

Métodos de Redução de Picos em Sistemas OFDM Cooperativos Baseados na Técnica PTS

Lívia Christinie S. Teles, C. Alexandre R. Fernandes

Resumo—Este artigo propõe um conjunto de técnicas para redução de picos em um sistema OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) cooperativo com *relay* AF (*Amplify and Forward*) e PA's não lineares (*nonlinear Power Amplifiers*). O conjunto de técnicas baseia-se na técnica PTS (*Partial Transmit Sequences*) e utilizam como métricas para escolha dos sinais transmitidos a PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) e a CM (*Cubic Metric*). Ambas as métricas são utilizadas para aferir a quantidade de distorção introduzida por PA's, de forma que a minimização das mesmas fornecem ganhos significativos ao sistema de comunicação. Resultados de simulações são apresentadas para avaliar o desempenho do conjunto de técnicas propostas.

Palavras-Chave—OFDM, comunicação cooperativa, PTS, amplificador de potência, PAPR, CM

Abstract—This paper proposes a set of techniques for peak reduction in a cooperative OFDM system with AF relay and nonlinear PAs. The set of techniques are based on the PTS technique and they use PAPR and CM as metrics for choosing the transmitted signal. Both metrics are used to measure the amount of distortion introduced by PAs, so that minimizing them provides significant gains to the communication system. Numerical simulation results are presented to evaluate the performance of the set of proposed techniques.

Keywords—OFDM, cooperative communication, PTS, power amplifier, PAPR, CM

I. INTRODUÇÃO

As comunicações cooperativas e a multiplexação por divisão de frequências ortogonais (OFDM) têm ganhado bastante destaque no cenário das comunicações sem fio. Sistemas de comunicação cooperativos aproveitam-se da diversidade espacial através da cooperação entre os nós dentro de uma célula de uma rede sem fio. Já os sistemas OFDM permitem altas taxas de transmissões de dados, boa robustez a interferência intersimbólica (*Intersymbol Interference* - ISI), e baixa complexidade [1].

Apesar das vantagens oferecidas pelos sistemas OFDM, uma de suas principais desvantagens está relacionada ao alto valor da razão entre a potência máxima instantânea e a potência média do sinal transmitido (PAPR) [1]. Sinais que possuem alta PAPR podem atingir a região não linear de amplificadores de potência ou de outros dispositivos não lineares, provocando distorções ao sinal original. Essas distorções comprometem a qualidade dos dados transmitidos e, por consequência, corrompem a comunicação entre usuários. Além disso, a alta PAPR limita a potência de transmissão, diminuindo a área de cobertura.

A partir dessa problemática é que surge a necessidade do estudo de técnicas que assegurem que os picos de potência

do sinal OFDM sejam diminuídos. Uma enorme variedade de técnicas tem sido propostas a fim de mitigar os efeitos da alta PAPR. A literatura classifica essas técnicas essencialmente em três grupos. O primeiro inclui técnicas que causam distorções ao sinal OFDM, como por exemplo, *Clipping and Filtering*, *Peak Windowing* e *Peak Cancellation* [2]. O segundo grupo engloba técnicas que promovem o embaralhamento (*scrambling*) da informação, das quais as mais conhecidas são: *Tone reservation* - (TR) [3], Mapeamento Seletivo (*Selected Mapping* - SLM) [4] e Transmissão Parcial de Sequências (*Partial Transmit Sequence* - PTS) [5]. Por fim, o terceiro grupo é composto por técnicas de codificação que propõem a detecção e correção de erros, limitando ou eliminando os símbolos com alta PAPR [3].

Apesar dos bons resultados fornecidos pelas técnicas citadas acima, a literatura tem dado grande destaque à técnica de embaralhamento do sinal PTS. Esse enfoque é atribuído devido ao PTS ter se mostrado um algoritmo mais eficiente quando comparado às demais técnicas [5]. Nessa técnica, o sinal original é rotacionado por diferentes sequências de fatores de fase, produzindo sinais com diferentes PAPR's. Dentre esses sinais candidatos, é escolhido aquele que fornece a menor PAPR.

