

# Seleção de *Relay* e Redução de PAPR em Sistemas Cooperativos OFDM

Francisco Raimundo Albuquerque Parente e C. Alexandre Rolim Fernandes

**Resumo**—Este artigo apresenta duas novas técnicas de redução de PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*) em sistemas de comunicação cooperativos OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) usando seleção de *relays* do tipo amplifica e encaminha (AF, do inglês *Amplify-and-Forward*). As técnicas propostas são baseadas em uma técnica clássica de seleção de *relay* que usa a capacidade de canal como critério de escolha. Entretanto, os novos métodos apresentados consideram não apenas a capacidade de canal, mas também a PAPR na escolha do *relay*. Resultados de simulações numéricas são apresentados para avaliar o desempenho das técnicas propostas.

**Palavras-Chave**— Comunicação cooperativa, OFDM, Redução da PAPR, Seleção de *relay*.

**Abstract**—In this work, two peak-to-average power ratio (PAPR) reduction techniques are proposed for cooperative orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) communication systems using relay selection with the amplify-and-forward (AF) protocol. The proposed techniques are based on a classical relay selection method that uses the channel capacity as the selection criterion. In order to select the best relay, the new methods consider not only the channel capacity used by the classical relay selection technique, but also the PAPR. Simulations results are provided to illustrate the behavior of the proposed techniques.

**Keywords**— Cooperative communication, OFDM, PAPR reduction, Relay selection.

## I. INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicação móveis têm evoluído bastante ao longo dos últimos anos. Particularmente, sua natureza de transmissão em *broadcast* facilitou o desenvolvimento do conceito de comunicações cooperativas, capazes de aumentar a área de cobertura das redes e a velocidade dos serviços prestados aos usuários [1].

Nas comunicações cooperativas, a seleção do *relay* a ser utilizado é uma das questões-chave na implementação de um sistema eficiente. Estudos na área têm mostrado que a maioria dos benefícios das redes cooperativas podem ser atingidos com mínima sobrecarga quando apenas o melhor *relay* coopera com a fonte [2].

O uso da seleção de *relay*, porém, não é garantia de melhor desempenho em redes cooperativas. [3] descreve um cenário em que a taxa de erro de *bit* de sistemas cooperativos convencionais pode ser melhor do que a de sistemas que adotam um método seleção, considerando alta relação sinal-ruído (*Signal-to-Noise Ratio* - SNR) e usuários em movimento.

Francisco Raimundo Albuquerque Parente e C. Alexandre Rolim Fernandes, Departamento de Engenharia da Computação, Universidade Federal do Ceará, *Campus* de Sobral, Sobral-CE, Brasil, E-mails: raimundo\_parente@hotmail.com, alexandre\_ufc@yahoo.com.br. C. Alexandre Rolim Fernandes é parcialmente financiado pelo CNPq.

Dessa maneira, uma técnica eficiente de seleção de *relay* é de fundamental importância para o bom desempenho da rede.

Existem várias abordagens de seleção de *relay* em sistemas cooperativos, dentre as quais pode-se citar [2]-[7]. Em particular, uma análise importante sobre seleção de *relay* ótima baseada na capacidade de canal é realizada em [6]. Nesse caso, apenas o *relay* que oferece a maior capacidade é escolhido para retransmitir o sinal para o destino.

Por outro lado, a multiplexação por divisão de frequência ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing* - OFDM) tem promovido o uso eficiente do limitado espectro disponível [8], [9]. No entanto, a OFDM tem a desvantagem de inserir grandes picos de amplitude no sinal transmitido, que podem cair na região não linear dos amplificadores de potência (*Power Amplifiers* - PAs), gerando distorção do sinal recebido.

Nesse contexto, um parâmetro fundamental para avaliar o desempenho dos sistemas é a PAPR (*Peak-to-Average Power Ratio*), que mede a relação entre a potência de pico e a potência média do sinal. Os valores de PAPR tendem a ser altos nos sistemas com multiplexação OFDM devido aos picos de amplitude do sinal recebido. Logo, é necessário reduzir a PAPR para evitar a distorção do sinal na região de saturação dos PAs, mantendo, portanto, uma taxa de erros aceitável no receptor.

