

# Impacto da Interferência da Rede Primária em Redes Cooperativas e Cognitivas Multiusuário do Tipo *Underlay*

L. F. Vasconcelos Peres, M. Komono Tojeiro, D. P. Moya Osorio e E. E. Benitez Olivo

**Resumo**— Este artigo investiga o efeito da interferência da rede primária sobre o desempenho de uma rede cooperativa-cognitiva, baseada no protocolo amplifica-e-encaminha. Visando explorar a diversidade multiusuário na rede secundária, quatro critérios diferentes de seleção do nó destino são considerados. Assume-se que a potência transmitida dos nós secundários é restringida pela temperatura de interferência e pela potência máxima disponível em cada nó e que uma combinação por razão máxima dos sinais provenientes da fonte e do *relay* é realizada no destino. O desempenho do sistema é avaliado em termos da probabilidade de *outage*, através de simulações exaustivas de Monte Carlo.

**Palavras-Chave**— Compartilhamento espectral, diversidade cooperativa, diversidade multiusuário, interferência, redes cooperativas e cognitivas.

**Abstract**— This paper investigates the impact of the primary network interference on the performance of a cognitive amplify-and-forward relaying network. With the aim of exploiting the multiuser diversity at the secondary network, four different criteria for selecting a destination node are considered. We assume that the transmit power of the secondary nodes is constrained by the interference temperature and the maximum power available at each node and that a maximal-ratio combining of the signals coming from the source and relay is performed at the destination. The system performance is assessed in terms of the outage probability, via exhaustive Monte Carlo simulations.

**Keywords**— Spectrum sharing, cooperative diversity, interference, multiuser diversity, cognitive relaying networks.

## I. INTRODUÇÃO

As redes sem fio atuais têm experimentado uma expansão acelerada devido ao número crescente de usuários conectados, os quais demandam, cada vez mais, capacidades multimídia avançadas. Nesse cenário, o desenvolvimento de novas tecnologias é de crucial importância para o advento da próxima geração de sistemas de comunicação móvel (5G), que prevê uma proliferação massiva do número de dispositivos conectados, requerendo assim um aumento significativo na capacidade do sistema [1].

L. F. Vasconcelos Peres, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, Escola de Engenharia de São Carlos (EESC), Universidade de São Paulo (USP), São Carlos-SP, Brasil. E-mail: luisfvperes@usp.br

M. Komono Tojeiro e D. P. Moya Osorio, Departamento de Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia, Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), São Carlos-SP, Brasil. E-mail: mateuskomono@gmail.com, dianamoya@ufscar.br.

E. E. Benitez Olivo, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Câmpus Experimental de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista-SP, Brasil. E-mail: edgar.olivo@sjbv.unesp.br.

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, 123743/2016-8).

Por outro lado, a escassez de espectro tornou-se um dos problemas mais críticos a serem superados para fazer das redes 5G uma realidade. Nesse contexto, as técnicas de rádio cognitivo têm se destacado como uma alternativa eficiente para o uso dos recursos de rádio, permitindo que terminais tenham conhecimento do entorno radioelétrico e adaptem suas configurações de acordo com suas necessidades, para estabelecer comunicações mais confiáveis [2], [3]. Em redes de rádio cognitivo, o conceito de compartilhamento espectral do tipo *underlay* tem se mostrado promissor para aliviar o problema da escassez de espectro, permitindo que usuários não-licenciados, chamados de usuários secundários, obtenham acesso a uma banda licenciada, alocada a usuários primários, desde que um determinado nível de interferência sobre a rede primária, chamado de temperatura de interferência, seja respeitado [4], [5].

