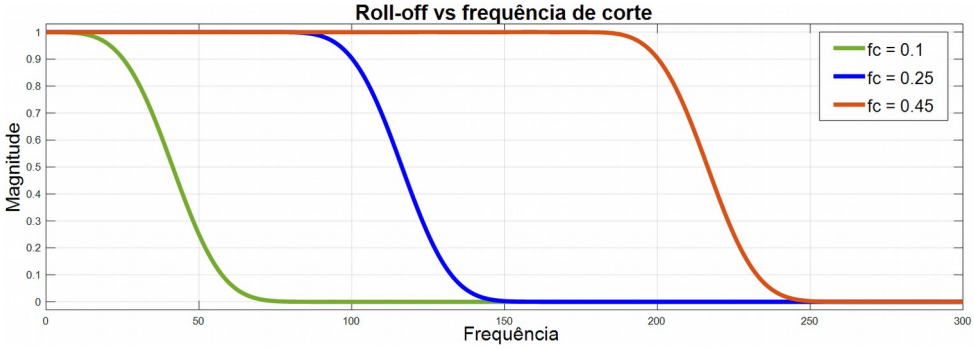


Figura 2. Comparação do *roll-o* de acordo com o valor da f_C

Na Figura 1, B pode ser visto como a distância entre as frequências em que a função sai da amplitude 1 para 0. É possível perceber que quanto maior o valor de M, mais rápida será a taxa de decaimento da amplitude em função da frequência (fator de *roll-o*). A largura de banda de transição também é expressa como uma fração da frequência de amostragem, e deve estar entre 0 e 0,5. A forma da resposta em frequência não depende do valor da frequência de corte, o formato do espectro será o mesmo, todavia deslocado na frequência (Figura 2)[Smith 1999]. Todas as guras deste trabalho foram obtidas por meio de simulações utilizando o software MATLAB da MathWorks®.

No domínio do tempo, o janelamento signi ca multiplicar a função $h_D(n)$ por uma função de janela de duração nita $w(n)$ para se obter uma ltragem do sinal. Lembre-se que multiplicação de duas funções no domínio do tempo (Figura 3e) é equivalente a convolução destas funções no domínio da frequência (Figura 3f). A função utilizada para a janela $w(n)$ pode resultar em um ltro com resposta truncada, como aquela obtida utilizando-se uma janela retangular (Figura 3e), ou pode apresentar transições suaves para zero em suas duas extremidades, de modo a evitar saltos abruptos no início e no nal da resposta do ltro.

Além disso, o janelamento fornece uma localização de tempo razoável para o símbolo na resposta ao impulso do ltro e, assim, mantém a interferência intersimbólica (ISI) do sinal F-OFDM dentro de um limite aceitável [Zhang et al. 2015].