Apesar de haver uma grande diversidade de técnicas de redução de PAPR na literatura [10], [11], como o Mapeamento Seletivo (*Selective Mapping* - SLM) e a Sequência de Transmissão Parcial (*Partial Transmit Sequence* - PTS), poucos trabalhos consideram o caso de sistemas de comunicação cooperativos. Dentre estes trabalhos, pode-se citar [12], que propôs uma técnica de redução de PAPR para sistemas de comunicação cooperativos com protocolo amplifica e encaminha (*Amplify-and-Forward* - AF) OFDM usando pareamento de subportadoras.

Como se percebe, há muitos trabalhos na literatura que tratam de redução da PAPR, bem como muitos outros que discutem a seleção de *relay*. Neste trabalho, os autores propõem unir essas duas abordagens para melhorar o desempenho do sistema. Em particular, são propostas duas técnicas de redução de PAPR em sistemas cooperativos OFDM usando seleção de *relays* do tipo AF com o intuito de reduzir a taxa de erro de símbolo (*Symbol Error Rate* - SER) quando PAs não lineares são considerados. Os métodos propostos são baseados em uma técnica clássica de seleção de *relay* que usa a capacidade de canal como critério de escolha [6]. Porém, as novas técnicas apresentadas consideram não apenas a capacidade, mas também a PAPR na escolha do melhor *relay*. Desse modo, almeja-se melhorar a SER do sistema com a menor perda de

capacidade possível.

O presente trabalho considera um enlace descendente de comunicação. Assim, a fonte é uma estação rádio base com PAs de maior qualidade, enquanto que o *relay* é uma unidade móvel ou uma pequena estação base com menos recursos de *hardware*. Por isso, considera-se que somente o *relay* possui PA não linear, enquanto que a fonte possui PA linear [9].

O restante deste trabalho está organizado da seguinte forma. A Seção II descreve o modelo de sistema considerado. Na Seção III, as técnicas de redução de PAPR são introduzidas. A Seção IV contém os resultados de simulação, e, por fim, a Seção V fornece as principais conclusões acerca do trabalho.

## II. MODELO DE SISTEMA

Nesta seção, a modelagem matemática dos sistemas OFDM cooperativos que implementam seleção de *relay* é apresentada, discutindo-se a problemática da alta PAPR que afeta o desempenho de tais sistemas.

### A. Sistema Cooperativo OFDM com Seleção de Relay

O presente trabalho considera um sistema cooperativo que utiliza o protocolo AF com uma fonte,  $M$  relays e um nó de destino. Assume-se que os relays possuem uma única antena e são *half-duplex*. Além disso, a transmissão ocorre em dois intervalos de tempo, um no enlace fonte-*relay* (SR) e outro no enlace *relay*-destino (RD), com canais independentes e identicamente distribuídos, em que a modulação utilizada é a modulação de amplitude em quadratura (*Quadrature Amplitude Modulation* - QAM).

Assim, seja um sistema cooperativo OFDM em que todas as  $N$  portadoras do nó fonte têm a mesma potência de transmissão  $P_S$ . O sinal recebido no domínio da frequência no canal entre a fonte e o  $m$ -ésimo *relay* e o sinal transmitido pelo  $m$ -ésimo *relay* são dados, respectivamente, por:

$$y_{n,m}^{(SR)} = h_{n,m}^{(SR)} \sqrt{P_S} x_n + v_{n,m}^{(SR)} \quad (1)$$

e

$$q_{n,m}^{(R)} = c_{n,m} y_{n,m}^{(SR)}, \quad (2)$$

em que  $h_{n,m}^{(SR)}$  é a resposta em frequência do canal entre a fonte e o *relay*,  $x_n$  é o símbolo de informação transmitido,  $v_{n,m}^{(SR)}$  é o ruído aditivo branco gaussiano (*Additive White Gaussian Noise* - AWGN), e  $c_{n,m}$  é o ganho do *relay* AF. Em todas as variáveis acima e a seguir, o índice  $n$ ,  $1 \leq n \leq N$ , corresponde ao número da subportadora, e o índice  $m$ ,  $1 \leq m \leq M$ , se refere ao *relay* escolhido por uma das técnicas de seleção detalhadas na Seção III.

No *relay*, considera-se que todas as portadoras têm a mesma potência de transmissão  $P_R$ . Desde que o valor de  $h_{n,m}^{(SR)}$  seja conhecido no *relay*, tem-se, para ganho variável [1]:  $c_{n,m} = \sqrt{P_R} / \sqrt{(|h_{n,m}^{(SR)}|^2 P_S + \sigma_v^2)}$ , em que  $\sigma_v^2$  é a variância do ruído.