Por outro lado, as comunicações cooperativas baseadas em *relays* vêm se destacando por possuir um grande potencial para melhorar a confiabilidade das transmissões e ampliar a cobertura de uma rede sem fio, já que permitem combater os efeitos do desvanecimento do canal rádio-móvel, através do uso de diversidade espacial. Nesse contexto, destacam-se dois protocolos cooperativos amplamente conhecidos na literatura, a saber: decodifica-e-encaminha (DF – *decode-and-forward*) e amplifica-e-encaminha (AF – *amplify-and-forward*) [6]. Assim, as redes cooperativas cognitivas (CRNs – *cognitive relaying networks*) têm recebido grande atenção por parte da comunidade científica e da indústria, uma vez que o uso combinado de compartilhamento de espectro e comunicações cooperativas permite melhorar significativamente a eficiência espectral e a confiabilidade da rede [7]–[9]. Por exemplo, em [7], o desempenho de uma CRN de múltiplos destinos e múltiplos *relays* do tipo DF foi avaliada, considerando as restrições da temperatura de interferência e da potência transmitida máxima dos nós secundários, para um compartilhamento espectral do tipo *underlay*. Em [8], o desempenho em termos da probabilidade de *outage* de dois protocolos DF incrementais para CRNs com múltiplos destinos foi investigado, sob restrições da potência de transmissão dos nós secundários e da temperatura de interferência. Em [9], o desempenho de uma CRN do tipo *underlay* foi avaliado, considerando múltiplas fontes e múltiplos *relays*. No entanto, poucos trabalhos têm considerado o efeito da interferência da rede primária sobre o desempenho da rede secundária. Assim, em [10], o desempenho de um esquema generalizado de seleção de *relay* foi investigado, considerando a interferência do usuário

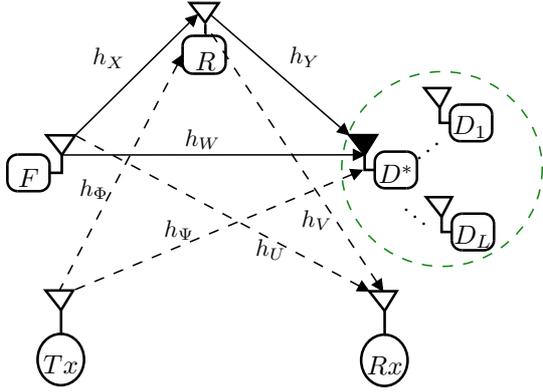


Fig. 1. Modelo do sistema (enlaces de dados: linha cheia; enlaces de interferência: linha tracejada).

primário sobre a rede secundária, para uma CRN com relays do tipo DF. Em [11], a interferência da rede primária sobre uma CRN, que opera em modo *two-way relaying*, foi avaliada, para uma seleção oportunista de *relay*. Em [12], o impacto da interferência da rede primária sobre uma CRN com múltiplos destinos foi investigado, para o protocolo DF e canais sujeitos a desvanecimento Nakagami- $m$ .

Nesse sentido, o presente artigo tem por objetivo contribuir no estudo dos efeitos da interferência da rede primária sobre a rede secundária em redes cooperativas-cognitivas do tipo *underlay*. Mais especificamente, o desempenho para diferentes critérios de seleção de destino em uma rede cooperativa cognitiva multiusuário é avaliado em termos da probabilidade de *outage*, através de simulações exaustivas de Monte Carlo. Considera-se que a potência transmitida dos nós secundários é restrita por ambas a potência de transmissão máxima disponível em cada nó e a temperatura de interferência da rede primária. Diferentemente do trabalho em [12], neste artigo, considera-se que o esquema de cooperação é baseado no protocolo AF e que os diferentes critérios de seleção exploram os enlaces diretos (entre a fonte e os múltiplos destinos) para transmitir informação, assumindo, para tanto, que os destinos realizam uma combinação por razão máxima (MRC – *maximal-ratio combining*) dos sinais vindos da fonte e do *relay*.

## II. MODELO DO SISTEMA

Considere uma rede cooperativa-cognitiva do tipo *underlay*, como mostrada na Fig. 1. A mesma considera uma rede secundária composta por uma fonte ( $F$ ), um *relay* ( $R$ ) do tipo AF e  $L$  destinos ( $D_l$ ), para  $l \in \{1, \dots, L\}$ . Além disso, o modelo do sistema contempla uma rede primária licenciada consistindo de um transmissor ( $Tx$ ) e um receptor ( $Rx$ ). Assume-se que todos os nós operam em modo de transmissão *half-duplex*, de acordo com um esquema de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA – *time division multiple access*). Além disso, considera-se que todos os sinais experimentam desvanecimento em bloco, independente e identicamente distribuído (i.i.d), do tipo Rayleigh, e ruído aditivo Gaussiano branco (AWGN – *additive white Gaussian noise*), com potência média igual a  $N_0$ . Portanto, os coeficientes do canal