Na literatura já existem muitas modificações do PTS produzidas com o intuito de maximizar os ganhos do método. Em [6] é proposta a integração entre as técnicas SLM e PTS, conhecida como PTS-M (PTS Modificado). Já em [7] o autor propõe um esquema de PTS que atualiza o conjunto de fatores de fase de forma iterativa até que a PAPR assuma um valor abaixo de um limite especificado.

Mesmo com as contribuições fornecidas pelos trabalhos mencionados acima, são poucos os trabalhos [8][9][10] que tratam de técnicas de redução da PAPR e que levam em conta as particularidades de sistemas OFDM cooperativos. Além disto, estes artigos consideram que apenas o *relay* possui PA não linear, enquanto o presente trabalho considera que tanto a fonte quanto o *relay* possuem PA's não lineares.

Sabendo que, em sistemas cooperativos, no *downlink*, é preferível que a carga de processamento no *relay* possua menor complexidade do que no nó fonte, o objetivo deste artigo é apresentar novas técnicas de redução de PAPR para sistemas OFDM cooperativos baseadas na técnica PTS, de forma que possamos diminuir as distorções inseridas pela fonte e pelo *relay*, utilizando um algoritmo que concentre a carga de processamento inteiramente na fonte. As novas técnicas se assemelham ao PTS, a principal mudança está relacionada ao tipo de escolha da sequência que diminuirá a PAPR.

A ideia principal do conjunto de novas técnicas é aplicar na fonte, uma versão modificada da técnica PTS onde são

Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, PPGEEC. Universidade Federal do Ceará, Sobral, Brasil. E-mails: livia.sousa43@gmail.com, alexandrefernandes@ufc.br.

levadas em conta a PAPR na fonte e uma estimativa da PAPR no *relay*. A estimativa da PAPR no *relay* é feita a partir de uma versão não ruidosa do sinal transmitido pelo *relay*. Na fonte são calculadas duas PAPR's: a do sinal da fonte e a do sinal no *relay* (baseada na versão não ruidosa estimada pela fonte). De posse dessas duas PAPR's são propostos critérios que escolhem o sinal que apresenta menor nível de distorção não linear.

Assim como a PAPR, outra métrica que mede a flutuação de amplitude de sinais OFDM é conhecida como Métrica Cúbica (*Cubic Metric - CM*) [11]. Estudos sobre PAPR e CM sugerem que a CM está mais intimamente relacionada com a quantidade de distorção induzida por um amplificador de potência não-linear do que a PAPR [12]. Tal como ocorre na PAPR, pesquisas vem sendo realizadas sobre técnicas que reduzam a CM [13][14]. Dessa forma, esse trabalho propõe também um conjunto de técnicas que tomam como base a métrica CM, além de comparar a relação entre essas duas métricas, PAPR e CM.

O restante desse trabalho está estruturado da seguinte forma: Na Seção II é apresentado o modelo de sistema considerado para esse trabalho. Na Seção III são apresentadas a técnica PTS Convencional e as técnicas propostas pelo presente trabalho. Na Seção IV são apresentados os resultados obtidos a partir de simulações computacionais. E por fim, a Seção V apresenta as principais conclusões extraídas no decorrer deste trabalho, e destaca os principais resultados obtidos.

II. MODELO DO SISTEMA

O modelo de sistema cooperativo considerado neste trabalho é composto por um transmissor OFDM, um *relay*, cujo protocolo de retransmissão utilizado é o amplifica-e-encaminha (Amplify-and-FoAF), e um receptor OFDM. Nesse modelo foi assumido que cada nó da rede possui uma única antena funcionando no modo *half-duplex*, e que todos os canais do sistema são independentes entre si, possuindo desvanecimento *Rayleigh* seletivo em frequência. Foi suposto também que a fonte e o *relay* possuem conhecimento prévio do enlace fonte-*relay*.

A fonte e o *relay* são multiplexados no tempo, ou seja, as informações são transmitidas em dois *slots* de tempo diferentes. No primeiro instante de transmissão, a fonte (F) envia a informação para o *relay* (R) através do enlace FR. O *relay* atribui um ganho ao sinal recebido e, em um segundo momento, esse sinal amplificado é retransmitido pelo *relay* ao destino (D) através do enlace RD. A Figura 1 mostra o modelo de sistema OFDM cooperativo descrito acima.