Após o cálculo da transformada discreta de Fourier inversa (*Inverse Discrete Fourier Transform* - IDFT) e a inserção do prefixo cíclico, a versão no domínio do tempo de  $q_{n,m}^{(R)}$ ,  $1 \leq n \leq N$ , é amplificada por um PA que é modelado por uma função sem memória  $F(\cdot)$ . Logo, tem-se que:

$$\tilde{z}_{n',m}^{(R)} = F(\tilde{q}_{n',m}^{(R)}), \quad (3)$$

em que  $n'$  é o índice correspondente ao tempo discreto tal que  $1 \leq n' \leq N + M_{PC}$ ,  $M_{PC}$  é o comprimento do prefixo cíclico, e  $\tilde{q}_{n',m}^{(R)}$  e  $\tilde{z}_{n',m}^{(R)}$  são os sinais de entrada e de saída do PA no domínio do tempo, respectivamente. Além disso, considera-se que o PA no *relay* é representado usando-se o modelo *soft-clipping* expresso por [8]:

$$F(\tilde{q}_{n',m}^{(R)}) = \begin{cases} \tilde{q}_{n',m}^{(R)} & \text{se } |\tilde{q}_{n',m}^{(R)}| \leq A_{sat} \\ A_{sat} e^{j\angle \tilde{q}_{n',m}^{(R)}} & \text{se } |\tilde{q}_{n',m}^{(R)}| > A_{sat} \end{cases},$$

em que  $A_{sat}$  é a amplitude de saturação do PA considerado.

O sinal recebido no canal entre o *relay* e o destino pode ser expresso por:

$$y_n^{(RD)} = h_{n,m}^{(RD)} z_{n,m}^{(R)} + v_{n,m}^{(RD)}, \quad (4)$$

em que  $h_{n,m}^{(RD)}$  é a resposta em frequência do canal entre o *relay* e o destino,  $v_{n,m}^{(RD)}$  é o componente AWGN e  $z_{n,m}^{(R)}$  é a transformada discreta de Fourier (*Discrete Fourier Transform* - DFT) de  $\tilde{z}_{n',m}^{(R)}$ , para  $1 \leq n' \leq N$ .

A SNR do sinal recebido pelo destino através do enlace fonte-*relay*-destino (SRD) é dada por [1]:

$$\gamma_{n,m} = \frac{\gamma_{n,m}^{(SR)} \gamma_{n,m}^{(RD)}}{\gamma_{n,m}^{(SR)} + \gamma_{n,m}^{(RD)} + 1}, \quad (5)$$

em que  $\gamma_{n,m}^{(SR)} = |h_{n,m}^{(SR)}|^2 P_S / \sigma_v^2$  e  $\gamma_{n,m}^{(RD)} = |h_{n,m}^{(RD)}|^2 P_R / \sigma_v^2$ .

Desse modo, a capacidade resultante no destino  $C_m$  para o  $m$ -ésimo *relay* de um sistema com largura de banda total  $B$  e  $N$  portadoras pode ser expressa por:

$$C_m = \frac{B}{2N} \sum_{n=1}^N \log_2(1 + \gamma_{n,m}), \quad (6)$$

em que o fator  $1/2$  é devido ao fato de a comunicação acontecer em dois intervalos de tempo. As técnicas de seleção de *relay* discutidas na Seção III usam a capacidade dada por (6) no critério de seleção.

Alguns trabalhos demonstraram que, sob certas circunstâncias, a capacidade de sistemas OFDM cooperativos com PAs não lineares pode sofrer penalidades, assumindo valores menores que aqueles indicados em (6) [9]. Entretanto, estes resultados consideram que nenhum tipo de técnica de redução de PAPR é aplicada nos sinais transmitidos. Desta forma, nas simulações computacionais neste trabalho, considera-se que a capacidade é dada pela expressão (6).

### B. PAPR

Outro fator importante para o desempenho dos sistemas de comunicação OFDM é a PAPR. No caso de um sinal discreto no tempo, a PAPR é definida como [10]:

$$PAPR = \frac{\max_{1 \leq n' \leq \tilde{N}} |\tilde{y}_{n'}|^2}{E[|\tilde{y}_{n'}|^2]}, \quad (7)$$

em que  $\tilde{y}_{n'}$  é o sinal de entrada do PA com duração dada por  $\tilde{N}$ . No caso do modelo descrito na Seção II.A, o sinal na entrada do PA é expresso por  $\tilde{q}_{n',m}^{(R)}$ .