correspondentes  $h_N$ , para  $N \in \{X, Y, W, U, V, \Phi, \Psi\}$ , podem ser modelados como variáveis aleatórias independentes, Gaussianas complexas e circularmente simétricas, de média zero, ou seja,  $\mathcal{CN}(0, d_N^{-\alpha})$ , em que  $d_N$  é a distância entre o respectivo par de transceptores e  $\alpha$  é o expoente de perda de percurso. Adicionalmente, assume-se que os coeficientes do canal permanecem constantes durante a transmissão de um bloco de dados, porém variam independentemente através de blocos consecutivos. Portanto, a relação sinal-ruído (SNR – *signal-to-noise ratio*) recebida nos enlaces  $F \rightarrow D_l$ ,  $F \rightarrow R$ ,  $R \rightarrow D_l$ ,  $F \rightarrow R_X$ ,  $R \rightarrow R_X$ ,  $T_X \rightarrow R$  e  $T_X \rightarrow D_l$  é, respectivamente, dada por  $W_l = P_F |h_{W_l}|^2 / N_0$ ,  $X = P_F |h_X|^2 / N_0$ ,  $Y_l = P_R |h_{Y_l}|^2 / N_0$ ,  $U = P_F |h_U|^2 / N_0$ ,  $V = P_R |h_V|^2 / N_0$ ,  $\Phi = P_P |h_\Phi|^2 / N_0$  e  $\Psi_l = P_P |h_{\Psi_l}|^2 / N_0$ , em que  $P_F$ ,  $P_R$ , e  $P_P$  são as potências de transmissão de  $F$ ,  $R$  e  $Tx$ , respectivamente. Por outro lado, considera-se que os sinais recebidos em  $R$  e  $D_l$  são interferidos pelas transmissões da rede primária, de  $Tx$  para  $Rx$ . Sob essas premissas, considere que os sinais recebidos em  $R$  e  $D_l$  no instante  $t$  são, respectivamente, dados por

$$y_R(t) = \sqrt{P_F} h_X s_F(t) + \sqrt{P_P} h_\Phi s_P(t) + n_R(t), \quad (1)$$

$$y_{D_l}(t) = \sqrt{P_F} h_{Y_l} s_R(t) + \sqrt{P_P} h_{\Psi_l} s_P(t) + n_{D_l}(t), \quad (2)$$

em que  $s_F(t)$ ,  $s_R(t)$  e  $s_P(t)$  são os sinais transmitidos por  $F$ ,  $R$  e  $Tx$ , respectivamente. Além disso, considerando o protocolo de retransmissão AF, sabe-se que  $s_R(t) = \beta y_R(t)$ , em que  $\beta$  é o fator de amplificação. Assim, assumindo que os sinais  $s_F(t)$ ,  $s_R(t)$  e  $s_P(t)$  possuem potência média normalizada, isto é,  $E\{s_F(t)\} = E\{s_R(t)\} = E\{s_P(t)\} = 1$ , onde  $E\{\cdot\}$  representa o operador esperança, e que a potência média do ruído em  $R$  e em  $D_l$  é igual a  $N_0$ , tem-se que  $\beta$  pode ser expresso como

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{P_F |h_X|^2 + P_P |h_\Phi|^2 + 1}}. \quad (3)$$

Portanto, o sinal recebido em  $D_l$  pode ser reescrito como

$$y_{D_l}(t) = \sqrt{P_F} \sqrt{P_R} h_X h_{Y_l} \beta s_F(t) + \sqrt{P_R} \sqrt{P_P} h_{Y_l} h_\Phi \beta s_P(t) + \sqrt{P_R} h_{Y_l} \beta n_R(t) + \sqrt{P_P} h_{\Psi_l} s_P(t) + n_{D_l}(t). \quad (4)$$

