

# Seleção de *Relay* com Amplificadores de Potência não Lineares em Sistemas OFDM Cooperativos

Syllas Rangel C. Magalhães e C. Alexandre Rolim Fernandes

**Resumo**— Este artigo apresenta duas novas técnicas de seleção de *relays* em sistemas de comunicação cooperativos OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) com amplificadores de potência (PAs, *Power Amplifiers*) não lineares, considerando *relays* do tipo amplifica e encaminha (AF, *Amplify-and-Forward*). O primeiro método proposto leva em conta a capacidade de canal e a quantidade de subportadoras ativas por *relay*. Já a segunda técnica proposta leva em conta, além da capacidade, um parâmetro relacionado à quantidade de distorção não linear inserida pelo PA. Resultados de simulações numéricas são apresentados para avaliar o desempenho das técnicas propostas.

**Palavras-Chave**— seleção de *relays*, comunicação cooperativa, OFDM, PA não linear, capacidade.

**Abstract**— This paper presents two new relay selection techniques for cooperative OFDM communication systems with nonlinear PAs and considering AF protocol. The proposed techniques are based on a classical per-subcarrier relay selection technique that maximizes the channel capacity. The first proposed method considers not only the channel capacity, but also the number of active subcarrier per relay. The second proposed technique takes into account, besides the channel capacity, a parameter related to the amount of nonlinear distortion introduced by the PA. Numerical simulation results are presented to validate the performance of the proposed techniques.

**Keywords**— relay selection, cooperative communication, OFDM, nonlinear PA, capacity.

## I. INTRODUÇÃO

Muitos sistemas de comunicação sem fio modernos têm utilizado OFDM como técnica de transmissão multiportadora. Tal uso se deve, principalmente, à eficiência espectral, baixa complexidade de implementação e ao combate à seletividade em frequência promovidos pela técnica [1]. No entanto, a OFDM tem como uma de suas principais desvantagens a introdução de picos de potência no sinal transmitido. Essa característica indesejada pode fazer com que a amplitude do sinal transmitido atinja o limiar de saturação dos amplificadores de potência, causando distorções no sinal e, conseqüentemente, prejudicando sua detecção [2].

Na literatura existem várias técnicas de redução de PAPR (do inglês, *Peak-to-Average Power Ratio*), definida como a razão entre a potência de pico e a potência média do sinal. Grande parte das técnicas existentes são baseadas em modificações no sinal. Em [2], [3] são apresentadas diversas técnicas de redução de PAPR.

Por outro lado, a diversidade cooperativa emergiu como uma tecnologia promissora para sistemas de comunicação sem fio devido à sua capacidade de explorar a diversidade espacial

sem a necessidade de múltiplas antenas [1]. Os sistemas cooperativos são capazes de emular um conjunto de antenas de forma distribuída, permitindo que um ou mais nós parceiros (*relays*) retransmitam a informação da fonte para o destino. Em uma rede sem fio podem haver dezenas ou mesmo centenas de *relays*, sendo, portanto, imprescindível a adoção de uma boa técnica de seleção de *relay* para o êxito na implementação de uma rede cooperativa eficiente [4].

Diversos trabalhos tem considerado a seleção de *relay* em sistemas cooperativos [4]-[10]. Em [5] e [6] é feita uma revisão bibliográfica das técnicas de seleção de *relay* nesses sistemas. Em [6] são discutidas as classificações das técnicas de seleção, apresentando características e funcionalidades de cada esquema. Técnicas de seleção de *relays* do tipo AF são tratadas em [4], em que algumas vantagens desses sistemas são apresentadas e comprovadas através de resultados numéricos. A seleção de *relay* em sistemas cooperativos OFDM também é amplamente tratada na literatura. Em [7] duas novas estratégias de seleção de *relay* são propostas, em que múltiplos *relays* do tipo AF são considerados em um sistema cooperativo OFDM. A primeira estratégia proposta por [7], chamada de RSM-1, é baseada na seleção por subportadora, que considera o “melhor” *relay*, baseado na PEP (do inglês, *Pairwise Error Probability*), para cada subportadora. Já a segunda técnica (RSM-2) foi baseada na seleção de apenas um *relay*. Foi mostrado que o método baseado na seleção por subportadora tem uma performance melhor que RMS-2. [8] e [9] também analisam a seleção de *relay* por subportadora em sistemas OFDM cooperativos. Em [9] é mostrado que a performance de *outage* ótima é atingida quando o método de seleção por subportadoras é utilizada.