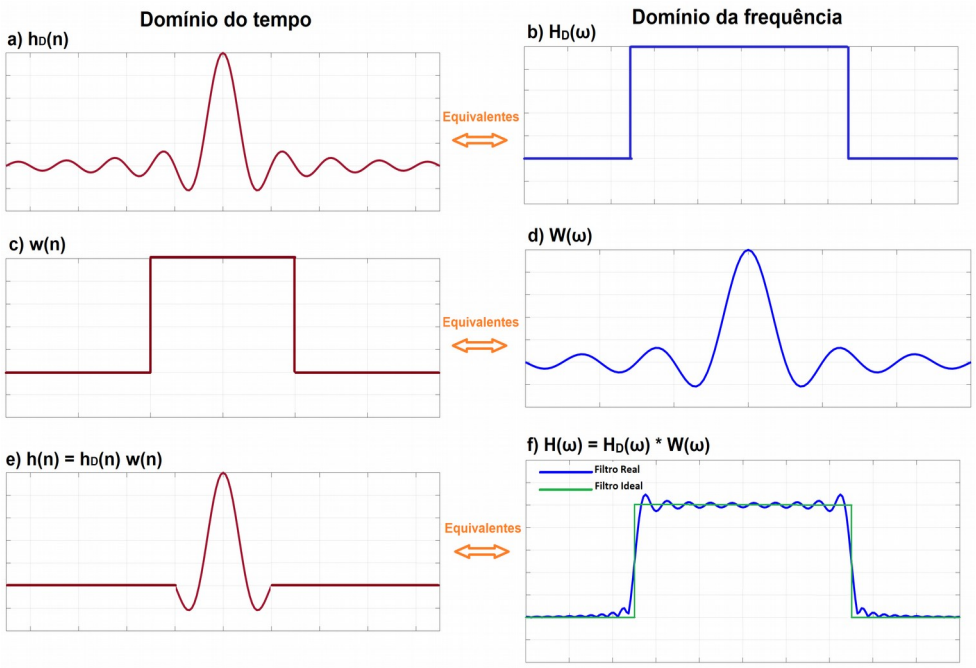


Figura 3. Passo a passo do funcionamento do ltro FIR

Como o tempo requerido para uma convolução é proporcional ao comprimento dos sinais, a equação (1) expressa uma negociação (*trade-o*) entre o tempo de computação (tamanho de M) e a qualidade do ltro (o valor de B). Quanto maior o valor de M, mais recursos computacionais são exigidos, porém a qualidade do ltro é melhor, já que B será menor (*roll-o* mais rápido), ou seja, o ltro se aproximará de sua resposta ideal (Figura 4). Após f_c e M terem sido selecionados, a resposta do ltro é calculada a partir da seguinte equação:

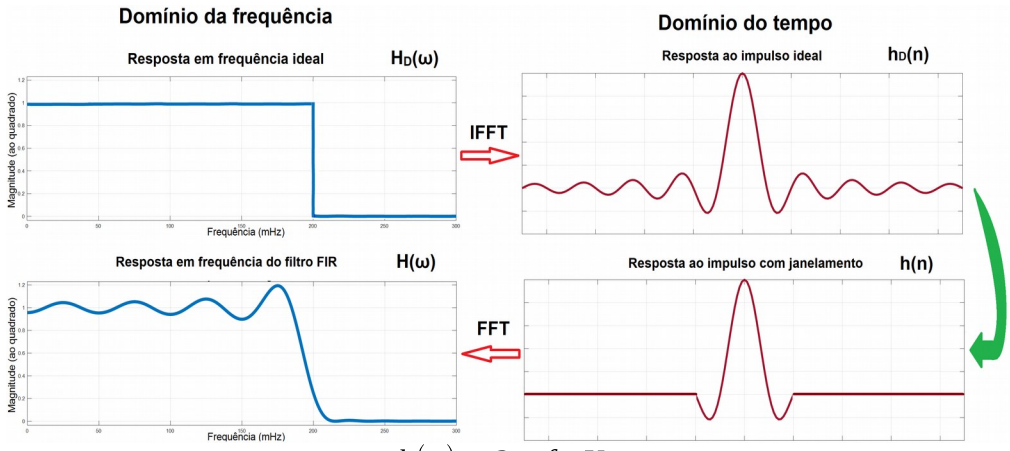
$$h(n) = K\, h_D(n)\, w(n) \tag{2}$$

Na equação (2) tem-se uma constante K, um formato de pulso $h_D(n)$ (sinc, por exemplo) com deslocamento $M/2$ e a janela w(n) a ser utilizada. Para o ltro ter ganho unitário em DC, a constante K deve ser escolhido de tal forma que a soma de todas as

amostras seja igual a um. Alguns cuidados devem ser tomados na escolha da função $h_D(n)$, por exemplo, se for utilizada a função sinc a equação (3) é obtida de (2):

$$h(n) = K \frac{\sin[2\pi n f_C(n - M/2)]}{n - M/2} w(n) \tag{3}$$

onde, para $n = M/2$, tem-se:



$$h(n) = 2\pi f_C K \tag{4}$$

Figura 4. Respostas ideais (em cima) e após o janelamento (embaixo).

No projeto do ltro para o F-OFDM, avalia-se a resposta ao impulso do ltro $h_D(n)$ desejada a partir da resposta em frequência $H_D(\omega)$ desejada e aplica-se a janela apropriada. A resposta em frequência do ltro $H_D(\omega)$ e a correspondente resposta ao impulso $h_D(n)$ estão relacionadas pela transformada inversa de Fourier. O subscrito D é utilizado para distinguir entre a resposta ao impulso ideal e a resposta obtida na prática, onde $h_D(n)$ é de nido por:

$$h_D(n) = \int_{-\pi}^{\pi} H_D(\omega) e^{j\omega n} d\omega \tag{5}$$

O ltro passa-baixa padrão é aquele com uma resposta de frequência retangular, isto é, cuja resposta ao impulso é a função sinc, com uma largura de banda apropriada. Este ltro é ideal no sentido de que não causa distorção na banda passante, enquanto fornece total rejeição fora de banda. Para implementação prática, a função sinc é truncada suavemente *(soft-truncated)* com diferentes funções de janela [Abdoli, Jia e Ma 2015]. Diferentes funções para a janela $w(n)$ são apresentadas e discutidas na próxima seção.