Devido ao fato de o sinal transmitido no tempo ser a soma dos sinais de diversas subportadoras, sistemas OFDM

são caracterizados por valores altos de PAPR. Assim, o sinal transmitido contém picos de amplitude que poderão cair na região de saturação (não linear) dos PAs, causando distorção do sinal propagado [8], [9]. Portanto, a PAPR deve ser mantida dentro de níveis considerados aceitáveis para garantir o bom funcionamento dos sistemas. Na próxima seção, serão apresentadas técnicas de seleção de *relay* que levam em conta a PAPR, de forma a amenizar os problemas acima descritos.

### III. TÉCNICAS DE SELEÇÃO DE RELAY

Nesta seção, inicialmente é apresentada a técnica clássica de seleção de *relay* baseada na capacidade de canal. Em seguida, duas novas técnicas são apresentadas, as quais consideram a PAPR no critério de seleção do melhor *relay*.

Todas as técnicas estudadas a seguir consideram a existência de um nó central que possui conhecimento perfeito dos canais envolvidos (enlaces SR e RD) e que realiza as operações necessárias à seleção de *relay*. Este nó central repassa a informação relacionada à escolha do *relay* aos outros nós do sistema através de canais de controle [13]. Além disso, é assumido que apenas um *relay* é selecionado, ou seja, o *relay* escolhido retransmite o sinal de todas as subportadoras ao destino [14].

#### A. Seleção de Relay Baseada na Capacidade de Canal

Uma forma clássica de seleção de *relay* consiste em selecionar o *relay* que oferece a máxima capacidade de recepção no destino [6], ou seja:

$$\hat{m} = \arg \max_{1 \leq m \leq M} C_m, \quad (8)$$

em que  $C_m$  é dada por (6). No restante do trabalho, este método será chamado de “Técnica Clássica”.

Essa abordagem maximiza a capacidade do sistema, minimizando a  $P_{\text{out}}$  ( $P_{\text{out}} = \text{Prob}[C < C_{\text{lim}}]$ ). Entretanto, esse critério de seleção, por não levar em conta a PAPR, pode apresentar uma elevada SER quando se considera modelos de PAs não lineares. Particularmente, no caso de sistemas com multiplexação OFDM, os sinais apresentam alta PAPR, o que aumenta a SER no receptor. Esse problema se agrava ainda mais quando o nível de saturação dos PAs são baixos, o que causa bastante distorção no sinal transmitido.

Dessa forma, para minimizar tal problema em sistemas cooperativos OFDM, duas diferentes técnicas de seleção de *relay* são propostas a seguir, com critérios que consideram não apenas a capacidade de canal, mas também a PAPR na escolha do *relay*.

#### B. Técnica Proposta 1: Seleção de Relay Baseada em PAPR Limiar

A primeira técnica proposta (Técnica Proposta 1 - TP1) também busca maximizar a capacidade, mas introduz uma restrição sobre a PAPR. Essa técnica considera que a PAPR no *relay* deve ser menor que um valor limiar. Assim, o *relay* selecionado é o que fornece a maior capacidade dentre os *relays* que possuem uma PAPR menor que o limiar tolerado pelo sistema. Caso nenhum *relay* ofereça valores de PAPR

inferior a esse limite especificado, seleciona-se o *relay* que fornece a mínima PAPR disponível. Matematicamente, tem-se:

$$\hat{m} = \arg \max_{m \in \mathcal{A}} C_m, \quad (9)$$

em que  $\mathcal{A}$  é o conjunto dos valores de  $m$  ( $1 \leq m \leq M$ ) tais que  $PAPR_m < PAPR_{\text{lim}}$ , sendo  $PAPR_m$  a PAPR do  $m$ -ésimo *relay* e  $PAPR_{\text{lim}}$  a PAPR limiar. Caso  $\mathcal{A}$  seja um conjunto vazio, adota-se o seguinte critério:

$$\hat{m} = \arg \min_{1 \leq m \leq M} PAPR_m. \quad (10)$$

Para a implementação desta técnica, os *relays* devem enviar, através de um canal de controle, os valores de PAPR para o nó central que realizará a escolha.