Apesar de haver uma literatura extensa na área de seleção de *relay* em sistemas OFDM, estas técnicas não levam em conta o problema das distorções não lineares presente em sistema OFDM. Ou seja, apesar de muitos trabalhos tratarem da seleção de *relay*, estes, em geral, não consideram a influência dos picos de potência. Em [10] são propostos dois esquemas de seleção de *relays* que levam em consideração a PAPR, porém ambos os esquemas são baseadas na seleção de todas as subportadoras de um *relay*, diferentemente do que é considerado no presente trabalho.

Este trabalho propõe duas técnicas de seleção de *relays*, baseadas na seleção por subportadora, que objetivam, não somente a maximização da capacidade, mas também a redução das distorções não lineares inseridas por PAs. A primeira técnica proposta busca a redução do número máximo de subportadoras ativas por um único *relay*, o que, de acordo com [2], garantirá uma redução nas potências de pico. Já a segunda técnica é baseada no resultado de [11], em que foi mostrado

Syllas Rangel C. Magalhães e C. Alexandre Rolim Fernandes, Departamento de Engenharia da Computação, Universidade Federal do Ceará, Sobral-CE, Brasil, E-mails: syllasrangel@alu.ufc.br, alexandrefernandes@ufc.br. C. Alexandre Rolim Fernandes é parcialmente financiado pelo CNPq.

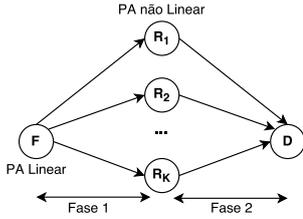


Fig. 1. Modelo de sistema cooperativo OFDM-AF com múltiplos relays

que o desempenho de um sistema OFDM cooperativo AF só é afetado de forma significativa por um PA não linear quando a taxa de transmissão for maior que um certo parâmetro que depende do modelo de PA utilizado. Este parâmetro desempenha um papel semelhante à capacidade de um canal, razão pela qual ele foi denominado em [11] de “Capacidade do PA”. Na técnica aqui proposta o objetivo é reduzir a quantidade de subportadoras em cada relay apenas para que a capacidade do canal associada a cada relay esteja abaixo da “capacidade do PA”. Ou seja, tenta-se distribuir as subportadoras entre os relays de forma que as não linearidades introduzidas pelos PAs possam ser desprezadas.

O restante do trabalho está organizado como segue. Seção II apresenta detalhes do modelo de sistema considerado. A Seção III introduz e detalha as técnicas de seleção de relays propostas. Na Seção IV são mostrados os resultados das simulações. E por fim, a Seção V traz as principais conclusões do trabalho.

## II. MODELO DE SISTEMA

A Figura 1 mostra um modelo simplificado do cenário utilizado neste trabalho. Considera-se um modelo de sistema de comunicação OFDM cooperativo AF composto por uma fonte (F),  $K$  relays em paralelo e um destino (D). Na primeira fase de transmissão o nó fonte envia a informação para os  $K$  relays, que por sua vez, na fase 2, retransmitem a informação para o nó destino. Ainda durante a primeira fase de transmissão é realizada uma seleção dos relays por subportadora.

Todo o processamento é concentrado na fonte, que possui conhecimento de todos os parâmetros dos enlaces. Assume-se que todos os nós são equipados com uma única antena operando em modo *half-duplex* e que os canais são independentes, com desvanecimento do tipo *Rayleigh* seletivo em frequência. Além disso, toda informação transmitida é modulada utilizando símbolos M-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) e todas as  $N$  subportadoras do nó fonte possuem a mesma potência de transmissão  $P_s$ .

Assume-se uma transmissão *downlink*, em que a fonte é uma estação base com PA de maior qualidade e os relays são unidades móveis, com menos recursos de hardware e de processamento. Faz-se então a consideração de que a fonte possui PA linear e que os  $K$  relays possuem PA não linear.

Assim, o sinal recebido, no domínio da frequência, pela  $n$ -ésima subportadora do  $k$ -ésimo relay pode ser expresso por:

$$Y_{n,k}^{(SR)} = H_{n,k}^{(SR)} \sqrt{P_s} X_n + N_{n,k}^{(SR)}, \quad (1)$$

em que  $H_{n,k}^{(SR)}$  e  $N_{n,k}^{(SR)}$  são, respectivamente, a resposta em frequência e o ruído aditivo gaussiano branco (*Additive White Gaussian Noise* - AWGN) do canal fonte-relay,  $X_n$  é o sinal de informação transmitido, assumido independente e

identicamente distribuído (i.i.d.), com distribuição uniforme. Em todas as variáveis acima, assume-se que  $n \in \mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$ , sendo  $\mathcal{N}$  o conjunto de todas as subportadoras e que  $k \in \mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ , sendo  $\mathcal{K}$  o conjunto de todos os relays.