4. Funções para a janela do ltro FIR

Existem diferentes janelas utilizadas em ltros FIR, desde a mais simples (janela retangular) até as mais complexas (janela Kaiser, por exemplo). O principal objetivo dessas janelas é truncar suavemente a resposta ao impulso do ltro para gerar um ltro de comprimento xo com amplitude máxima dentro da largura de banda de interesse do ltro e amplitude mínima fora dela. A escolha apropriada da janela tenta conciliar os melhores resultados de ISI no domínio do tempo e de ICI (*Inter Carrier Interference*) no domínio da frequência,

aumentado assim o desempenho do F-OFDM em relação ao OFDM. Nesta seção são detalhadas algumas janelas frequentemente utilizadas em ltros FIR.

4.1. Retangular

A função retangular é a janela mais simples utilizada por um ltro FIR, ela é de nida pela seguinte equação:

$$w(n) = 1\,,\ 0 \le n \le M \tag{6}$$

onde M é o comprimento do ltro (ordem do ltro) e n assume M+1 valores no intervalo [0,M].

4.2. Hamming

A janela de Hamming é projetada para minimizar os picos dos lóbulos laterais. A janela de Hamming é calculada a partir da seguinte equação:

$$w(n) = 0{,}54 - 0{,}46\cos\left(\frac{2\pi n}{M}\right),\ 0 \le n \le M \tag{7}$$

4.3. Hanning (Cosseno levantado)

A janela de Hanning também é conhecida como janela Hann, ela é calculada a partir da seguinte equação:

$$w(n) = 0{,}5 - 0{,}5\cos\left(\frac{2\pi n}{M}\right),\ 0 \le n \le M \tag{8}$$

A janela de Hanning é um caso especial da janela cosseno levantado, quando α = 1. A janela cosseno levantado é calculada por meio de:

$$w(n) = 0{,}5 - 0{,}5\cos\left[\left(\frac{2\pi n}{\alpha}\right)\left(\frac{1}{M - \frac{(1-\alpha)}{2}}\right)\right],\ 0 \le n \le M \tag{9}$$

4.4. Blackman

As janelas de Blackman têm lóbulos centrais ligeiramente mais largos e menos vazamento de banda lateral do que as janelas de Hamming e Hanning de comprimentos equivalentes. A janela Blackman é de nida por:

$$w(n) = 0{,}42 - 0{,}5\cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right) + 0{,}08\cos\left(\frac{4\pi n}{M-1}\right),\ 0 \le n \le M-1 \tag{10}$$

onde M é igual a N/2 para N par e igual a (N + 1)/2 para N ímpar.

4.5. Nuttall

A janela de Nuttall é formada por uma janela simétrica de Blackman-Harris de 4 termos. O

cálculo dos coe cientes para esta janela difere do cálculo dos coe cientes de janela de Blackman-Harris e produz lóbulos secundários ligeiramente menores. A janela de Nuttal é obtida a partir da seguinte equação:

$$w(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{M-1}\right) - a_3 \cos\left(\frac{6\pi n}{M-1}\right),\ 0 \le n \le M-1 \quad (11)$$

onde os valores dos coe cientes são: a_0 = 0,3635819; a_1 = 0,4891775; a_2 = 0,1365995; a_3 = 0,0106411.

4.6. Flat-top (topo plano)

Janelas de topo planas (*Flat-top*) têm baixo *ripple* na faixa de banda passante (<0,01 dB). Sua largura de banda é aproximadamente 2,5 vezes maior que a de uma janela Hann. A função da janela *Flat-top* é semelhante à de Nuttal, porém com um termo a mais:

$$\begin{aligned} w(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{2\pi n}{M-1}\right) + a_2 \cos\left(\frac{4\pi n}{M-1}\right) + \\ - a_3 \cos\left(\frac{6\pi n}{M-1}\right) + a_4 \cos\left(\frac{8\pi n}{M-1}\right),\ 0 \le n \le M-1 \end{aligned} \quad (12)$$

onde os valores dos coe cientes são: a_0 = 0,21557895; a_1 = 0,41663158; a_2 = 0,277263158; a_3 = 0,083578947; a_4 = 0,006947368.