Essa abordagem diminui significativamente a PAPR no *relay* que usa PAs não lineares, o que melhora a SER no destino. Como contrapartida, porém, há diminuição na capacidade de canal, pois o enlace SRD correspondente ao *relay* escolhido pode apresentar baixa capacidade, aumentando a  $P_{\text{out}}$ . Portanto, essa técnica é uma solução que prioriza a diminuição dos picos de amplitude no sinal em detrimento da capacidade do enlace SRD.

#### C. Técnica Proposta 2: Seleção de Relay Baseada em Capacidade Limiar

Outra abordagem (Técnica Proposta 2 - TP2) capaz de melhorar significativamente a PAPR do sistema cooperativo OFDM considerado consiste na seleção do *relay* que minimiza a PAPR, entretanto, com uma restrição sobre a capacidade. Esse método seleciona o conjunto de *relays* que oferecem uma capacidade maior que uma capacidade limiar. Em seguida, dentre os *relays* desse conjunto, apenas aquele que oferece a mínima PAPR é escolhido para retransmitir a informação ao destino. Matematicamente, tem-se:

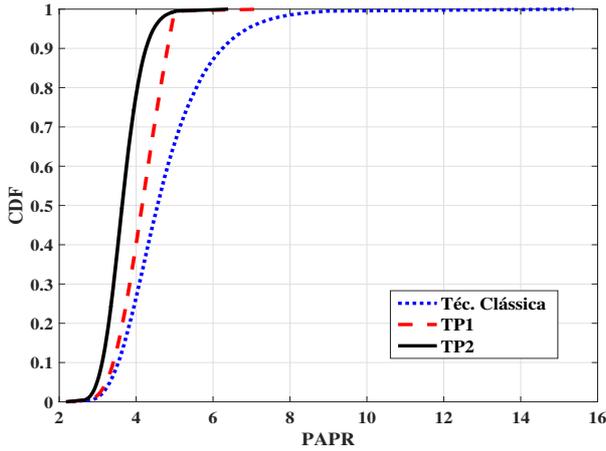
$$\hat{m} = \arg \min_{m \in \mathcal{B}} PAPR_m, \quad (11)$$

em que  $\mathcal{B}$  é o conjunto dos valores de  $m$  ( $1 \leq m \leq M$ ) tais que  $C_m > C_{\text{lim}}$ , sendo  $C_m$  a capacidade de canal do  $m$ -ésimo *relay* e  $C_{\text{lim}}$  a capacidade limiar.

Quando nenhum *relay* oferece capacidade maior que a limiar, seleciona-se o *relay* que ofereça a menor PAPR disponível, ou seja, o critério (10) é utilizado.

Para a implementação da TP2, os *relays* devem enviar, através de um canal de controle, os valores de PAPR para o nó central que realizará a escolha.

Quando um PA não linear no *relay* é considerado, esta técnica tende a proporcionar melhorias significativas na SER em comparação com a Técnica Clássica, com iguais probabilidades de interrupção. De fato, isso acontece pois, caso todos os *relays* forneçam capacidade abaixo da capacidade limiar, tanto a Técnica Clássica quanto a TP2 irão induzir a interrupção dos serviços. De forma análoga, caso haja algum *relay* que forneça capacidade acima da capacidade limiar, nem a Técnica Clássica nem a TP2 irão provocar a interrupção na comunicação.