Nos relays, considera-se que todas as subportadoras transmitem com a mesma potência  $P_r$ . Pode-se expressar o sinal transmitido pela  $n$ -ésima subportadora do  $k$ -ésimo relay como:  $q_{n,k}^{(R)} = g_{n,k} Y_{n,k}^{(SR)}$ , em que  $g_{n,k}$  é o ganho do relay e  $n \in \mathcal{N}_k$ , assumindo  $\mathcal{N}_k$  como o conjunto de todas as subportadoras selecionadas para o relay  $k$ , com  $\mathcal{N}_1 \cup \mathcal{N}_2 \cup \dots \cup \mathcal{N}_K = \mathcal{N}$  e  $\mathcal{N}_1 \cap \mathcal{N}_2 \cap \dots \cap \mathcal{N}_K = \emptyset$ . Para todo  $n$  do  $k$ -ésimo relay, tal que  $n \notin \mathcal{N}_k$ , temos  $g_{n,k} = 0$ . Ou seja, apenas um dos relays irá transmitir na  $n$ -ésima subportadora, de modo que os dados de todas subportadoras cheguem ao destino. As subportadoras são selecionadas de acordo com os critérios de seleção empregados por um dos métodos descritos na Seção III.

Após o cálculo da transformada discreta de Fourier inversa (*Inverse Discrete Fourier Transform* - IDFT) e a inserção do prefixo cíclico, o sinal  $q_{n,k}^{(R)}$  foi amplificado por um PA, modelado como uma função sem memória  $F(\cdot)$ . Dessa forma, o sinal amplificado pode ser expresso como [1]:  $\tilde{u}_{n',k}^{(R)} = F(\tilde{q}_{n',k}^{(R)})$ , para  $1 \leq n' \leq N + M_{cp}$ , em que  $M_{cp}$  é o tamanho do prefixo cíclico e  $\tilde{q}_{n',k}^{(R)}$  e  $\tilde{u}_{n',k}^{(R)}$  são, respectivamente, o sinal na entrada e na saída do amplificador de potência no domínio do tempo.

O sinal no domínio da frequência recebido no destino, na segunda fase da transmissão, pela  $n$ -ésima subportadora do  $k$ -ésimo relay é dado por:

$$Y_{n,k}^{(RD)} = H_{n,k}^{(RD)} u_{n,k}^{(R)} + N_{n,k}^{(RD)}, \quad (2)$$

em que  $H_{n,k}^{(RD)}$ ,  $u_{n,k}^{(R)}$  e  $N_{n,k}^{(RD)}$  são, respectivamente, a resposta em frequência, o sinal transmitido no domínio da frequência e o ruído aditivo do canal relay-destino.

## III. TÉCNICAS DE SELEÇÃO DE RELAYS

Nesta seção, inicialmente é apresentada uma técnica de seleção de relays clássica, baseada na capacidade por portadora. Em seguida são apresentadas duas novas técnicas que, além da capacidade dos canais sem fio, levam em consideração as distorções introduzidas pelos PAs dos relays. As duas técnicas propostas são baseadas na premissa de que quanto menor o número de subportadoras ativas em um relay menor será a potência do sinal transmitido e, conseqüentemente, menor será a distorção causada pelos PAs [2].

Todas as técnicas estudadas a seguir pressupõem a existência de um nó central com conhecimento perfeito de todos os canais envolvidos e que realiza as operações necessárias à escolha das subportadoras que serão utilizadas por cada relay na transmissão. O nó central será responsável por repassar a informação relacionada à escolha das subportadoras para todos os relays envolvidos na transmissão através de canais de controle.

