

Probabilidade de erro de bit em sistemas QAM-FBMC

Iandra Galdino, Didier Le Ruyet, Rostom Zakaria, e Marcello L. R. de Campos

Resumo—O sistema QAM-FBMC tem sido bastante visado como alternativa ao OFDM para suprir às necessidades das redes móveis 5G. Diferentemente do sistema OFDM, no caso do QAM-FBMC não existe um filtro padrão adotado, sendo o desempenho do sistema variável em relação àquele escolhido. A taxa de erro de bit é um parâmetro usualmente aplicado para avaliar o desempenho de sistemas de comunicação, de forma que sua utilidade é bastante relevante para o projeto do sistema. Neste trabalho, apresentamos uma formulação matemática para obtenção da probabilidade de erro de bit (PEB) em sistemas QAM-FBMC levando em consideração o filtro protótipo utilizado e incluindo os efeitos do canal AWGN.

Palavras-Chave—Banco de filtros, QAM-FBMC, 5G, probabilidade de erro de bit, PEB.

Abstract—The QAM-FBMC system have been a promising alternative to the OFDM for attempt the needs of 5G communication systems. Unlike for OFDM systems, does not exist a specific prototype filter for the QAM-FBMC system, thus, its performance is changeable related to the applied prototype filter. The bit error rate parameter is usually used to evaluate the communication system performance, thus, it is useful from the system design point of view. In this work we derive an expression to calculate the bit error probability (BEP) of QAM-FBMC systems by considering the applied prototype filter and including the AWGN channel effects.

Keywords—Filter-bank, QAM-FBMC, 5G, bit error probability, BEP.

I. INTRODUÇÃO

O aumento da demanda por conexões e assim como o surgimento das mais diversas aplicações exigem cada vez mais dos futuros sistemas de comunicações móveis. Sendo assim, o sistema 5G deve atender critérios mínimos de forma a garantir o provimento de novos serviços tais como comunicação de máquinas, MTC (do Inglês, *machine type communications*), acesso dinâmico ao espectro, DSA (do Inglês, *dynamic spectrum access*) e comunicações de baixa latência ultra-confiáveis, URLLC (do Inglês, *ultra reliable low latency communications*) [1].

A fim de atender às determinações do sistema 5G, é necessário o acesso flexível dos recursos, o que não é possível com o sistema clássico OFDM (do Inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) [2]. Desta forma, diversas

soluções têm sido propostas como alternativas ao OFDM, dentre elas, o banco de filtros com múltiplas portadoras baseado em símbolos QAM deslocados, OQAM-FBMC, (do Inglês, *Offset-quadrature amplitude modulation filter-bank multicarrier*) [3]. Visando ainda lidar com a interferência intrínseca do meio, observada no sistema OQAM-FBMC, a qual limita sua utilização, o sistema QAM-FBMC foi proposto em [4]. Neste projeto, o sistema QAM-FBMC é composto por um único filtro protótipo, o qual também tem sido alvo de diversos estudos [5], [6], [7]. Em uma abordagem similar, o sistema QAM-FBMC foi reformulado [8], desta vez empregando dois filtros protótipos. Para esta segunda configuração filtros protótipos também têm sido estudados [9], [10].

Uma métrica importante utilizada para a avaliação do desempenho de sistemas de comunicação é a taxa de erro de bit. Diversos trabalhos foram desenvolvidos de forma a avaliar a taxa de erro de bit dos sistemas OFDM [11] e OQAM-FBMC [12], [13]. Entretanto, o sistema QAM-FBMC permanece sem esta avaliação, o que motivou o desenvolvimento deste trabalho.