A respeito da potência de transmissão, a fonte transmite a informação com potência P_f e o *relay* retransmite com uma potência P_r . A princípio, é gerada uma sequência aleatória uniformemente distribuída de bits, e em seguida modulada utilizando uma constelação PSK (*Phase-Shift Keying*) ou QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*). Por conseguinte, é aplicada a IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) e adicionado o prefixo cíclico para que então sejam gerados os símbolos OFDM. Por fim, o sinal da fonte é submetido a um PA que possui características não lineares. Todas as operações relacionadas ao OFDM se repetem no processo de retransmissão



Fig. 1. Modelo do sistema OFDM Cooperativo.

no *relay*, e de maneira similar o sinal retransmitido também é submetido a um PA não linear.

No domínio da frequência, o sinal recebido pelo *relay* através do enlace FR, na n -ésima subportadora, é dado por:

$$y_n^{(FR)} = h_n^{(FR)} \mathcal{F}_n \left(f^{(F)} \left(\sqrt{P_f} \tilde{\mathbf{x}} \right) \right) + w_n^{(FR)}, \quad (1)$$

para $1 \leq n \leq N$, em que $h_n^{(FR)}$ é a resposta em frequência do canal na n -ésima subportadora do link fonte-*relay*, $w_n^{(FR)}$ é o ruído branco Gaussiano aditivo (AWGN - *Additive White Gaussian Noise*) do link FR da n -ésima subportadora, com média nula e variância $\sigma_w^{2(FR)}$, $\mathcal{F}_n(\cdot) : C^N \rightarrow C$ é a função que retorna o n -ésimo valor da transformada discreta de Fourier (DFT - *Discrete Fourier Transform*) do vetor de entrada, $f^{(F)}(\cdot) : C^N \rightarrow C^N$ é a função que modela o PA não linear da fonte e $\tilde{\mathbf{x}} \in C^N$ é o vetor com os sinais transmitidos no domínio do tempo.

No segundo *slot* de tempo, o *relay* proporciona um ganho G_n a cada subportadora do sinal recebido $y_n^{(FR)}$ no domínio da frequência, para que então a informação possa ser retransmitida. Logo, o sinal que chega ao destino, retransmitido pelo *relay*, na n -ésima subportadora no domínio da frequência pode ser escrito como:

$$y_n^{(RD)} = h_n^{(RD)} \mathcal{F}_n \left(f^{(R)} \left(\tilde{\mathbf{y}}^{(FR)} \right) \right) + w_n^{(RD)}, \quad (2)$$

em que $h_n^{(RD)}$ é a resposta em frequência da n -ésima subportadora do canal RD, $f^{(R)}(\cdot) : C^N \rightarrow C^N$ é função que modela o PA não linear do *relay*, $w_n^{(RD)}$ é o correspondente AWGN e $\tilde{\mathbf{y}}^{(FR)} \in C^N$ é o vetor com os sinais transmitidos pelo *relay* no domínio do tempo, dado pela transformada inversa de Fourier discreta (IDFT - *Inverse Discrete Fourier Transform*) da sequência $\{G_n y_n^{(FR)}\}$, para $n = 1, \dots, N$. Destaca-se a necessidade de retirar, no receptor, os ganhos atribuídos pelos canais em cada subportadora e posteriormente realizar a demodulação dos símbolos transmitidos.

A partir de (1) e (2) é possível observarmos que os dados transmitidos sofrem modificações devido às funções que modelam os amplificadores de potência não lineares. Dessa forma, sinais OFDM estão sujeitos a distorções introduzidas pelos PA's não lineares, limitando a potência do sinal e comprometendo a comunicação entre usuários. A equação que modela a PAPR de sinais OFDM no tempo é dada por [1]:

$$PAPR = \frac{\max_{1 \leq n \leq N} |\tilde{x}_n|^2}{E[|\tilde{x}_n|^2]} \quad (3)$$

em que o operador $E[\cdot]$ é definido como a função esperança do sinal \tilde{x}_n no domínio do tempo.