### A. Seleção por Subportadora Baseada em Capacidade

Neste método clássico de seleção é escolhido o melhor relay, com objetivo da maximização da capacidade ou, equi-

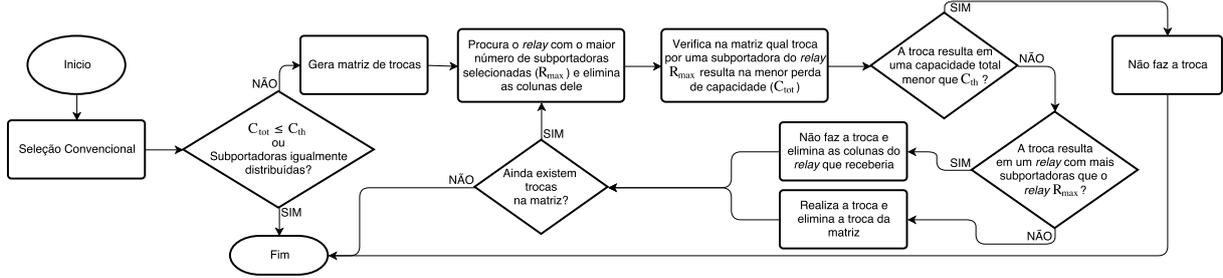


Fig. 2. Diagrama de blocos da Técnica Proposta 1

valentemente, da razão sinal-ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*) para cada subportadora [9]. Utilizando esta técnica, em geral, múltiplos *relays* são selecionados (no máximo  $N$ ), já que as subportadoras transmitidas devem ser selecionadas de forma que a performance de *outage* ótima seja atingida [9], com probabilidade de *outage* definida como:  $\text{Prob}[C_{tot} < C_{th}]$ , em que  $C_{tot}$  é a capacidade total do sistema e  $C_{th}$  é uma capacidade limiar. Para a  $n$ -ésima subportadora, o critério de seleção é dado por:

$$R_{sel}(n) = \arg \max_{k \in \mathcal{K}} (\text{SNR}_{n,k}), \quad (3)$$

em que  $R_{sel}(n)$  indica o *relay* selecionado para transmitir a  $n$ -ésima subportadora e  $\text{SNR}_{n,k}$  é a SNR instantânea do enlace fonte-*relay*-destino na subportadora  $n$  do  $k$ -ésimo *relay* que, para o protocolo AF de ganho variável, é dada por [12]:

$$\text{SNR}_{n,k} = \frac{\text{SNR}_{n,k}^{(SR)} \text{SNR}_{n,k}^{(RD)}}{\text{SNR}_{n,k}^{(SR)} + \text{SNR}_{n,k}^{(RD)} + 1}, \quad (4)$$

em que  $\text{SNR}_{n,k}^{(SR)}$  e  $\text{SNR}_{n,k}^{(RD)}$  são, respectivamente, as SNRs instantâneas nos links fonte-*relay* e *relay*-destino. Uma vantagem desta técnica é a baixa complexidade computacional que, no pior caso será  $\mathcal{O}(NK)$ . Ao longo do trabalho este método será referido como “Técnica Convencional”.

### B. Técnica Proposta 1

A primeira técnica proposta (Técnica Proposta 1 - TP1) tem como objetivo principal a minimização da quantidade de subportadoras transmitidas pelo *relay* que possui o maior número de subportadoras ativas. Isto se deve ao fato de as distorções não lineares introduzidas pelos PAs serem maiores quando a potência é elevada [2]. Quando a potência é pequena, as distorções não lineares se tornam desprezíveis. Assim, sendo  $L_{max}$  a quantidade de subportadoras selecionadas no *relay* com a maior quantidade de subportadoras ativas, o objetivo da TP1 é minimizar  $L_{max}$ , sem alterar a probabilidade de *outage* do sistema. Dessa forma, o problema consiste em:

$$\min(L_{max}), \quad (5)$$

sujeito a  $C_{tot} \geq C_{th}$ , em que  $C_{th}$  é a capacidade limiar do sistema e  $C_{tot}$  é a capacidade total, dada por [10]:

$$C_{tot} = \frac{B}{2N} \sum_{n=1}^N \log_2(1 + \text{SNR}_{n,\hat{k}}) \quad (6)$$

em que  $\hat{k}$  representa o *relay* selecionado para transmitir a  $n$ -ésima subportadora,  $B$  é a largura de banda total do sistema e  $\text{SNR}_{n,\hat{k}}$  é dada por (4). O termo  $1/2$  em (6) é introduzido devido ao compartilhamento do canal em 2 intervalos de tempo. Dessa forma, se  $L_{max}$  é minimizado, as subportadoras estarão distribuídas entre os *relays* de forma mais uniforme,

entretanto, sem aumentar a probabilidade de interrupção. Assim, é mais provável que nenhum *relay* possua uma potência de transmissão grande o suficiente para que as distorções não lineares se tornem relevantes.