4.7. Kaiser

A janela do Kaiser é de nida pela seguinte equação:

$$w(n) = \frac{I_0\left[\beta\sqrt{1-\left(\frac{n-M/2}{M/2}\right)^2}\right]}{I_0\,\beta},\ 0 \le n \le M \quad (13)$$

onde β é o parâmetro da janela de Kaiser que afeta a atenuação dos lóbulos laterais da transformada de Fourier da janela, um valor comum para β é 0,5 e I_0 é a função de Bessel modi cada de primeiro tipo e de ordem zero.

4.8. Patil

O objetivo da janela proposta por Patil é modi car a janela de Hamming para reduzir seu pico máximo de lóbulo secundário, mantendo inalterada a largura do lóbulo principal. A janela de Patil é implementada através da seguinte equação:

$$w(n) = a_0 - a_1 \cos\left(\frac{6\pi n}{M}\right) - a_2 \cos\left(\frac{6\pi n}{M}\right),\ 0 \le n \le M \quad (14)$$

para ordens su cientemente grandes, os seguintes valores podem ser utilizados para os coe cientes:

$$w(n) = 0{,}536 - 0{,}46 \cos\left(\frac{2\pi n}{M}\right) - 0{,}003 \cos\left(\frac{6\pi n}{M}\right),\ 0 \le n \le M \quad (15)$$

Assim como a janela de Hamming, a resposta em frequência da janela de Patil é degradada para ordens baixas. Portanto, dependendo da ordem da janela, os parâmetros acima são modi cados para manter a e ciência, isso mostra a dependência de a_0 e a_1 em relação à M. Tais coe cientes são compostos de uma função monotônica e um termo DC [Patil 2015]. Estes parâmetros são regidos conforme as seguintes equações:

$$a_0 = 0{,}537 - \frac{0{,}3}{M+15};\ a_1 = 0{,}46 + \frac{0{,}25}{M+15};\ a_3 = 1 - a_0 - a_1 \qquad (16)$$

5. Análise comparativa das janelas

Na Figura 5 são mostradas as respostas tempo-magnitude e na Figura 6 as respostas frequência-magnitude de todas as funções de janela descritas na seção 4.

As funções de janela mais interessantes são aquelas que conseguem conciliar maior largura de lóbulo principal com um decaimento mais suave da função, minimizando assim a altura máxima dos lóbulos secundários após a aplicação do ltro e consequentemente reduzindo a ICI [Gandhi 2013].

A Figura 5 apresenta as curvas de várias janelas no domínio do tempo, onde é possível observar comportamentos bem distintos, como a janela retangular, que ao ser utilizada, fornecerá um truncamento abrupto para o ltro e consequente resposta em frequência com muito *ripple*. Por outro lado, a janela *Flat-Top* é a mais estreita no domínio do tempo e por isso, ao ser utilizada no ltro, resultará em uma largura de banda passante mais suceptível à ICI, mas com *ripple* praticamente nulo. Outras janelas apresentam comportamentos muito similares no domínio do tempo, é o caso das janelas de Patil e Hamming.