Outra métrica estreitamente relacionada com a quantidade de distorção na saída de um amplificador não-linear é a métrica cúbica (CM) [11]. A CM é definida como [15]:

$$CM|_{dB} \triangleq \frac{RCM|_{dB} - RCM_{ref}|_{dB}}{K}, \quad (4)$$

em que RCM é definido por:

$$RCM[\tilde{x}_n]|_{dB} \triangleq 20 \log \left[rms \left[\left(\frac{|\tilde{x}_n|}{rms|\tilde{x}_n|} \right)^3 \right] \right], \quad (5)$$

e $RCM_{ref}|_{dB}$ e K são constantes determinadas de acordo com os sistemas OFDM considerados. Para esse trabalho foi considerado $RCM_{ref}|_{dB} = 1.52$ e $K = 1.56$ [11].

III. TÉCNICAS DE REDUÇÃO DE PICOS

Conforme mencionado em seções anteriores, a alta PAPR provoca distorções em sinais OFDM quando submetidos a amplificadores de potência não lineares, comprometendo a ortogonalidade entre subportadoras e diminuindo a qualidade da transmissão em sistemas de comunicação. Dessa forma, torna-se necessário desenvolver técnicas que assegurem a qualidade dos sinais a serem transmitidos.

A Subseção a seguir apresenta, de forma breve, a técnica PTS que serviu como base para a proposição das nossas novas técnicas. Em seguida, as técnicas propostas são apresentadas.

A. PTS Convencional

Nessa técnica o bloco de dados na frequência x_n , com N subportadoras, é segmentado em uma quantidade menor de sub-blocos U disjuntos e não sobrepostos $x_n^{(u)}$, $u = 1, \dots, U$. A IFFT com N pontos é aplicada aos vetores presentes em cada sub-bloco, onde apenas N/U pontos são não nulos, e os demais pontos da IFFT são nulos. Depois de aplicada a IFFT, cada sub-bloco $\tilde{x}_n^{(u)}$ é rotacionado por um fator de fase $b_d^{(u)}$, em que d é o número de sequências de rotação de fase. Posteriormente, todos os sub-blocos são somados, de forma que vários sinais candidatos são gerados ($\tilde{x}_{d,n}$). Matematicamente isso significa que [5]:

$$\tilde{x}_{d,n} = \sum_{u=1}^U b_d^{(u)} \cdot \tilde{x}_n^{(u)} \quad (6)$$

A escolha dos valores que compõe o conjunto $\Phi_w \in [0, 2\pi)$, em que Φ_w é o w -ésimo fator de rotação de fase do conjunto Φ , influencia diretamente na redução da PAPR. Quanto mais valores dentro do conjunto maior a probabilidade de se encontrar símbolos com baixa PAPR [6].

No PTS, originalmente, há um bloco decisor que utiliza como critério de escolha a menor PAPR dentre todos os sinais candidatos. A possibilidade de, com alta probabilidade, poder encontrar uma sequência que diminua a PAPR é que faz a técnica PTS ser tão conhecida atualmente na literatura.

B. SR-PTS PAPR (Source-Relay PTS PAPR)

Em sistemas que empregam técnicas de redução de PAPR que reduzem as distorções inseridas por amplificadores de potência não lineares, existe um perceptível compromisso entre o nível permitido de distorção não-linear e a complexidade do sistema. Em sistemas cooperativos, no *downlink*, é desejável que a carga de processamento no *relay* possua

menor complexidade do que no nó fonte, uma vez que, em enlaces descendentes, o *relay* é uma unidade móvel ou uma pequena estação retransmissora, com menor capacidade de processamento do que a estação rádio base (ERB). Partindo desse contexto, nesta subseção é proposto um conjunto de técnicas de redução de PAPR baseadas no algoritmo PTS. Neste conjunto de técnicas, a PAPR da fonte e do *relay* são reduzidas, entretanto, a carga de processamento do algoritmo de redução de PAPR é inteiramente concentrada na fonte.