A TP1 é uma heurística que visa resolver o problema posto em (5). O funcionamento da TP1 é ilustrado na Figura 2. A primeira etapa desta solução é a Técnica Convencional (TC), em que os *relays* são selecionados de modo a obter a maior capacidade global  $C_{tot}$  (desconsiderando a influência do amplificador de potência). Caso a restrição de capacidade não seja atendida ou todas as subportadoras estejam igualmente distribuídas entre os *relays* ( $L_{max} = N/K$ ) o algoritmo proposto não fará mais nada, ou seja, ele alocará as portadoras de acordo com a TC, buscando o arranjo que maximize  $C_{tot}$ . Caso contrário, uma matriz de trocas será gerada. A matriz de trocas  $M_{n,i,j}$  conterá a perda de capacidade para a troca da  $n$ -ésima subportadora do  $i$ -ésimo *relay* para o  $j$ -ésimo *relay*, assim, matematicamente temos:

$$M_{n,i,j} = C_{n,j}^{(SRD)} - C_{n,i}^{(SRD)} \quad (7)$$

em que  $C_{n,i}^{(SRD)}$  e  $C_{n,j}^{(SRD)}$  são, respectivamente, a capacidade total instantânea da  $n$ -ésima subportadora quando o *relay*  $i$  é selecionado e quando o *relay*  $j$  é selecionado, com  $i, j \in \mathcal{K}$ .

Uma estratégia adotada para diminuir o tempo de processamento do algoritmo foi eliminar da matriz  $M_{n,i,j}$  todas as possibilidades de troca para o *relay*  $R_{max}$  (*relay* com  $L_{max}$  subportadoras selecionadas). Como o objetivo da técnica é minimizar  $L_{max}$ , nenhuma subportadora adicional deve ser alocada para o *relay*  $R_{max}$ . Assim, após a geração da matriz, o algoritmo trocará iterativamente as subportadoras selecionadas do *relay* com maior número de subportadoras ativas, de acordo com os critérios:

$$\hat{j} = \arg \min_j (M_{n,R_{max},j}), \quad (8)$$

$$\hat{n} = \arg \min_n (M_{n,R_{max},\hat{j}}), \quad (9)$$

em que  $\hat{j}$  é o *relay* que passará a transmitir na subportadora  $\hat{n}$ , com  $\hat{n} \in \mathcal{N}_{R_{max}}$ , em que  $\mathcal{N}_{R_{max}}$  é o conjunto de todas as subportadoras selecionadas para o *relay*  $R_{max}$  e  $j \in \mathcal{K}'$ , em que  $\mathcal{K}'$  é o conjunto de todos os *relays* aptos a receber as subportadoras de  $R_{max}$  (*relays* que não foram eliminados da matriz de trocas). A cada iteração, antes de realizar a troca, é verificado se a mudança na capacidade do sistema quebra a condição  $C_{tot} > C_{th}$ . Caso a capacidade total do sistema, após a troca, passe a ser menor que a capacidade limiar, a mudança não é feita e o algoritmo termina. Caso contrário, um novo teste é realizado e dois novos caminhos podem ser tomados. Caso a troca resulte em um *relay* com mais subportadoras ativas que o *relay*  $R_{max}$ , a mudança não é feita e todas as

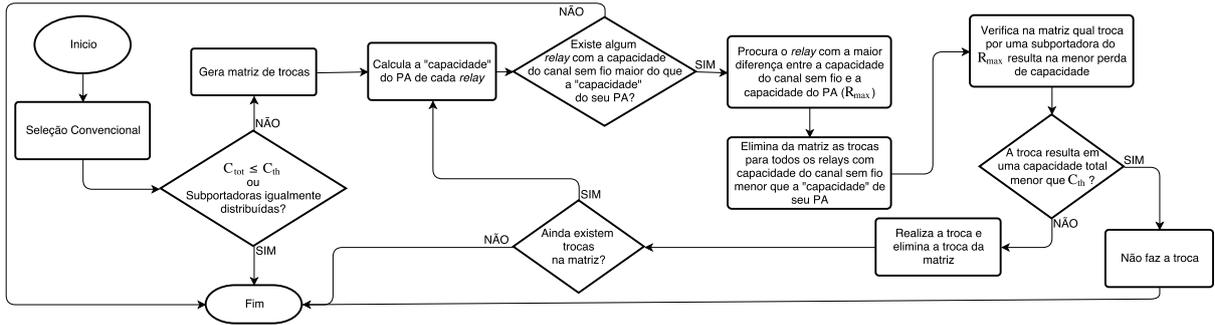


Fig. 3. Diagrama de blocos da Técnica Proposta 2

possibilidades de troca para o *relay* escolhido são eliminadas. Caso contrário, a alteração é feita e o elemento  $M_{\hat{n}, R_{max}, \hat{j}}$  é eliminado da matriz de trocas. Após essa etapa, caso ainda existam trocas a serem feitas, o *relay*  $R_{max}$  é recalculado e o algoritmo entra em loop até que alguma das condições de parada sejam satisfeitas.