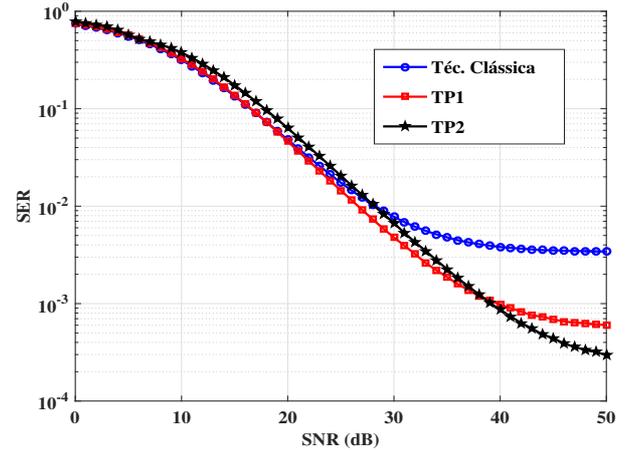
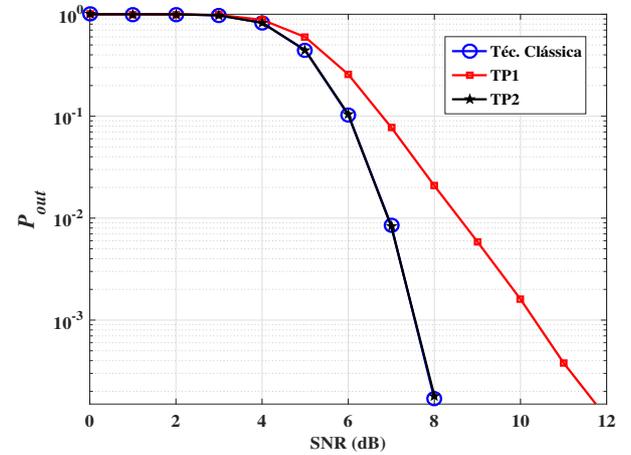
Fig. 1. Distribuição da CDF da PAPR no *relay* para as técnicas de seleção.

#### IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção, resultados de simulações computacionais são apresentados com o intuito de se analisar o desempenho das técnicas de redução de PAPR propostas. Quando não indicado em contrário, considera-se que os sistemas são simulados com base no modelo descrito na Seção II usando-se canais seletivos em frequência, desvanecimento do tipo *Rayleigh* com resposta ao impulso com 6 coeficientes, prefixo cíclico de tamanho 5, modulação 16-QAM,  $N = 64$  subportadoras,  $M = 5$  relays do tipo AF,  $P_S = P_R = 0,5W$  e  $PAPR_{lim} = 5$ . Para se obter o valor de PAPR limiar, simulações computacionais foram realizadas usando-se amostras de Monte Carlo da ordem de  $10^5$ . Assim, calculou-se a média dos valores empíricos de PAPR no *relay* obtidos nessas simulações, que se mostrou aproximadamente igual a 5. Já  $C_{lim}$  é a capacidade equivalente a uma SNR limiar de 5dB, o que implica que  $C_{lim} = \frac{1}{2} \log_2(1 + 10^{0,5}) = 1,03$  a partir de (6). Além disso, os PAs dos *relays* são representados pelo modelo *soft-clipping* [8] com amplitude de saturação e ganho unitários. Todos os resultados são uma média de  $10^5$  amostras de Monte Carlo e possibilitam avaliar o comportamento da SER, da  $P_{out}$  e da função de distribuição acumulada (*Cumulative Distribution Function* - CDF) da PAPR no *relay*.

A Fig. 1 mostra a CDF da PAPR do sinal transmitido pelo *relay* selecionado após a aplicação das diferentes técnicas de seleção de *relay* discutidas. Como se percebe, a TP2 apresenta a melhor distribuição dentre todas as técnicas mostradas, evidenciando que grande parte dos valores de PAPR encontram-se abaixo de cinco. Esse resultado já era esperado, uma vez que esta técnica usa como critérios primário e secundário a minimização da PAPR (critérios (11) e (10)). Além disso, como era esperado, a técnica TP1 apresentou uma menor PAPR que a Técnica Clássica.

A Fig. 2 mostra a SER em função da SNR média para as diferentes técnicas de seleção de *relay* discutidas. Como se percebe, à medida que a SNR aumenta, a Técnica Clássica apresenta um valor de saturação da SER pior do que todas as técnicas propostas. Isso já era esperado, pois a redução da PAPR implica na redução dos picos de amplitude que caíram

Fig. 2. SERs para as diferentes técnicas de seleção de *relay*.Fig. 3.  $P_{out}$  para as diferentes técnicas de seleção de *relay*.

na região não linear dos amplificadores de potência. Além disso, devido à maior redução de PAPR da TP2 em relação à TP1, mostrada na Fig. 1, o método TP2 converge para um patamar de SER mais baixo do que aquele da TP1.

Com o intuito de analisar o impacto das técnicas propostas na capacidade do sistema, a Fig. 3 mostra a  $P_{out}$  em função da SNR média para as diferentes técnicas de seleção de *relay* discutidas. A partir dessa figura, nota-se que a TP1 apresentou a pior curva dentre as mostradas. Isto ocorre pois essa técnica é uma solução que prioriza a diminuição dos picos de amplitude no sinal em detrimento da capacidade do enlace SRD, o que implica que o enlace SRD selecionado pode não oferecer boa capacidade de canal, aumentando a  $P_{out}$ . Ademais, como esperado, o método TP2 exibiu valores de  $P_{out}$  idênticos aos da Técnica Clássica, pelos motivos anteriormente expostos.