Supondo que a fonte conhece o canal do enlace *relay*-destino é possível calcular o ganho G_n (Protocolo AF), e então estimar uma versão não ruidosa do sinal retransmitido pelo *relay*. Essas operações simulam a utilização da técnica PTS Convencional no *relay*, entretanto, as operações são realizadas na fonte, eximindo o *relay* de operações relacionadas à redução da PAPR. Dizemos que essa versão é estimada uma vez que não é possível determinar o ruído no *relay*. A versão estimada não ruidosa do sinal transmitido pelo *relay* é dada por:

$$y_{n,d}^{(e)} = IFFT\{x_{d,n} \cdot G_n \cdot h_n^{(FR)}\} \quad (7)$$

em que $x_{d,n}$ são os sinais candidatos gerados utilizando (6).

Até esse ponto, o conjunto de técnicas propostas muito se assemelham à técnica PTS Convencional, realizando um embaralhamento no sinal e gerando novos sinais com novas possíveis PAPR's. Entretanto, nesse trabalho, propomos novos critérios de escolha para o bloco decisor da técnica PTS Convencional. Para esses critérios são calculadas duas PAPR's: a PAPR da fonte e a estimação da PAPR do *relay* calculada pela fonte. Em um primeiro momento, a fonte aplica a técnica PTS convencional à versão original do sinal OFDM a ser transmitido, e então calcula a PAPR desse sinal. Em seguida, é então estimada a versão não ruidosa do sinal recebido no *relay*, e então calculada a PAPR desse sinal. É importante ressaltar que a rotação de fase do sinal OFDM é feita apenas na fonte, mas tem efeito nas duas PAPR's calculadas. Em posse dessas duas PAPR's é aplicado um dos 05 (cinco) critérios a seguir:

- Menor PAPR da fonte (M1): Nesse critério de escolha, o bloco decisor atua de forma semelhante ao PTS original, escolhendo o sinal candidato que apresenta a menor PAPR do sinal OFDM original transmitido pela fonte.
- Menor PAPR do *relay* (M2): Neste caso, de todas as versões não ruidosas dos sinais estimados do *relay* pela fonte é escolhido aquela cujo embaralhamento através dos fatores de fase forneceu a menor PAPR.
- Menor da máxima PAPR entre fonte e *relay* (M3): Nesse critério é escolhido o sinal candidato que fornece a menor PAPR dentre a máxima PAPR obtida a partir dos sinais candidatos da fonte e da versão estimada não ruidosa dos sinais candidatos que chegaram ao *relay*.
- Mínimo da Soma (M4): As duas PAPR's são somadas e, dentre todos os sinais candidatos, aquele com o menor valor de soma das PAPR's é escolhido. Nesse critério, a soma das PAPR's é dada por:

$$\gamma_{soma}^m = \gamma_{fonte}^m + \gamma_{relay}^m, \quad (8)$$

em que m é o índice da sequência candidata, γ_{fonte} é a PAPR da fonte, e γ_{relay} é PAPR do *relay* estimada pela fonte.

- Mínimo do produto (M5): De forma similar são calculadas as duas PAPR's mencionadas acima, mas ao invés da soma é realizado o produto desses dois valores e, em seguida, escolhido o sinal candidato com o menor valor dentre todos os produtos. O produto das PAPR's é dado por:

$$\gamma_{produto}^m = \gamma_{relay}^m \cdot \gamma_{fonte}^m \quad (9)$$

Após seleção a partir de algum dos cinco (05) critérios mencionados acima, o sinal candidato escolhido é transmitido pela fonte.

Dos critérios propostos nesse trabalho para o bloco decisor, esperamos que o critério M1 minimize apenas a PAPR da fonte, enquanto que o critério M2 minimize apenas a PAPR do *relay*. Para modelos de sistema que considerem PA's não lineares na fonte e no *relay* é esperado que os critérios M3, M4 e M5 apresentem melhor desempenho quando comparados aos critérios M1 e M2, uma vez que levam em conta tanto a PAPR da fonte quanto a PAPR do sinal estimado não ruidoso do *relay*.