Devido às constantes buscas na matriz de trocas, esta técnica apresenta complexidade computacional no pior caso  $\mathcal{O}(N^2K^2)$ , maior que na Técnica Convencional. Entretanto, como será visto mais à frente, seu uso se justifica em cenários com a presença de PAs não lineares devido a diminuição da distorção não linear, inserida pelo PA, que a técnica promove. Esta diminuição vem do fato de as subportadoras estarem distribuídas entre os *relays* de forma mais uniforme, sem afetar a probabilidade de interrupção.

### C. Técnica Proposta 2

Inspirado nos resultados obtidos em [11], esta subseção propõe uma segunda heurística para seleção de *relays* por subportadora, chamada de Técnica Proposta 2 (TP2). Essa técnica usa uma medida direta da quantidade de distorção não linear introduzida pelo PA. Em [11] foi demonstrado que a distorção não linear provinda do PA só afeta o desempenho de um sistema OFDM cooperativo AF de forma significativa quando  $C_{th}$  está acima de um certo parâmetro que depende do modelo de PA. Este parâmetro desempenha um papel semelhante à capacidade de um canal, razão pela qual ele foi denominado em [11] de “Capacidade do PA”, e é definido da seguinte forma:

$$C_k^{(PA)} = \frac{B}{2N} \sum_{n=1}^N \log_2(1 + |\alpha_k|^2 P_k^{(PA)} / P_k^{(D)}) \quad (10)$$

em que  $\alpha_k$  e  $P_k^{(D)}$  são, respectivamente, a constante complexa e a potência da distorção não linear introduzida pelo PA em cada *relay*.  $P_k^{(PA)}$  é a potência total na entrada do PA no *relay*  $k$ , com  $k \in \mathcal{K}$ . Para certos modelos de PA, existem expressões analíticas para  $\alpha_k$  e  $P_k^{(D)}$  [13]. Quanto maior  $P_k^{(PA)}$ , maior será  $P_k^{(D)}$ . Assim, de acordo com [11], se  $C_k^{(PA)}$  é menor que  $C_{th}$ , então o sistema OFDM será afetado de forma significativa pelo PA.

Baseado neste resultado, a TP2 tenta minimizar a quantidade de *relays* cuja capacidade do PA é menor do que a capacidade dos canais sem fio, visto que, para estes *relays*, o sistema será limitado pelas distorções do PA [11]. Além disto, a TP2 possui a restrição de não alterar a probabilidade de interrupção. Ou seja, o objetivo da TP2 é reduzir a quantidade de subportadoras ativas em cada *relay* apenas o suficiente

para que a influência do PA seja desprezível, sem alterar a probabilidade de interrupção.

Dessa forma, definindo como  $Q$  a quantidade de *relays* que possuem a capacidade do PA menor que a capacidade do canal sem fio, o problema a ser resolvido por esta técnica consiste em:

$$\min(Q) \quad (11)$$

sujeito a  $C_{tot} \geq C_{th}$ , com a menor perda de capacidade possível e com o menor número de subportadoras ativas em cada *relay*.

A Figura 3 mostra o diagrama de blocos da TP2. Assim como na TP1 o primeiro passo desta solução é a TC, seguida pelo teste inicial ( $C_{tot} < C_{th}$  ou subportadoras igualmente distribuídas?). Caso a resposta ao teste inicial seja sim, o algoritmo não prossegue, caso contrário a matriz de trocas é gerada de acordo com (7).

Após o cálculo da “capacidade” dos PAs de cada *relay*, é calculada a capacidade total do canal sem fio para todos os *relays*. Caso nenhum *relay* possua capacidade total maior que a “capacidade” do seu PA o algoritmo para. Caso contrário, é denominado  $R_{max}$  o *relay* com a maior diferença entre sua capacidade total e a “capacidade” do seu PA. As trocas possíveis para os *relays* que possuem a capacidade maior que a de seus respectivos PAs são eliminadas da matriz de trocas. Em seguida, é verificado qual troca oferece a menor perda de capacidade. Caso não resulte em  $C_{tot} < C_{th}$ , a troca é feita e o algoritmo entra em loop, como mostra o diagrama de blocos. Caso contrário, o algoritmo termina.