Dessa maneira, a relação sinal-interferência-mais-ruído (SINR – *signal-to-interference-plus-noise ratio*) fim-a-fim recebida em  $D_l$ , através do enlace de *relaying*, pode ser expressa como

$$\begin{aligned} Z_l &= \frac{P_F P_R |h_X|^2 |h_{Y_l}|^2 \beta^2}{P_R P_P |h_{Y_l}|^2 |h_\Phi|^2 \beta^2 + P_P |h_{\Psi_l}|^2 + (P_R |h_{Y_l}|^2 \beta^2 + 1) N_0} \\ &\stackrel{(a)}{=} \frac{X Y_l}{X (\Psi_l + 1) + Y_l (\Phi + 1) + (\Phi + 1) (\Psi_l + 1)} \\ &= \frac{\frac{X}{\Phi + 1} \frac{Y_l}{\Psi_l + 1}}{\frac{X}{\Phi + 1} + \frac{Y_l}{\Psi_l + 1} + 1} \\ &\stackrel{(b)}{=} \frac{A B_l}{A + B_l + 1}, \end{aligned} \quad (5)$$

onde o passo (a) é obtido após substituir  $\beta$ , como dado em (3), dividir o numerador e o denominador por  $N_0^2$  e após certas manipulações matemáticas. Já o passo (b) é obtido ao definir  $A \triangleq \frac{X}{\Phi + 1}$  e  $B_l \triangleq \frac{Y_l}{\Psi_l + 1}$  como as SINRs recebidas nos enlaces

$F \rightarrow R$  (primeiro salto) e  $R \rightarrow D_l$  (segundo salto), respectivamente. Nessas expressões, considerou-se que as potências de transmissão em  $F$  e  $R$  são restritas a um valor máximo de temperatura de interferência  $I$ , tolerado por  $Rx$ . Assim, denota-se  $\gamma_{\bar{P}_P} = P_P/N_0$  como a SNR transmitida máxima em  $Tx$ ,  $\gamma_P = P_F/N_0 = P_R/N_0$  como a SNR transmitida máxima em  $F$  e  $R$ , e  $\gamma_I = I/N_0$  como a relação temperatura de interferência-ruído suportada em  $Rx$ . Portanto, as seguintes relações são estabelecidas:

$$X = \min \left\{ \frac{\gamma_I}{|h_U|^2}, \gamma_P \right\} |h_X|^2 = \begin{cases} \gamma_I \frac{|h_X|^2}{|h_U|^2}, & |h_U|^2 > \frac{\gamma_I}{\gamma_P} \\ \gamma_P |h_X|^2, & |h_U|^2 \leq \frac{\gamma_I}{\gamma_P} \end{cases} \quad (6)$$

$$Y_l = \min \left\{ \frac{\gamma_I}{|h_{V_l}|^2}, \gamma_P \right\} |h_{Y_l}|^2 = \begin{cases} \gamma_I \frac{|h_{Y_l}|^2}{|h_{V_l}|^2}, & |h_{V_l}|^2 > \frac{\gamma_I}{\gamma_P} \\ \gamma_P |h_{Y_l}|^2, & |h_{V_l}|^2 \leq \frac{\gamma_I}{\gamma_P} \end{cases} \quad (7)$$

Define-se ainda  $C_l \triangleq \frac{W_l}{\Psi_{l+1}}$  como a SINR recebida no enlace  $F \rightarrow D_l$  (enlace direto).

### III. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE DESTINO E PROBABILIDADE DE OUTAGE

No sistema proposto, considera-se que os sinais provenientes de  $F$  e  $R$  são combinados em  $D_l$  usando a técnica MRC, obtendo assim um sinal com SNR máxima. Adicionalmente, considera-se que apenas um dos  $L$  destinos é escolhido para participar do processo de comunicação. Para tanto, o desempenho do sistema é avaliado para os seguintes critérios de escolha de destino:

- 1) **Critério ótimo:** escolhe-se o destino  $D_{l^*}$  que maximiza a SINR resultante da MRC dos sinais provenientes de  $F$  e  $R$ , ou seja

$$l^* = \arg \max_l \{Z_l + C_l\}. \quad (8)$$

- 2) **Critério de enlace direto:** é um critério sub-ótimo, pois escolhe-se o destino  $D_{l^*}$  que maximiza a SINR recebida, considerando apenas os enlaces diretos, isto é

$$l^* = \arg \max_l \{C_l\}. \quad (9)$$

- 3) **Critério de enlace de relaying:** é um critério sub-ótimo, pois escolhe-se o destino  $D_{l^*}$  que maximiza a SINR fim-a-fim, considerando apenas os enlaces de relaying, isto é