Neste trabalho derivamos uma expressão matemática que permite determinar a probabilidade de erro de bit (PEB) em sistemas QAM-FBMC levando em consideração o filtro protótipo utilizado em seu projeto. Para isto, foram considerados sistemas QAM-FBMC que utilizam apenas um filtro protótipo. Sabendo que a PEB depende da distribuição de probabilidade da interferência intrínseca do sistema, causada pelo filtro protótipo, nós apresentamos uma descrição detalhada da interferência do sistema baseada nos coeficientes da resposta ao impulso do mesmo. Conhecendo os coeficientes de interferência, foi desenvolvida uma representação matemática para a probabilidade de se obter erros de bit na recepção. Sabendo ainda que a resposta ao impulso do sistema está diretamente ligada ao filtro utilizado, diferentes filtros Gaussianos estudados em [14] foram aplicados ao sistema para avaliar o método proposto.

Uma vez que o objetivo deste trabalho é atender aos critérios do sistema 5G, foram utilizados apenas filtros denominados curtos, cujo fator de sobreposição adotado (do Inglês, *overlapping factor*) foi $K = 1$, visando atender a demanda por baixa latência.

A relevância do trabalho apresentado consiste em prever interferência intrínseca do sistema levando em consideração o filtro protótipo utilizado. Consequentemente a previsão do erro de bit (PEB) também pode ser realizada, indicando assim a aplicabilidade do filtro escolhido ao sistema QAM-FBMC.

Este trabalho é estruturado da seguinte maneira: o sistema QAM-FBMC é apresentado na Seção II e o filtro Gaussiano na

Iandra Galdino e Marcello L. R. de Campos, Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, e-mails: iandra.galdino@smt.ufrj.br, campos@smt.ufrj.br. Rostom Zakaria e Didier Le Ruyet, Conservatoire national des arts et métiers CNAM, Paris 75141, França, e-mails: rostom.rostom22@gmail.com, leruyet@cnam.fr.

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

Seção III. O modelo de interferência é apresentado na Seção IV e a probabilidade de erro de bit na seção V. Na Seção VI o modelo proposto é avaliado. Finalmente, as conclusões são apresentadas na Seção VII.

II. SISTEMA QAM-FBMC

Diante da impossibilidade de utilização do sistema OQAM-FBMC em aplicações do tipo MIMO (do Inglês, *multiple-input multiple-output*) devido à interferência intrínseca do meio, o sistema QAM-FBMC foi proposto em [4] e também em [8]. A ideia central do QAM-FBMC é modificar o sistema OQAM convencional de forma que os símbolos QAM transmitidos não sejam mais deslocados no tempo, e assim fazer com que a interferência intrínseca possa ser reduzida.

Neste trabalho consideramos o sistema QAM-FBMC com um único filtro protótipo [4]. Desta forma, a expressão do sinal transmitido pode ser descrita em tempo discreto como:

$$s[m] = \sum_{k=0}^{M-1} \sum_n d_{k,n} f[m - nM] e^{j \frac{2\pi}{M} km}, \quad (1)$$

onde $d_{k,n}$ são símbolos QAM complexos alocados na k -ésima sub-portadora e enviados no n -ésimo símbolo QAM-FBMC. $f[m]$ é o filtro protótipo utilizado, cujo comprimento é definido por $L = KM$, sendo M a quantidade de sub-portadoras do sistema e K um número inteiro que indica o fator de sobreposição do filtro (do inglês, *overlapping factor*). Neste trabalho o fator de sobreposição adotado foi $K = 1$, o que ocasiona em filtros denominados curtos, visando a baixa latência necessária ao sistema 5G.

Sejam os dados de entrada do sistema $\mathbf{d}_n = [d_{0,n} \ d_{1,n} \ \dots \ d_{M-1,n}]^T$, a relação entre \mathbf{d}_n e o sinal transmitido $\mathbf{s} = [s[nM] \ s[nM+1] \ \dots \ s[nM+M-1]]$ pode ser descrita matricialmente como:

$$\mathbf{s} = \mathbf{F}\mathbf{W}^H \mathbf{d}_n, \quad (2)$$

onde \mathbf{W} é a matriz de FFT (do Inglês, *Fast Fourier Transform*), $\mathbf{F} = \text{diag}(\mathbf{f})$ e $\mathbf{f} \in \mathbb{R}^{L \times 1}$ representa a resposta ao impulso do filtro protótipo do transmissor. Para simplificar a notação, utilizaremos \mathbf{d} ao invés de \mathbf{d}_n sem perda de generalidade.