Em outras palavras, a ideia da família de técnicas propostas é reduzir as distorções inseridas pelo PA da fonte e do *relay* através da proposição de uma nova técnica que baseia-se no PTS convencional, mas que utiliza algoritmos diferentes no bloco decisor da sequência a ser transmitida. Além, é claro, de fornecer ao sistema menos complexidade no *relay*.

C. SR-PTS CM (Source-Relay PTS Cubic Metric)

Nessa técnica são aplicadas rotações de fase ao sinal OFDM, em seguida é calculada a CM para cada um dos sinais candidatos. Nessa técnica, também são geradas versões não ruidosas de possíveis sinais candidatos a retransmissão no *relay*, e em seguida são calculadas as CM's no *relay* desses sinais candidatos. A partir desses dois vetores com valores das CM's (tanto da fonte, quanto do *relay*) no bloco decisor é aplicado então algum dos seguintes critérios:

- Menor CM da fonte (CM1): O bloco decisor escolherá o sinal candidato que apresenta a menor CM do sinal OFDM transmitido pela fonte.
- Menor CM do *relay* (CM2): Neste caso, é escolhida a sequência que forneceu a menor CM de todas as versões não ruidosas de possíveis sinais candidatos a retransmissão no *relay*.

TABELA I

PARÂMETROS INICIAIS DAS SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS.

Parâmetro	Valor
Nº de subportadoras	256
Modulação	16-QAM
Potência de transmissão da fonte	0.4 W
Potência de transmissão do <i>relay</i>	0.4 W
Nº taps do canal	4.0
Tamanho do prefixo cíclico	4.0
Distâncias fonte- <i>relay</i> / <i>relay</i> -destino	0.5 m
Coefficiente de perda de percurso	4.0
Nº de sub-blocos	32
Nº de sequências de rotação de fase	30

- Menor do máximo CM entre fonte e *relay* (CM3): Nesse critério é escolhida a sequência que fornece menor CM

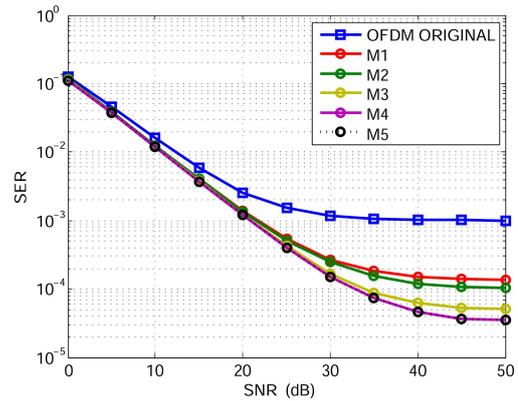


Fig. 2. SER versus SNR - Técnica SR-PTS PAPR.

dentre a máxima CM obtida a partir dos dois vetores com valores das CM's (tanto da fonte, quanto do *relay*).

- Mínimo da Soma (CM4): As duas CM's são somadas e a sequência que fornecer o menor valor da soma das CM's é escolhida.
- Mínimo do produto (CM5): Nesse critério é realizado o produto entre os vetores de CM's (fonte e *relay*) e, em seguida, escolhido o sinal candidato com o menor valor dentre todos os produtos de CM's.

A partir da descrição dos critérios acima, é possível observarmos as similaridades entre as técnicas SR-PTS PAPR e SR-PTS CM. Já foi mostrado em [14] que CM é mais efetiva no combate de distorções não lineares que a PAPR. A literatura afirma que a métrica CM é mais eficaz que a PAPR, uma vez que a mesma considera as distorções do sinal causadas principalmente pelo produto de intermodulação não-linear de terceira ordem de PA's. Enquanto que a PAPR considera apenas o pico principal de potência de símbolos OFDM [15].

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados das aplicações das novas técnicas propostas na seção anterior em um sistema cooperativo OFDM. É realizada uma análise da técnica PTS Convencional (critério M1) frente aos demais critérios apresentados neste trabalho, além disto, é realizada também uma comparação entre as métricas PAPR e CM. Para essa análise, as simulações computacionais foram realizadas no software *MATLAB*[®] e foi utilizada como métrica de avaliação a SER (*Symbol Error Ratio*), para uma média de 10^4 amostras de Monte Carlo em diversos cenários.