Outro resultado importante é o comportamento da SER à medida que o número de *relays* varia. A Fig. 4 mostra esse comportamento para a TP2 e a Técnica Clássica quando o número  $M$  de *relays* é 2, 6 e 10. Comparando-se as curvas mostradas, nota-se que a Técnica Clássica não oferece ganho significativo de SER à medida que o número de *relays* aumenta, com a SER tendendo a um mesmo valor de saturação

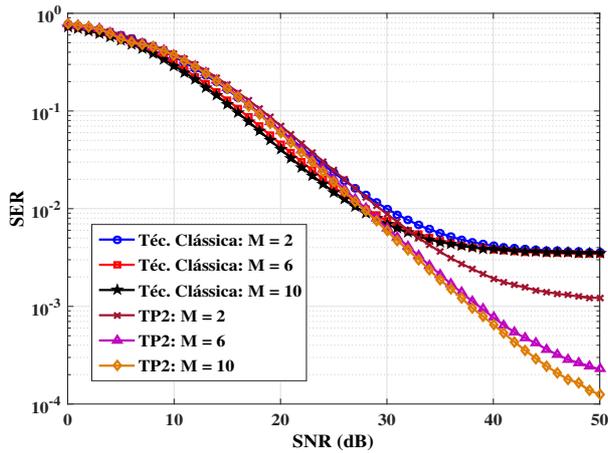


Fig. 4. Comparação entre as SERs da Técnica Clássica e da TP2 para  $M$  variável.

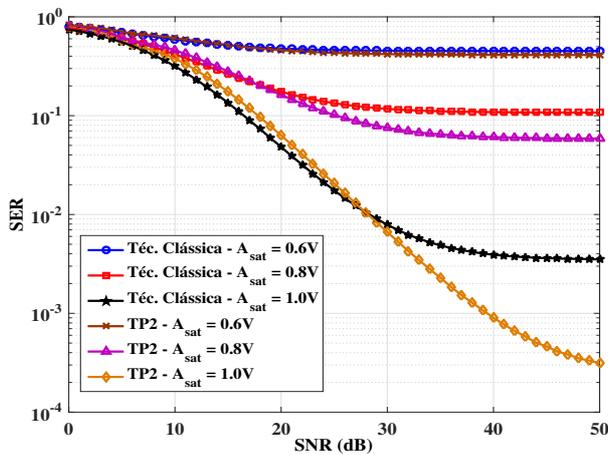


Fig. 5. Comparação entre as SERs da Técnica Clássica e da TP2 para diferentes amplitudes de saturação do PA no relay.

para altos valores de SNR. Já a TP2, pelo contrário, oferece ganhos significativos de SER para valores médios e altos de SNR à medida que o número de relays aumenta. Isto ocorre pois a TP2 inclui a PAPR como critério na seleção dos melhores relays, diferentemente da Técnica Clássica, que considera apenas a capacidade de canal.

A amplitude de ceifamento do modelo de PA *soft-clipping* é determinante para se mensurar o grau de distorção a que os sinais estão submetidos. Quanto menor a amplitude de saturação e maior a PAPR do sinal transmitido, maior a distorção da mensagem recebida e, assim, pior a SER resultante no destino. A Fig. 5 compara a SER da Técnica Clássica e da TP2 para diferentes valores de saturação dos amplificadores de potência. Como se percebe a partir do gráfico, para valores médios e altos de SNR, todas as curvas obtidas com a TP2 tendem a apresentar valores melhores de SER do que as obtidas com a Técnica Clássica, considerando-se a mesma amplitude de ceifamento. Essa diferença é ainda mais expressiva quando o nível de saturação do amplificador aumenta, situação na qual a TP2 apresenta ganhos de SER muito maiores do que a Técnica Clássica, considerando-se boas condições de SNR.