Considerando a transmissão do tipo SISO (do Inglês, *Single-input Single-output*) através do canal ideal, o símbolo demodulado no receptor pode ser descrito como:

$$\tilde{\mathbf{d}} = \mathbf{W}\mathbf{F}^H \mathbf{s}. \quad (3)$$

No caso em que o canal é do tipo ruidoso AWGN (do Inglês, *Additive white Gaussian noise*), com média $\mu = 0$ e variância σ^2 , o sinal na entrada do receptor descrito em (2) passa a ser descrito como:

$$\mathbf{y} = \mathbf{F}\mathbf{W}^H \mathbf{d} + \mathbf{v}, \quad (4)$$

sendo \mathbf{v} a representação do ruído. Desta forma, o símbolo demodulado no receptor apresentado em (3) se torna:

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{d}} &= \mathbf{W}\mathbf{F}^H \mathbf{y} \\ &= \mathbf{W}\mathbf{F}^H \mathbf{F}\mathbf{W}^H \mathbf{d} + \mathbf{W}\mathbf{F}^H \mathbf{v}. \end{aligned} \quad (5)$$

Sabendo que os filtros de transmissão e recepção não são perfeitamente ortogonais, a matriz $\mathbf{W}\mathbf{F}^H \mathbf{F}\mathbf{W}^H$ não representa exatamente a matriz identidade. Sendo assim, os

elementos fora da diagonal principal de $\mathbf{W}\mathbf{F}^H \mathbf{F}\mathbf{W}^H$ são responsáveis por introduzir a interferência intrínseca do meio. Logo temos:

$$\tilde{\mathbf{d}} = \mathbf{I}\mathbf{d} + \underbrace{\left(\mathbf{W}\mathbf{F}^H \mathbf{F}\mathbf{W}^H - \mathbf{I} \right)}_{\text{interferência}} \mathbf{d} + \tilde{\mathbf{v}}, \quad (6)$$

sendo \mathbf{I} a matriz identidade e $\tilde{\mathbf{v}} = \mathbf{W}\mathbf{F}^H \mathbf{v}$.

Desta forma, podemos expressar a informação recebida na subportadora q como:

$$\tilde{d}_q = d_q + \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq q}}^{M-1} \Gamma_{k-q} d_k + \tilde{v}_q, \quad (7)$$

sendo Γ_{k-q} os coeficientes de interferência provenientes da matriz circulante $\Gamma = \left(\mathbf{W}\mathbf{F}^H \mathbf{F}\mathbf{W}^H - \mathbf{I} \right) \mathbf{d}$. Como Γ , é uma matriz circulante, podemos concluir que a interferência será a mesma em todas as subportadoras.

III. FILTRO GAUSSIANO

Diferentemente do que ocorre no OFDM, não se tem um único filtro protótipo a ser empregado nos sistemas QAM-FBMC. Observando a Equação (5) podemos constatar a relevância do filtro protótipo na recuperação da informação transmitida. Desta forma, filtros protótipos bem localizados em ambos os domínios, tempo e frequência, são desejados para sistemas QAM-FBMC, o que tem motivado diversos trabalhos que buscam desenvolver filtros especificamente projetados para sistemas QAM-FBMC [5].

Neste sentido, a interferência entre símbolos ISI (do Inglês, *inter-symbol interference*), proveniente de símbolos vizinhos, pode ser significativamente reduzida se o filtro protótipo for bem localizado no tempo. Por outro lado, a seletividade em frequência permite a redução da interferência que uma portadora gera em suas vizinhas (do inglês, *inter-carrier interference*).