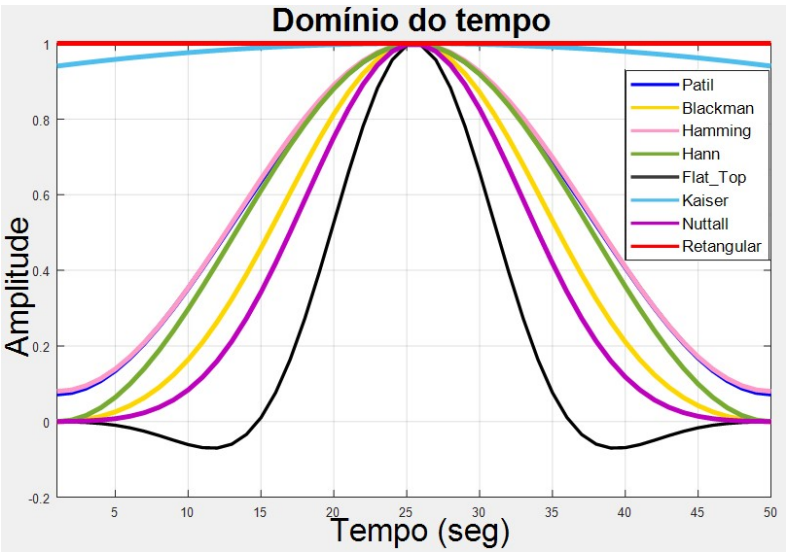


Figura 5. Resposta tempo-magnitude de diferentes janelas

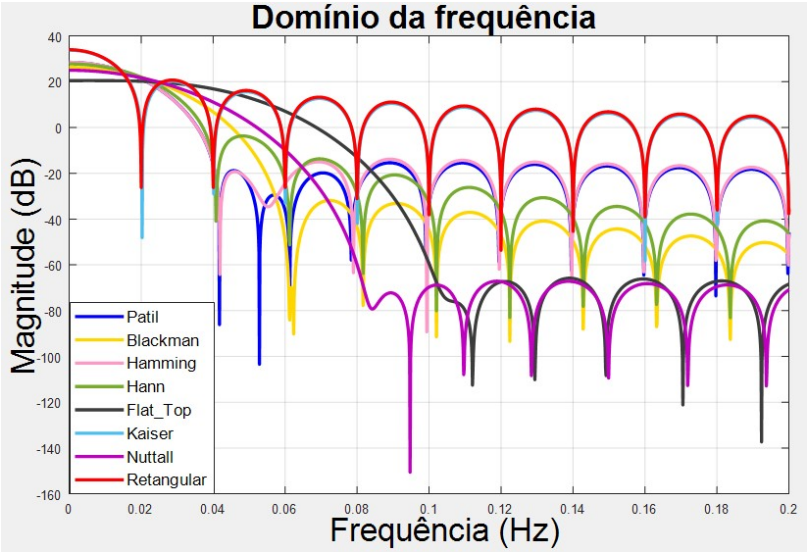


Figura 6. Resposta frequência-magnitude de diferentes janelas

No domínio da frequência serão analisadas com maior atenção as janelas com decaimento mais rápido e com maior atenuação de frequência de parada (maior distância entre pico e início do primeiro lóbulo lateral, apesar de isso geralmente implicar em menor *roll-o*) e cujos lóbulos secundários possuem menor altura de pico em relação ao principal (atenuação alta). As janelas que melhor preenchem estes critérios supracitados são: Blackman, Hann, Hamming e Patil.

Na Figura 5 observa-se a resposta tempo-magnitude e na Figura 6 a resposta frequência-magnitude das quatro janelas supracitadas. No domínio do tempo é evidenciado que as janelas Hamming e Patil possuem formatos de onda praticamente iguais, todavia no domínio da frequência (Figura 6) é possível perceber que Patil possui lóbulos secundários com menor magnitude. Enquanto Hamming possui atenuação da banda de parada (*stopband attenuation*) de aproximadamente -64dB, a atenuação da banda de parada de Patil é de aproximadamente -110dB (Figura 6), além de ter pico máximo de lóbulos secundários cerca de 3dB menor que o observado em Hamming. Estas duas janelas possuem as maiores larguras de lóbulo principal.

Apesar de, dentre estas 4 janelas analisadas, Blackman possuir largura de lóbulo principal no tempo mais estreito, esta janela possui aproximadamente a mesma atenuação de banda de parada que Patil (cerca de -110dB). Conforme observado na literatura, algumas características mais podem ser destacadas: Blackman tem um *ripple* de banda de passagem de apenas 0,02%, enquanto Hamming possui tipicamente 0,2%; Hamming e Patil possuem fator de *roll-o* cerca de 20% mais rápido que Blackman [Smith 1999].

Portanto, a partir das observações supracitadas, percebe-se que a janela Patil possui vantagens em ambos os domínios, destacando-se em relação às demais janelas analisadas neste artigo. A janela Blackman também possui qualidades interessantes e, junto a Patil, deve ser preferida em relação às demais funções de janelamento, mesmo aquelas com maior

largura de lóbulo principal no domínio do tempo, já que o *roll-o* lento de Blackman é mais fácil de lidar do que a fraca atenuação de banda de parada das demais janelas.

Com o intuito de melhorar a e ciência do ltro FIR para o F-OFDM, além da análise da janela adequada a ser utilizada no ltro FIR, este artigo propõe que a modi cação na função *kernel* do ltro (protótipo do ltro) pode melhorar a resposta do ltro com o objetivo de redução da BER na transmissão de dados.