$$l^* = \arg \max_l \{Z_l\}. \quad (10)$$

- 4) **Critério de seleção parcial:** escolhe-se o destino  $D_{l^*}$  que maximiza a SINR, considerando apenas os enlaces de segundo salto, ou seja

$$l^* = \arg \max_l \{B_l\}. \quad (11)$$

Para todos os critérios de seleção supracitados, o desempenho do sistema é avaliado em termos da probabilidade de *outage*. Por definição, o sistema está em *outage* quando a SINR recebida no destino escolhido,  $\gamma_{MRC}$ , se encontra abaixo de um certo limiar, o mesmo que, sob a consideração de operação em modo *half-duplex*, é definido como  $\tau \triangleq 2^{2\mathcal{R}} - 1$ , em que  $\mathcal{R}$  é a eficiência espectral alvo, dada em bits/s/Hz. Portanto, a eficiência espectral é expressa como

$$P_{\text{OUT}} = \Pr(\gamma_{MRC} < \tau) \\ = \Pr(Z_{l^*} + C_{l^*} < \tau) \quad (12)$$

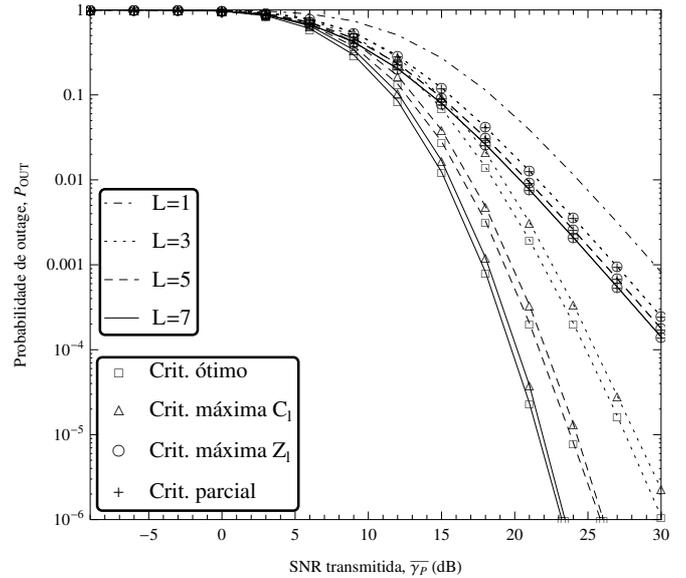


Fig. 2. Probabilidade de *outage* vs.  $\gamma_{\bar{P}}$ , para  $L = 1, 3, 5$  e  $7$ , com  $\gamma_{\bar{P}_P} = 20$  dB,  $\gamma_I = 50$  dB e  $d_x/d_{W_l} = 0,5$ .

### IV. RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, o desempenho do sistema em termos da probabilidade de *outage* é avaliado via simulações de Monte Carlo, considerando casos ilustrativos para diferentes cenários. Com esse objetivo, considera-se uma topologia de rede bidimensional, onde  $F$  e  $R$  estão localizados nas coordenadas  $(0; 0)$  e  $(0,5; 0)$ , respectivamente. Os destinos da rede secundária se encontram *clusterizados* e co-localizados nas coordenadas  $(0; 1)$ , e os nós  $Tx$  e  $Rx$ , que pertencem à rede primária, estão localizados nas coordenadas  $(0; 1)$  e  $(1; 1)$ , respectivamente. Assume-se que o ganho médio do canal para os enlaces entre quaisquer par de nós é determinado pela distância entre os nós correspondentes, sendo que o expoente de perda de percurso  $\alpha$  é igual a 4. Outrossim, a eficiência espectral alvo é estabelecida em  $\mathcal{R} = 1$  e as potências de transmissão dos nós  $F$  e  $R$  são consideradas iguais.