Segundo esta análise, o filtro gaussiano é uma solução promissora, tendo em vista sua isotropia, ou seja, sua dispersão no tempo e na frequência são iguais. A expressão analítica da resposta ao impulso do filtro gaussiano pode ser descrita da seguinte forma [15]:

$$f[m] = \frac{\sqrt{\pi}}{\alpha} e^{-(m\pi/\alpha)^2}. \quad (8)$$

Neste caso, o parâmetro α determina a relação entre o confinamento espectral e temporal do filtro. Este parâmetro está relacionado à largura de banda de -3dB do filtro gaussiano, B , de banda base. Desta forma α pode ser definido como:

$$\alpha = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{\ln(2)}{2}}. \quad (9)$$

Como podemos notar, existe uma relação direta entre o parâmetro α e o espalhamento temporal do filtro Gaussiano e consequentemente uma relação inversa com a ocupação espectral. Sendo assim, aumentando α , a resposta ao impulso do filtro se espalha sobre símbolos vizinhos, ocasionando o aumento da ISI observada na recepção. Por outro lado, diminuindo α , a resposta em frequência se espalha sobre as

portadoras vizinhas, aumentando assim a ICI. A resposta ao impulso do filtro Gaussiano nos leva à função $F(f)$, a qual também está relacionada ao fator α . Esta função pode ser definida por [15]:

$$F(f) = e^{-\alpha^2 f^2}. \quad (10)$$

Apesar da boa localização em ambos os domínios, tempo e frequência, os filtros Gaussianos não cruzam o zero em múltiplos inteiros do período do símbolo, ou seja, não satisfazem o critério de Nyquist, o que contribui com a interferência. Além disso, são necessárias aproximações durante seu projeto, que também contribuem para o aumento da interferência intrínseca.

É importante salientar que para obter uma representação finita no tempo, FIR (do inglês, *finite impulse response*), do filtro Gaussiano, é necessário truncar a resposta infinita de um filtro Gaussiano ideal, desta forma temos um aumento dos lóbulos laterais na frequência.

IV. INTERFERÊNCIA INTRÍNSECA DO MEIO

A interferência intrínseca do meio pode ser definida como a informação recebida em uma subportadora q diferente da que foi transmitida k , em razão do filtro protótipo empregado, conforme demonstrado na Equação (6). Sabendo que a interferência intrínseca afeta diretamente o desempenho do sistema, a escolha do filtro protótipo utilizado torna-se de fundamental importância para seu bom funcionamento. Apesar de o filtro Gaussiano ter características bastante promissoras, ainda assim podemos observar interferência quando este é utilizado no sistema QAM-FBMC.

Para exemplificar a interferência observada no sistema QAM-FBMC de acordo com o filtro protótipo utilizado, apresentamos a parte central de sua resposta a um pulso unitário, enviado na subportadora k , quando utilizando diferentes filtros Gaussianos e modulação 4-QAM. A Tabela I apresenta os coeficientes de interferência observados na portadora q nos blocos de recepção $b_r = [n - 1 \ n \ n + 1]$, quando um pulso é transmitido na portadora k no bloco de transmissão $b_t = n$, e utilizamos o filtro gaussiano cujo parâmetro $\alpha = 5$.

TABELA I: Resposta ao pulso do sistema QAM-FBMC usando filtro gaussiano $\alpha = 5$.

$k - q$	$n - 1$	n	$n + 1$
-4	0	-0.0022	0
-3	0	-0.0039	0
-2	0	-0.0090	0
-1	0	-0.0395	0
$q = k$	0	1	0
1	0	-0.0395	0
2	0	-0.0090	0
3	0	-0.0039	0
4	0	-0.0022	0

Como podemos notar, além da informação desejada, recebida na subportadora de interesse ($q = k$), observamos ainda a interferência recebida nas subportadoras vizinhas ($k \neq q$). Sabendo que os coeficientes de interferência dependem da distância $k - q$ e do bloco observado, os mesmos podem ser denominados ($\Gamma_{k-q}(n)$). Uma vez que o fator de sobreposição utilizado no projeto dos filtros é $K = 1$, a interferência entre

blocos diferentes $b_t = n$ e $b_r \neq n$ é nula, consequentemente, para simplificar a notação, o índice n será omitido.

Para comparação, apresentamos também na Tabela II, a parte central da resposta ao pulso do sistema QAM-FBMC quando utilizamos o filtro Gaussiano, desta vez projetado com $\alpha = 1, 2$.