O ltro FIR do F-OFDM utiliza a função sinc como função base para o ltro. Essa função pode ser substituída por outros formatos de pulso, com potencial tanto no combate à ISI quanto no combate à interferência entre portadoras (*Intercarrier Interference* – ICI). Neste artigo, propõe-se que melhores ltros para o F-OFDM podem ser obtidos utilizando-se as janelas conciliadas a pulsos formatados. Alguns exemplos de formatos de pulsos presentes na literatura são: cosseno levantado (*Raised Cosine* – RC), cosseno levantado melhorado (*Better Than Raised Cosine* – BTRC) [Tan e Beaulieu 2004], *Sinc Power* (SP) [Mourad 2006] e *Improved Sinc Power* (ISP) [Kumbasar e Kucur 2007; Gandhi e Dalal 2013].

6. Aplicações da Modulação F-OFDM

São diversas as aplicações possíveis para a F-OFDM. É su ciente dizer que a F-OFDM pode ser utilizada como substituta natural da modulação OFDM. A F-OFDM tem sido estudado em aplicações de sistemas que utilizam rádios cognitivos [Bala, Li e Yang, 2014], mas é como tecnologia de modulação candidata a ser utilizada no 5G que se encontram os maiores esforços de desenvovimento da modulação F-OFDM, para os quais estão disponíveis trabalhos promissores [Abdoli, Jia e Ma 2015], [Zhao *et al.*, 2016].

Neste artigo, foi simulada uma aplicação prática da F-OFDM com a janela proposta por Patil (2015) combinada à formatação de pulso ISP – que segundo Ghandi, Ghupta e Dalal (2013) é a melhor modelagem de pulso para uma ampla gama de aplicações – incluindo o processamento de imagem. Essa conclusão também foi obtida pelos autores deste artigo, após diversas simulações com diversas janelas e diversas formas de pulsos.

A função ISP é calculada conforme a seguir:

$$ISP(\alpha) = \mathrm{e}^{-\alpha(\omega)^2} sinc^2(\omega) \tag{17}$$

onde α é o fator de roll-o .

A imagem processada possui formato .jpg com dimensões 200x181 pixels e foram utilizados os seguintes parâmetros para o processamento: 1024 pontos para a FFT; 50 blocos de recurso; 12 subportadoras por bloco de recurso; pre xo cíclico de comprimento 72; ltro de comprimento 513 e modulação QPSK.

Antes da utilização da F-OFDM realizou-se o processamento da imagem via OFDM, sem ltros, para se ter um valor base da taxa de erros de bit (BER – *Bit Error Rate*). Com os parâmetros supracitados e sem ltros o resultado obtido foi BER = 8%. Ao ser utilizado o ltro de sinal (pulso formatado e truncamento) a taxa caiu para 0,12%, isto equivale a uma redução percentual de 98,5% da BER, ou seja, uma melhora de 98,5% na

qualidade da imagem processada. Estes resultados corroboram que a F-OFDM pode ser superior à OFDM convencional. Resultados similares foram obtidos para outras imagens e para outros parâmetros do cenário de simulação.

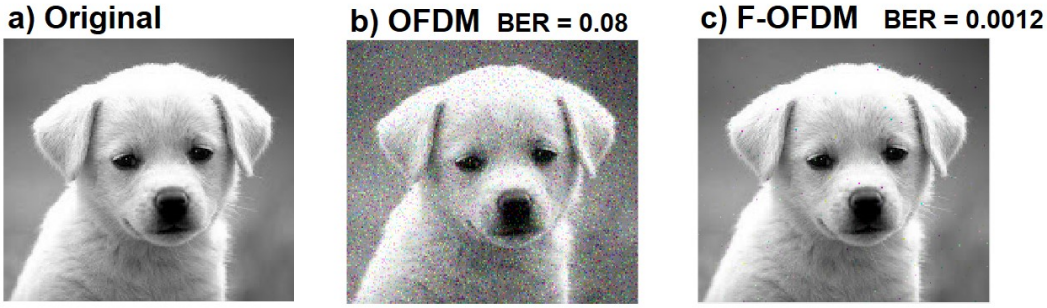


Figura 7. Processamento de imagem com F-OFDM

7. Conclusões

Neste artigo, foram feitas análises comparativas entre diversas funções de janela comumente utilizadas na literatura de processamento de sinais para o projeto de ltros FIR.