A Fig. 2 ilustra a probabilidade de *outage* versus a SNR transmitida máxima  $\gamma_{\bar{P}}$ , considerando os diferentes critérios de seleção descritos na Seção III, para um número diferente de destinos da rede secundária, a saber  $L=1, 3, 5$  e  $7$ . Como esperado, verifica-se que o critério de escolha ótimo alcança o melhor desempenho para qualquer número de destinos. Adicionalmente, observa-se que o critério de enlace direto, que maximiza  $C_l$ , alcança um desempenho bem próximo do ótimo ( $< 1$  dB); por conseguinte, esse critério de seleção resulta mais vantajoso para o cenário considerado, visto que exige o conhecimento da informação do estado do canal (CSI – *channel state information*) apenas dos enlaces diretos, demandando assim menos carga de realimentação (ou *feedback overhead*). Nota-se ainda que, os critérios de enlace de relaying e de seleção parcial, que maximizam  $Z_l$  e  $B_l$ , respectivamente, apresentam o mesmo desempenho, devido a que o termo  $B_l$  determina a escolha no critério de maximização de  $Z_l$  (veja-se em (5)). Por outro lado, nota-se que para esses dois critérios, um aumento do número de destinos não resulta em

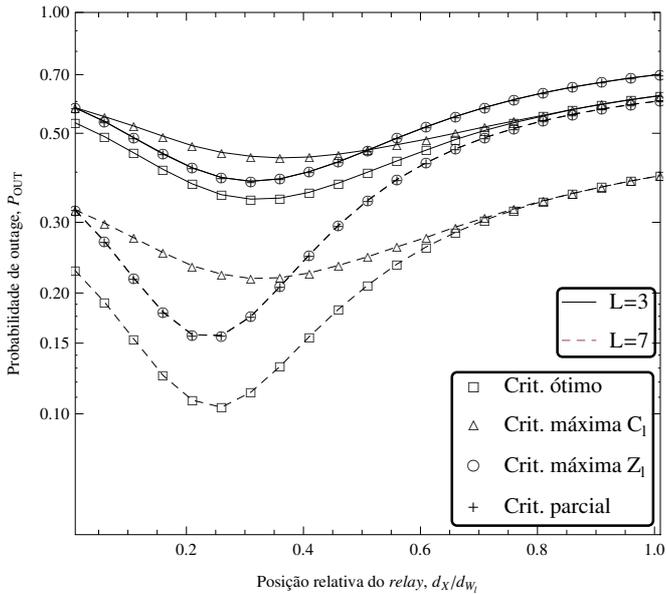


Fig. 3. Probabilidade de *outage* vs. posição relativa do *relay*, para  $L = 3$  e  $L = 7$ , com  $\gamma_{P_P} = 20$  dB,  $\gamma_I = 50$  dB e  $\gamma_P = 10$  dB.

um aumento da ordem de diversidade, o que é determinado pela inclinação das curvas em alta SNR. Pelo contrário, todas as curvas, mesmo apresentando uma melhoria no desempenho, alcançam a mesma ordem de diversidade que o caso  $L = 1$ . Portanto, para esse cenário, os critérios que maximizam  $Z_1$  e  $B_1$  não oferecem ganho de diversidade.

Para uma melhor compreensão do comportamento das curvas da Fig. 2, a Fig. 3 mostra a probabilidade de *outage* versus a posição relativa do *relay* em relação à fonte. Para efeito ilustrativo, apresentam-se apenas os casos para  $L=3$  e  $L=7$ , considerando os quatro critérios de seleção de destino da Seção III. Observa-se que, para qualquer posição de  $R$ , o melhor desempenho é sempre obtido na seleção ótima, como esperado. No entanto, nota-se que os critérios de maximização baseados em  $C_1$ ,  $Z_1$  e em seleção parcial apresentam comportamentos diferentes, a depender da posição relativa de  $R$ . Assim, quando  $R$  é posicionado mais próximo da fonte (aproximadamente até a metade da distância total até o destino), a seleção baseada em  $C_1$  oferece o pior desempenho dentre os quatro critérios, sendo que essa diferença aumenta conforme  $L$  aumenta. Ainda nesse intervalo de posições, os critérios baseados em  $Z_1$  e em escolha parcial apresentam um desempenho intermediário entre os critérios ótimo e baseado em  $C_1$ . Isto é devido ao fato de que, nessas posições, o segundo salto encontra-se enfraquecido e apresenta condições similares àquelas do enlace direto, assim as escolhas que consideram o enlace de *relaying* oferecem ganhos de desempenho maiores, uma vez que o primeiro salto é forte e a escolha entre um número maior de destinos explora a diversidade do segundo salto, portanto melhorando o desempenho médio desse enlace.