TABELA II: Resposta ao pulso do sistema QAM-FBMC utilizando filtro Gaussiano $\alpha = 1, 2$

$k - q$	$n - 1$	n	$n + 1$
-4	0	0.0024	0
-3	0	-0.0053	0
-2	0	0.0509	0
-1	0	-0.4988	0
$q = k$	0	1	0
1	0	-0.4988	0
2	0	0.0509	0
3	0	-0.0053	0
4	0	0.0024	0

Conforme o esperado, os coeficientes de interferência (Γ_{k-q}), variam significativamente de acordo com o filtro protótipo utilizado.

A interferência observada em cada sub-portadora pode ser quantificada pela soma das contribuições de todas as demais sub-portadoras, sendo definidas pela informação transmitida em cada sub-portadora (d_k) porém, ponderadas pelos coeficientes de interferência (Γ_{k-q}) não nulos observados na tabela de resposta ao pulso de cada filtro protótipo. Desta forma, a interferência total observada em uma subportadora pode ser calculada através da expressão:

$$I = \sum_{\substack{k=0 \\ k \neq q}}^{M-1} \Gamma_{k-q} d_k. \quad (11)$$

Sendo a interferência total obtida pela ponderação da informação transmitida, diferentes valores de interferência podem ser obtidos considerando as diferentes combinações possíveis de símbolos QAM-FBMC transmitidos, $[d_0 \ d_1 \ \dots \ d_{M-1}]$.

Conhecendo a origem da interferência intrínseca do sistema QAM-FBMC e a tabela de resposta ao pulso do filtro utilizado, podemos determinar sua distribuição baseada nos coeficientes de interferência de cada filtro. Analisando separadamente as partes real e imaginária dos símbolos 4-QAM, considerando um sistema com M subportadoras, o número total de possíveis combinações de símbolos PAM (do inglês, *Phase Amplitude Modulated*) transmitido é de 2^{2M} . O sistema QAM-FBMC com modulações de nível elevado, *e.g.*, 16 e 64-QAM, requerem receptores avançados, o que foge ao escopo deste trabalho. Sendo assim, apenas a modulação 4-QAM foi considerada.

Na Figura 1 apresentamos a distribuição de probabilidade da interferência intrínseca do sistema QAM-FBMC quando usando o filtro Gaussiano sendo $\alpha = 1, 2$. Entretanto, com o objetivo de simplificar o processo, uma aproximação da distribuição foi feita considerando apenas os coeficientes Γ_{k-q} não nulos, ou seja a interferência causada pelas subportadoras mais próximas àquela de interesse. Sendo assim, foram consideradas 18 subportadoras vizinhas, o que no caso 4-QAM

nos leva a $2^{18} = 262.144$ possíveis combinações de dados transmitidos.

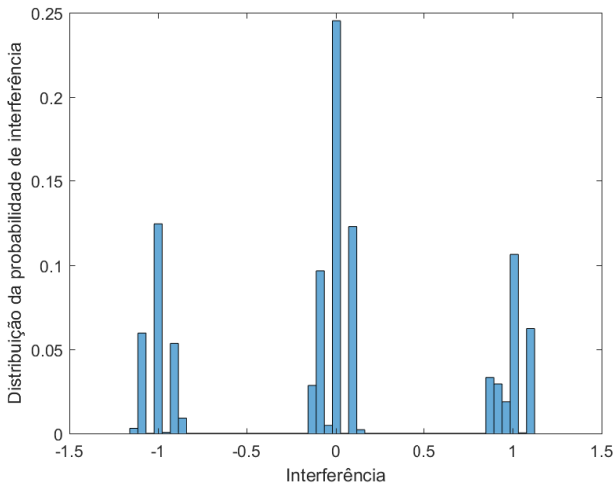


Fig. 1: Distribuição da probabilidade de interferência $\Pr(I)$ observada no sistema QAM-FBMC usando filtro Gaussiano com $\alpha = 1, 2$.