## V. CONCLUSÕES

Este trabalho tratou da problemática de redução da PAPR usando seleção de relay em sistemas cooperativos OFDM. Foram propostas duas novas técnicas de seleção de relay que levam em conta a PAPR do relay. As técnicas propostas apresentaram melhorias relacionadas à SER, PAPR e/ou probabilidade de interrupção. Particularmente, a TP2 se mostrou a mais eficiente em comparação com as demais técnicas, pois, em comparação com a Técnica Clássica, ofereceu SER de saturação muito melhor, sem piorar a probabilidade de interrupção. Além disso, a TP2 também forneceu a melhor distribuição da CDF da PAPR nos relays escolhidos em comparação com as demais técnicas. Em trabalhos futuros, será realizada uma análise teórica do impacto que a TP2 causa na SER e na  $P_{out}$ , além de comparar as técnicas propostas com outras técnicas de redução da PAPR, como PTS e SLM.

## REFERÊNCIAS

- [1] K. J. R. Liu, A. K. Sadek, W. Su e A. Kwasinski, *Cooperative Communications and Networking*. Nova York: Cambridge University Press, 1.ed., 2009.
- [2] S. Kaddoor e R. Adve, *Relay Selection and Power Allocation in Cooperative Cellular Networks*. IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 9, No. 5, pp. 1676–1685, May 2010.
- [3] Y. Khattabi e M. M. Matalgah, *Conventional and Best-Relay-Selection Cooperative Protocols Under Nodes-Mobility and Imperfect-CSI Impacts: BER Performance*. In: 2015 IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp. 105–110, Mar. 2015.
- [4] S. Abdulhadi, M. Jaseemuddin e A. Anpalagan, *A Survey of Distributed Relay Selection Schemes in Cooperative Wireless Ad hoc Networks*. An International Journal Wireless Personal Communications, Vol. 63, No. 4, pp. 917–935, Apr. 2012.
- [5] F. A. Onat, Y. Fan, H. Yanikomeroglu e H. V. Poor, *Threshold Based Relay Selection in Cooperative Wireless Networks*. IEEE GLOBECOM 2008 proceedings, pp. 1–5, 2008.
- [6] I. Krikidis, H. A. Suraweera, P. T. Smith e C. Yuen, *Full-Duplex Relay Selection for Amplify-and-Forward Cooperative Networks*. IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 11, No. 12, pp. 4381–4393, Dec. 2012.
- [7] N. Nomikos, T. Charalambous, I. Krikidis, D. N. Skoutas, D. Vouyioukas, M. Johansson e C. Skianis, *A Survey on Buffer-Aided Relay Selection*. IEEE Communications Surveys & Tutorials, Vol. 18, No. 2, pp. 1073–1097, 2016.
- [8] D. Dardari, V. Tralli e A. Vaccari, *A theoretical characterization of nonlinear distortion effects in OFDM systems*. IEEE Transactions on Communications, Vol. 48, No. 10, pp. 1755–1764, Oct. 2000.
- [9] C. A. R. Fernandes, D. B. da Costa e A. L. F. de Almeida, *Performance analysis of cooperative amplify-and-forward orthogonal frequency division multiplexing systems with power amplifier non-linearity*. IET Communications, Vol. 8, No. 18, pp. 3223–3233, 2014.
- [10] C. Liu, E. Skafidas, T. Walsh e R. J. Evans, *A Survey on OFDM PAPR Reduction Techniques for 60 GHz Wireless CMOS Radio*. In: 2007 Australasian Telecommunication Networks and Applications Conference, Christchurch, New Zealand, pp. 317–321, Dec. 2007.
- [11] G. P., Aquino e L. L. Mendes, *Comparação entre Técnicas de Redução da PAPR em Sinais OFDM*. In: XXIX Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Curitiba, Out. 2011.
- [12] N. B. Harum, K. Yuda e T. Ohtsuki, *PAPR Reduction of Amplify-and-Forward Relay OFDM System Using Subcarrier Pairing Method*. In: IEEE 24th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications: Mobile and Wireless Networks, London, pp. 2005–2010, Sept. 2013.
- [13] T. Xu, J. Ge e H. Ding, *An Efficient Distributed Link Selection Scheme for AF-Based Cognitive Selection Relaying Networks*. IEEE Communications Letters, Vol. 18, No. 2, pp. 253–256, Feb. 2014.
- [14] K. Hosseini e R. Adve, *Relay Selection and Max-Min Resource Allocation for Multi-Source OFDM-Based Mesh Networks*. IEEE ICC 2010 proceedings, pp. 1–6, May 2010.