Essa técnica, assim como a TP1, apresenta complexidade computacional no pior caso  $\mathcal{O}(N^2K^2)$ , já que ela também é baseada em uma matriz de trocas, que deve ser constantemente consultada durante as iterações. Entretanto, dado que  $C_{tot} \gg C_{th}$  e que os *relays* não estão distribuídos igualmente, a TP1 terá complexidade computacional no melhor caso igual a  $\Omega(N^2K^2)$ , porém, nessa situação, a TP2 apresenta complexidade computacional no melhor caso  $\Omega(NK^2)$ . Essa técnica tem a vantagem de se adaptar com facilidade a diferentes cenários, já que ela é baseada em uma medida direta da quantidade de distorção não linear inserida pelo PA. Assim a TP2 tende a dar resultados próximos do caso em que um PA linear é utilizado e a Técnica Convencional é aplicada.

## IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção, resultados de simulações computacionais de Monte Carlo são apresentados com o intuito de avaliar o desempenho das técnicas propostas. Quando não indicado em contrário de forma explícita, considera-se que o sistema é

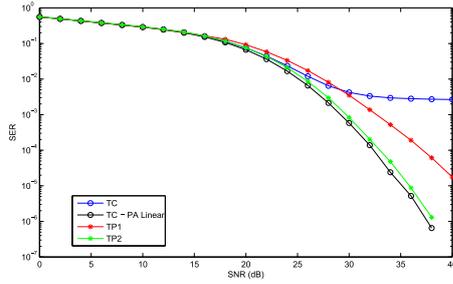


Fig. 4. Comparação entre as SERs da Técnica Convencional, Técnica Proposta 1 e Técnica Proposta 2 com o caso linear.

simulado com canais seletivos em frequência sob desvanecimento do tipo Rayleigh de resposta ao impulso tamanho 4, prefixo cíclico de tamanho 3, modulação 16-QAM,  $N = 1024$  subportadoras,  $K = 4$  relays do tipo AF, posicionados entre a fonte e o destino, com posição em relação a fonte iguais a 0,05, 0,3, 0,5 e 0,95, respectivamente, considerando a distância fonte-destino igual a 1,  $P_s = P_r = 0,5$  W e  $C_{th} = 4$ . Além disso, considera-se que o PA nos relays são representados pelo modelo *soft-clipping* [1] e que todos possuem a mesma amplitude de saturação  $A_{sat} = 1,3$  V. Foi analisado o comportamento da taxa de erro de símbolo (SER, do inglês *Symbol Error Rate*) do sistema.

A Figura 4 mostra a SER em função da SNR para todas as técnicas consideradas neste trabalho. Claramente, para o caso em que o amplificador de potência não linear é adotado, a técnica que forneceu melhores SERs foi a TP2. Isto se deve ao fato de a TP2 objetivar reduzir o número de subportadoras ativas em cada relay apenas o suficiente para que os efeitos da não linearidade do PA sejam desprezíveis, provocando dessa forma uma menor perda na capacidade total do sistema. Como pode ser observado, a TP2 obteve resultados muito próximos do caso em que um PA linear é utilizado. Apesar de a TP1 tender a equilibrar as potências entre todos os relays, uma queda na capacidade total do sistema é experimentada, ocasionando, dessa forma, um aumento na SER. Entretanto, se comparada ao caso em que a TC é utilizada com PA não linear, a TP1 consegue ganhos na SER para altas SNRs.

A Figura 5 mostra o comportamento da SER nos métodos propostos para um menor valor de amplitude de saturação dos PAs ( $A_{sat} = 1$  V). Como pode ser observado, a TP2 continua fornecendo as melhores SERs, entretanto, como neste caso a quantidade de distorção não linear gerada pelo PA será maior, a TP2 tende a se distanciar do caso em que o PA linear é utilizado com a Técnica Convencional. Já a TP1 tende a fornecer SERs próximas as da TP2. Novamente, em ambas as técnicas melhorias significativas são fornecidas em comparação com a Técnica Convencional.

Vale mencionar que em todas as técnicas aqui discutidas a probabilidade de *outage* não é afetada, já que as duas técnicas propostas não permitem que se diminua a capacidade do sistema para um valor abaixo de  $C_{th}$ .