A Figura 2 apresenta ainda a distribuição de probabilidade de interferência para o caso em que o filtro utilizado foi o Gaussiano $\alpha = 5$. A variação da distribuição de probabilidade da interferência está diretamente ligada ao espalhamento da resposta em frequência do filtro protótipo. Sendo o parâmetro α , utilizado no projeto do filtro gaussiano, responsável pelo confinamento espectral do filtro, consequentemente sua variação altera também a distribuição de probabilidade da interferência, fato este confirmado pela comparação entre as Figuras 1 e 2.

Desta forma, mais uma vez constatamos a necessidade da escolha adequada do filtro protótipo.

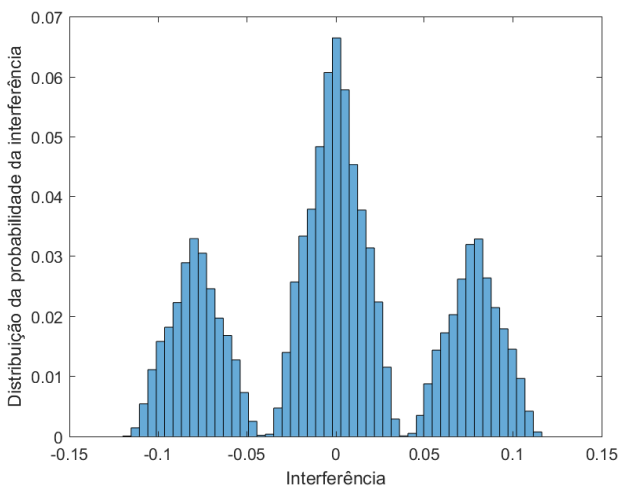


Fig. 2: Distribuição da probabilidade de interferência $\Pr(I)$ observada no sistema QAM-FBMC usando filtro Gaussiano com $\alpha = 5$.

V. PROBABILIDADE DE ERRO DE BIT (PEB)

Conhecendo a distribuição da probabilidade de interferência intrínseca do meio, nesta seção propomos uma expressão matemática que permite calcular a probabilidade de erro de bit (PEB) do sistema QAM-FBMC baseado nos coeficientes de interferência observados para cada filtro protótipo.

Considerando a transmissão 4-QAM, o erro de bit ocorre quando a parte real e/ou imaginária do símbolo estimado (\hat{d}) difere daquela transmitida. Desta forma podemos descrever a probabilidade de ocorrer um erro de bit como:

$$\begin{aligned} \text{BEP} &= \frac{1}{2} \text{P} \left(\Re\{\hat{d}_k\} = b \mid \Re\{d_k\} \neq b \right) \\ &+ \frac{1}{2} \text{P} \left(\Im\{\hat{d}_k\} = b \mid \Im\{d_k\} \neq b \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Como a probabilidade de obter um erro na parte real ou na parte imaginária é numericamente idêntica, a expressão anterior pode ser simplificada como:

$$\begin{aligned} \text{BEP} &= \text{P} \left(\Re\{\hat{d}_k\} = b \mid \Re\{d_k\} \neq b \right) \\ &= \text{P} \left(\Im\{\hat{d}_k\} = b \mid \Im\{d_k\} \neq b \right). \end{aligned} \quad (13)$$

A interferência observada no sistema pode ser ainda construtiva ou destrutiva. Sendo por exemplo $\Re\{d_k\} = 1$, e a interferência $I > -1$ (como no caso exemplificado na Figura 1), apesar da interferência ser significativa, não ocasionará em um erro na recepção. Por outro lado, se $I \leq -1$ observaremos erros na recepção. Notadamente, o limiar de decisão para a determinação de erro será alterado pela interferência.