Consideramos que os sinais transmitidos na fonte e no *relay* passam por PA's não lineares do modelo *soft-clipping* [16], com amplitude de saturação igual a 1,0 na fonte e no *relay*. A escolha desse modelo deve-se à sua conformidade com as curvas reais dos amplificadores de potência, sua simplicidade e grande aplicabilidade.

Com relação as técnicas PTS, SR-PTS PAPR, e SR-PTS CM foi utilizado um particionamento do tipo adjacente [6], devido a maior facilidade de implementação computacional.

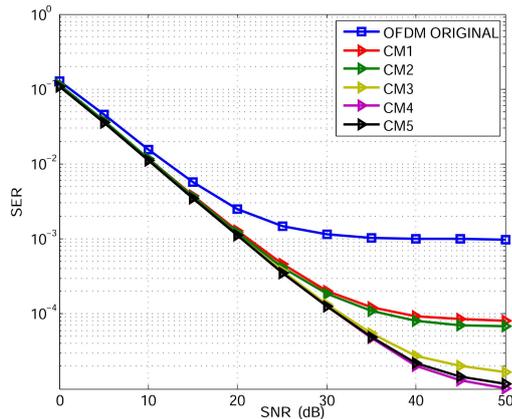


Fig. 3. SER versus SNR - Técnica SR-PTS CM.

O número de sub-blocos foi variado ao longo das simulações, assim como o número de seqüências de rotação de fase. Essas seqüências foram geradas de forma aleatória e pertencem ao intervalo $\Phi_w \in [0, 2\pi)$. A Tabela I apresenta ainda, alguns outros parâmetros utilizados nas simulações.

Inicialmente foi observado o desempenho da técnica SR-PTS PAPR frente ao sinal OFDM original e à utilização do PTS Convencional (Critério M1). A Figura 2 mostra a SER em função da SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) média para todos os critérios da técnica SR-PTS PAPR proposta nesse trabalho. É possível observarmos que todos os critérios aqui propostos, quando aplicados ao bloco decisor, apresentam resultados significativos na diminuição da SER, quando comparados tanto ao sinal OFDM original quanto a técnica PTS Convencional, em especial nas SER's fornecidas pelos critérios M3, M4 e M5. Nas altas SNR's, quando comparada o uso da técnica SR-PTS PAPR ao sinal OFDM original, a SER chega a ser aproximadamente 100 vezes menor. Esses 03 (três) critérios apresentaram melhores resultados uma vez que para a escolha da seqüência candidata, os mesmos levam em consideração tanto a PAPR da fonte, quanto a PAPR do sinal estimado do *relay*, de forma que há uma minimização simultânea da PAPR tanto na fonte quanto no *relay*.

Em seguida, para os mesmos parâmetros da técnica anterior foram analisadas as contribuições fornecidas pela técnica SR-PTS CM. A Figura 3 apresenta a SER em função da SNR média (variando de 0 a 50 dB) para todos os critérios da técnica SR-PTS CM proposta nesse trabalho. Podemos observar que as SER's dos critérios propostos nesse trabalho apresentam desempenho bem superior a ausência do uso de técnicas que reduzem as distorções não lineares. Os melhores casos foram obtidos quando utilizados os critérios CM3, CM4, e CM5, uma vez que levam em conta tanto a CM da fonte quanto a CM do *relay*.

Os gráficos fornecidos pelas Figuras 2 e 3 nos permitem ainda constatar a superioridade da métrica CM frente a PAPR, conforme esperado. A técnica SR-PTS CM, para todos os critérios propostos nesse trabalho, sempre fornece melhor desempenho do que a técnica SR-PTS PAPR.