## V. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram propostas duas novas técnicas de seleção de relay em sistemas OFDM cooperativos. As técnicas aqui propostas objetivam reduzir os efeitos dos PAs não lineares sem alterar a probabilidade de *outage* do sistema.

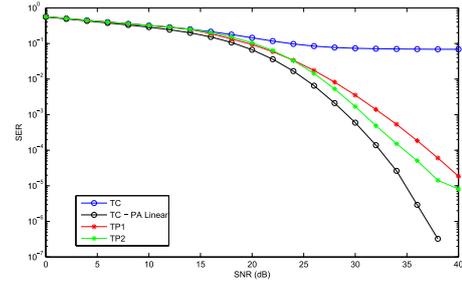


Fig. 5. Comparação entre as SERs da Técnica Convencional, Técnica Proposta 1 e Técnica Proposta 2 com o caso linear para  $A_{sat} = 1$ .

Em ambas as técnicas foram obtidas melhorias significativas na SER, em comparação com a TC. Particularmente, a TP2 se mostrou a mais eficiente, já que com esta técnica foi possível se obter SERs muito próximas do caso linear, sem mudança na probabilidade de *outage*. Além disso, a TP2 oferece complexidade computacional menor ou igual a TP1.

Em trabalhos futuros, pretende-se realizar uma análise teórica do impacto da TP2 na SER e comparar os métodos aqui propostos com técnicas convencionais de redução de PAPR. Além disso, pretende-se adaptar as ideias das técnicas propostas para outros métodos de seleção de relay.

## REFERÊNCIAS

- [1] C. Alexandre R. Fernandes, "Outage performance of cooperative amplify-and-forward OFDM systems with nonlinear power amplifiers," *2012 IEEE 13th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, Cesme, 2012, pp. 459-463.
- [2] Y. Rahmatallah and S. Mohan, "Peak-To-Average Power Ratio Reduction in OFDM Systems: A Survey And Taxonomy," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 15, no. 4, pp. 1567-1592, Fourth Quarter 2013.
- [3] M. I. Abdullah, M. Z. Mahmud, M. S. Hossain, and M. N. Islam, *Comparative study of PAPR Reduction techniques in OFDM*, vol. 1, ARPN Journal of systems and software, November 2011.
- [4] M. Torabi, D. Haccoun and J. F. Frigon, "Relay Selection in AF Cooperative Systems: An Overview," in *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 7, no. 4, pp. 104-113, Dec. 2012.
- [5] S. Sudheer, J. D. Lal, and S. V. Charhate, "A Review on Relay Selection Techniques in Cooperative Communication," in *International Journal of Digital Application & Contemporary Research*, vol. 4, Apr. 2016.
- [6] S. Abdulhadi, M. Jaseemuddin e A. Anpalagan, "A Survey of Distributed Relay Selection Schemes in Cooperative Wireless Ad hoc Networks," in *International Journal Wireless Personal Communications*, vol. 63, no. 4, pp. 917-935, Apr. 2012.
- [7] Y. Ding and M. Uysal, "Amplify-and-forward cooperative OFDM with multiple-relays: performance analysis and relay selection methods," in *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8, no. 10, pp. 4963-4968, October 2009.
- [8] Y. Li, W. Wang and F. C. Zheng, "Combined bulk and per-tone relay selection in cooperative OFDM systems," *2012 1st IEEE International Conference on Communications in China (ICCC)*, Beijing, 2012, pp. 487-491.
- [9] S. Dang, J. P. Coon and G. Chen, "An Equivalence Principle for OFDM-Based Combined Bulk/Per-Subcarrier Relay Selection Over Equally Spatially Correlated Channels," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 1, pp. 122-133, Jan. 2017.
- [10] F. R. A. Parente e C. A. R. Fernandes, "Seleção de Relay e Redução de PAPR em Sistemas Cooperativos OFDM", XXXIV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrt'16, Santarém, PA, 2016.
- [11] S. L. Silva and C. A. R. Fernandes, "Outage analysis of AF OFDM relaying systems with power amplifier nonlinearity," *2014 International Telecommunications Symposium (ITS)*, Sao Paulo, 2014, pp. 1-5.
- [12] K. J. R. Liu, A. K. Sadek, W. Su e A. Kwasinski, *Cooperative Communications and Networking*. Nova York: Cambridge University Press, 1.ed., 2009.
- [13] D. Dardari, V. Tralli, and A. Vaccari, "A theoretical characterization of nonlinear distortion effects in OFDM systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, no. 10, pp. 1755-1764, Oct. 2000.