Com o objetivo de reduzir ISI no domínio do tempo, ICI no domínio da frequência e o *ripple* da banda passante, as funções das janelas forma comparadas e as que mais se destacaram foram: Hamming, Patil, Blackman e Hanning.

Ao escolher a janela, com base nas negociaçoes (*trade-o s*) de parâmetros desejados, várias compensações podem ser gerenciadas de modo a maximizar a qualidade do projeto do ltro em uma determinada aplicação.

O método de janela para o projeto de ltro digital é bem conhecido na literatura [Patil 2015] e foi utilizado com obtenção de resultados interessantes neste trabalho. Escolhendo uma das janelas que se destacou nas análises, neste caso Patil, foi proposta uma implementação de um ltro FIR utilizando a janela de Patil aliada à formatação do pulso da função utilizada como *kernel* para o protótipo do ltro, sendo essa a maior contribuição deste trabalho. Para tanto, foi utilizada a função ISP (*Improved Sinc Power*). Por meio do projeto de ltro proposto, foram conduzidas simulações de transmissão de imagens comparando os resultados de BER obtidos para o OFDM e para o F-OFDM. Observou-se que os resultados foram interessantes, com redução de BER no processamento da imagem em 98,5% em relação a transmissão utilizando OFDM. Isto corrobora que o ltro utilizado é e ciente para redução da BER no processo de transmissão de dados, tornando a tecnologia F-OFDM, com projeto de ltro apropriado, candidata a ser utilizada no 5G.

Como trabalho futuro, pretende-se comparar os resultados obtidos com outras modulações candidatas a serem utilizadas no 5G, como por exemplo: FBMC e UFMC. Além disso, deseja-se conduzir simulações em um ambiente que reuna maior número de características de uma futura rede 5G.

Referências

Abdoli, J., Jia, M. and Ma, J. (2015) "Filtered OFDM: A new waveform for future wireless systems", In: 2015 IEEE 16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC), p. 66-70, Stockholm, Sweden.

Bala, E., Li, J. and Yang, R. (2014) “Pulse shaped OFDM for Cognitive Radio”, In: InterDigital Communications, Melville, USA.

Gandhi, D., Gupta, S. S. and Dalal, S. U. (2013) “Implementation of Pulse Shaping Techniques in OFDM System”, In: International Journal of Computer Applications, vol. 68, no.10, India.

Guerra, D. W. M. (2016) “FBMC × OFDM: Análise de Desempenho e Implementação de Sistemas de Comunicação sem Fio Multiportadoras de Quarta e Quinta Geração”, In: Universidade Estadual de Londrina, Brasil.

Heydt, G. T., Fjeld, P. S., Liu, C. C., Pierce, D., Tu, L. Tu and Hensley G. (1999) "Applications of the windowed FFT to electric power quality assessment", In: IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 14, no. 4, p. 1411-1416.

Harris, F. J. (1978) "On the Use of Windows for Harmonic Analysis with the Discrete Fourier Transform", In: Proceedings of the IEEE, vol. 66, no. 1.

Kumbasar, V. and Kucur, O. (2007) “ICI reduction in OFDM systems by using improved sinc power pulse”, In: Digital Signal Processing 17, p. 997– 1006.

Mourad, H. M. (2006) “Reducing ICI in OFDM systems using a proposed pulse shape”, In: Wireless Personal Communications 40, p. 41–48.

Patil, A. K. (2015) “A new window function for r lter design and spectral analysis”, In: International journal of advanced research in science and engineering vol. no.4, Issue 09.

Smith, S. W. (1999) “The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing”, USA, California Technical Publishing, 2nd edition, p. 285–296.

Tan, P. and Beaulieu, N. C. (2004) “Reduced ICI in OFDM systems using the better than raised-cosine pulse”, In: IEEE Communications Letters, vol. 8, no. 3, p. 135–137.

Zhang, X., Jia, M., Chen, L., Ma, J. and Qiu, J. (2015) “Filtered-OFDM – Enabler for Flexible Waveform in the 5th Generation Cellular Networks”, In: 2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM). San Diego, USA.

Zhao, Z., Schellmann, M., Gong, X., Wang, Q., Bohnke, R. and Guo, Y. (2016) “Pulse Shaped OFDM for 5G Systems”, In: German Research Center, Huawei Technologies, Munich, Germany.