V. CONCLUSÕES

Nesse artigo foram apresentadas duas novas famílias de técnicas que visam a diminuição das distorções inseridas por PA's não lineares, tanto na fonte quanto no *relay*, em um cenário OFDM cooperativo. Além de diminuir a carga de processamento no *relay* no *downlink*, ambas as técnicas se mostraram bastante eficazes e cumpriram com os objetivos propostos neste trabalho. Outra contribuição importante fornecida está relacionada a comprovação da superioridade da métrica CM frente à PAPR. Em trabalhos futuros pretendemos propormos técnicas de redução de distorções inseridas por PA's não lineares em sistemas GFDM (*Generalized Frequency Division Multiplexing*) e MIMO (*Multiple-Input/Multiple-Output*).

REFERÊNCIAS

- [1] GOLDSMITH, A., "Wireless Communications". *Cambridge University Press*, 2005.
- [2] PRASAD R., "OFDM for Wireless Communications Systems", *Artech House*, vol. 1th Edition, 2004.
- [3] Y. RAHMATALLAH; S. MOHAN, "Peak-To-Average Power Ratio Reduction in OFDM Systems: A Survey And Taxonomy", *IEEE Communication Surveys and Tutorials*, vol. 15, no. 5, (2013), pp. 1567-1592.
- [4] R. W. BAUML, R. F. H. FISCHER and J. B. HUBER, "Reducing the peak-to-average power ratio of multicarrier modulation by selected mapping," in *Electronics Letters*, vol. 32, no. 22, pp. 2056-2057, 24 Oct 1996.
- [5] S. H. MULLER and J. B. HUBER, "OFDM with reduced peak-to-average power ratio by optimum combination of partial transmit sequences", in *Electronics Letters*, vol. 33, no. 5, pp. 368-369, 27 Feb 1997.
- [6] AQUINO, G. P., "Comparação entre técnicas de redução da PAPR em sinais OFDM". 2011. 85 p. Dissertação (Mestre em Telecomunicações) - Instituto Nacional de Telecomunicações - INATEL, Santa Rita do Sapucaí, 2011.
- [7] S. GARIMA, K. MANOJ, "A New subblock Partition Technique for PTS in OFDM Systems", *et al Int. Journal of Engineering Research and Applications*, Volume 4, Issue 1 (Version 1), January 2014, pp. 287-291.
- [8] BINTI HARUM, N.; YUDA, K.; OHTSUKI, T., "PAPR reduction of amplify-and-forward relay OFDM system using subcarrier pairing method", in *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2013 IEEE 24th International Symposium*, pp.2005-2010, 8-11 Sept. 2013.
- [9] Francisco Raimundo Albuquerque Parente, C. A. R. Fernandes, "Seleção de *Relay* e Redução de PAPR em Sistemas Cooperativos OFDM", *XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrt) e Processamento de Sinais*, Santarém - PA, 30 de agosto a 02 de setembro, 2016.
- [10] Pedro Marinho Ramos de Oliveira, C. A. R. Fernandes, "Pareamento de Subportadoras com Redução de PAPR em Sistemas OFDM Cooperativos", *XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrt) e Processamento de Sinais*, Santarém - PA, 30 de agosto a 02 de setembro, 2016.
- [11] 3GPP TSG RAN WG1 and 3GPP TSG RAN WG4, TDocs R4-040367, R1-040522 and R1-040642, "Comparison of PAR and cubic metric for power de-rating," May, 2004.
- [12] A. Behravan and T. Eriksson, "Some statistical properties of multicarrier signals and related measures," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. Spring*, vol. 4, May 2006, pp. 1854 - 1858.
- [13] X. Zhu, H. Hu, and Y. Tang, "Descendent clipping and filtering for cubic metric reduction in OFDM systems," *Electron. Lett.*, vol. 49, no. 9, pp. 599 - 600, Apr. 2013.
- [14] M. Deumal, A. Behravan, and J. L. Pijoan, "On cubic metric reduction in OFDM systems by tone reservation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 6, pp. 1612 - 1620, Jun. 2011.
- [15] K. H. Kim, J. S. No and D. J. Shin, "On the Properties of Cubic Metric for OFDM Signals," in *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 23, no. 1, pp. 80-83, Jan. 2016.
- [16] DARDARI, D.; TRALLI, V.; VACCARI, A., "A theoretical characterization of nonlinear distortion effects in OFDM systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 48, no. 10, pp. 1755 - 1764, Outubro 2000.