Tendo sido considerado o canal AWGN, derivamos a expressão da PEB baseada na função complementar de erro, da seguinte forma:

$$\text{PEB} = \sum_{i \in \mathcal{I}} \Pr(I = i) \frac{1}{2} \text{erfc} \left\{ \frac{\sqrt{E_s}(1-i)}{\sqrt{\mathcal{N}_0}} \right\}, \quad (14)$$

sendo E_s a energia do símbolo transmitido, \mathcal{N}_0 a energia do ruído e \mathcal{I} o conjunto dos valores possíveis de interferência. Sendo ainda a interferência I variável, foi necessária a utilização de sua distribuição de probabilidade previamente apresentada $\Pr(I = i)$.

VI. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

A aplicabilidade do método proposto foi avaliada no sistema QAM-FBMC com filtros protótipo Gaussianos curtos ($K = 1$), cujo comprimento foi definido sendo $L = KM = 128$, ademais, o comprimento do símbolo foi definido como $M = 128$ subportadoras. Os filtros avaliados foram projetados com valores distintos do parâmetro α . Com esta finalidade, as taxas de erro de bit do sistema, teórica, obtida pela Equação (2) e aquela simulada, foram avaliadas sob a perspectiva de um canal AWGN.

Na Figura 3 apresentamos a curva da probabilidade de erro de bit (PEB) teórica observada no sistema QAM-FBMC obtida por meio da expressão proposta. Paralelamente apresentamos também a curva de erro de bit simulada no sistema QAM-FBMC utilizando a técnica de Monte Carlo. Para tanto, foram realizadas 10000 simulações, cada uma com 1000 símbolos

QAM-FBMC. O resultado observado foi obtido utilizando o filtro Gaussiano cujo fator α é de 1,2. Conforme esperado, a curva teórica e a simulada se sobrepõem perfeitamente, confirmando a eficácia do método proposto. Além disso, podemos notar que o desempenho do sistema QAM-FBMC deixa a desejar quando utilizando o filtro em questão. Tal fato, bem explorado em [14], está relacionado às características do filtro utilizado.

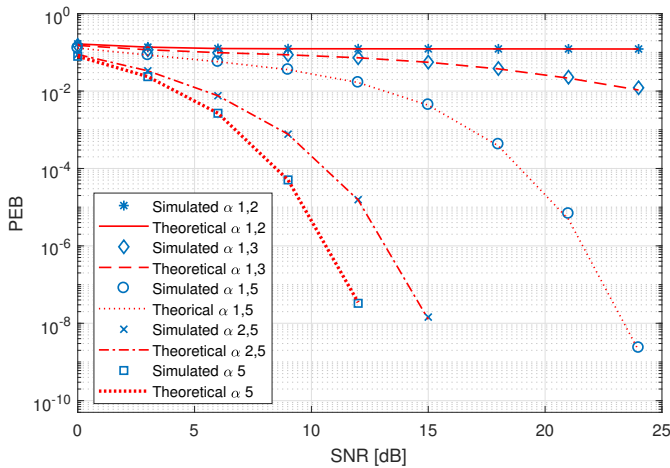


Fig. 3: Probabilidade de erro de bit (PEB) do sistema QAM-FBMC usando diferentes filtros Gaussianos com $\alpha = 1,2$, $\alpha = 1,3$, $\alpha = 1,5$, $\alpha = 2,5$ e $\alpha = 5$.

A probabilidade de erro de bit também foi avaliada no sistema QAM-FBMC com filtro Gaussiano cujo parâmetro $\alpha = 1,3$ conforme apresentado na Figura 3. Neste caso, além da ligeira melhora do desempenho do sistema, podemos notar que as curvas teórica e simulada também se sobrepõem perfeitamente, mais uma vez comprovando a eficácia do método proposto. Foram avaliados ainda os resultados quando usando os filtros Gaussianos com parâmetro $\alpha = 1,5$, $\alpha = 2,5$ e também $\alpha = 5$, e os resultados apresentados ratificam a aplicabilidade do método mesmo quando alteramos o filtro protótipo.

VII. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A interferência observada em sistemas QAM-FBMC está diretamente relacionada ao filtro protótipo utilizado. Sua maior incidência pode ser constatada quando se trata de filtros curtos ($K = 1$), cuja capacidade de confinamento espectral é notoriamente inferior àquela de filtros longos *i.e.* $K \geq 1$.

Nós mostramos neste trabalho que, uma vez conhecida a tabela de coeficientes de interferência do filtro protótipo, é possível desenvolver uma expressão analítica para o cálculo da probabilidade de erro de bit em sistemas QAM-FBMC. A expressão desenvolvida foi validada considerando o canal AWGN e sua versatilidade comprovada pelos resultados obtidos para diferentes filtros protótipos. Nós constatamos que

os resultados obtidos por simulação e pela expressão proposta são exatamente os mesmos.

O trabalho apresentado é importante no processo de design do sistema tendo em vista que a taxa de erro de bit pode ser previamente determinada de acordo com o filtro escolhido. Sendo assim, a escolha do filtro utilizado pode ser guiada pelo melhor desempenho de forma que os melhores resultados sejam obtidos.

Como extensão deste trabalho a probabilidade de erro em sistema QAM-FBMC considerando canais do tipo Rayleigh também está prevista.

REFERÊNCIAS

- [1] A. Gupta and R. K. Jha, "A Survey of 5G Network: Architecture and Emerging Technologies," *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206–1232, 2015.
- [2] Q. He and A. Schmeink, "Comparison and evaluation between FBMC and OFDM systems," in *WSA; 19th International ITG Workshop on Smart Antennas*. VDE, 2015, pp. 1–7.
- [3] M. Bellanger, D. Le Ruyet *et al.*, "FBMC physical layer: a primer." [Online]. Available: <http://www.ict-phydyas.org/>
- [4] R. Zakaria and D. Le Ruyet, "Intrinsic interference reduction in a filter bank-based multicarrier using QAM modulation," *Physical Communication*, vol. 11, pp. 15–24, 2014.
- [5] I. Galdino, R. Zakaria, D. Le Ruyet, and M. L. R. de Campos, "Short-Filter design for intrinsic interference reduction in QAM-FBMC modulation," *IEEE Communications Letters*, vol. 24, pp. 1487–1491, 2020.
- [6] H. Kim, H. Han, and H. Park, "Waveform design for QAM-FBMC systems," in *18th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. IEEE, 2017, pp. 1–5.
- [7] S. Taheri, M. Ghorashi, P. Xiao, L. Zhang, and Y. Xin, "Square-Root Nyquist Filter Design for QAM-Based Filter Bank Multicarrier Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 9, pp. 9006–9010, 2018.
- [8] H. Nam, M. Choi *et al.*, "A New Filter-Bank Multicarrier System With Two Prototype Filters for QAM Symbols Transmission and Reception," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 9, pp. 5998–6009, 2016.
- [9] Y. Qi and M. Al-Imari, "An enabling waveform for 5G QAM-FBMC: Initial analysis," in *Conference on Standards for Communications and Networking (CSCN)*. IEEE, 2016, pp. 1–6.
- [10] Y. H. Yun, C. Kim *et al.*, "A new waveform enabling enhanced QAM-FBMC systems," in *16th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*. IEEE, 2015, pp. 116–120.
- [11] L. Rugini and P. Banelli, "BER of OFDM systems impaired by carrier frequency offset in multipath fading channels," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 4, no. 5, pp. 2279–2288, 2005.
- [12] R. Nissel and M. Rupp, "OFDM and FBMC-OQAM in Doubly-Selective Channels: Calculating the Bit Error Probability," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 6, pp. 1297–1300, 2017.
- [13] R. T. Kobayashi and T. Abrao, "Closed Form Bit Error Probabilities for FBMC Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 69, no. 2, pp. 1237–1244, 2020.
- [14] I. Galdino, R. Zakaria, D. Le Ruyet, and M. L. R. d. Campos, "Avaliação da performance do sistema QAM-FBMC utilizando filtros gaussianos curtos," in *Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*. SBRT, 2019.
- [15] A. Sahin, I. Guvenc, and H. Arslan, "A Survey on Multicarrier Communications: Prototype Filters, lattice Structures, and Implementation Aspects," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 16, no. 3, pp. 1312–1338, 2014.