Já para posições relativas mais próximas do destino (aproximadamente a partir da metade do caminho entre  $F$  e  $D_1$ ), percebe-se que o ganho no desempenho oferecido pela escolha baseada em  $C_1$  aproxima-se até se sobrepôr com o desem-

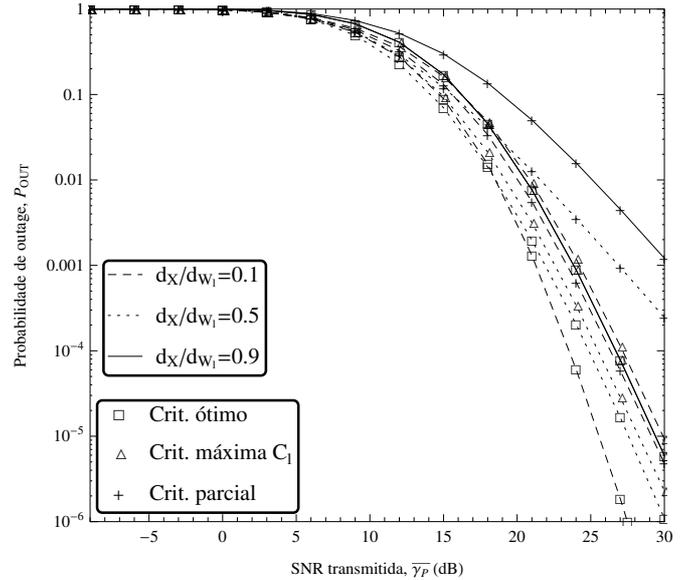


Fig. 4. Probabilidade de *outage* vs.  $\bar{\gamma}_P$ , para  $L = 3$  e posições relativas do *relay*  $d_X/d_{W_1} = 0,1, 0,5$  e  $0,9$ , com  $\gamma_{P_P} = 20$  dB  $\gamma_I = 50$  dB.

penho alcançado pelo critério ótimo, e os critérios baseados em  $Z_1$  e  $B_1$  apresentam um desempenho inferior e, ainda, exibem uma perda em ganho por diversidade multiusuário dado que o desempenho para  $L = 3$  e  $L = 7$  são bem próximos. Isto é devido ao fato de que, para essas posições, o segundo salto se encontra fortalecido, portanto, para todos os  $L$  destinos, os canais apresentarão condições semelhantes e a escolha por um ou outro não fornece ganhos significativos no desempenho, uma vez que o gargalo está no primeiro salto, que encontra-se em condições desfavoráveis. Dessa forma, a escolha que maximiza o enlace direto rende um maior ganho no desempenho, e, inclusive, domina a seleção no caso do critério ótimo, portanto, ambos os critérios atingem o mesmo desempenho. Em conclusão, a escolha baseada em  $C_1$  resulta no melhor critério de seleção, pelo ganho de desempenho e menor complexidade, quando  $R$  está mais próximo de  $D_1$ , já para posições mais próximas de  $F$ , a melhor escolha a ser feita é através do critério ótimo.

Com o propósito de complementar as observações anteriores, na Fig. 4 é ilustrada a probabilidade de *outage* vs. a SNR transmitida  $\bar{\gamma}_P$ , para um número fixo de destinos  $L = 3$ , considerando apenas os critérios de seleção de destino ótimo, baseado em  $C_1$  e em seleção parcial (visto que o critério que maximiza  $Z_1$  alcança um desempenho igual). Para fins de comparação, três posições relativas de  $R$  foram contrastadas, a saber  $d_X/d_{W_1} = 0,1, 0,5$  e  $0,9$ . A princípio, cabe ressaltar que, para todos os casos (assim como para qualquer outra distância), o critério ótimo sempre atinge o melhor desempenho. No entanto, observa-se que, para posições relativas de  $R$  bem próximas de  $F$ , o ganho de diversidade (inclinação da curva) alcançado pelo critério ótimo é maior ( $\approx 4$ ) que para qualquer um dos outros critérios na mesma posição e para qualquer critério para posições relativas ao redor da metade do caminho e as bem próximas de  $D_1$ . Assim também, para posições relativas desde a metade do caminho até as

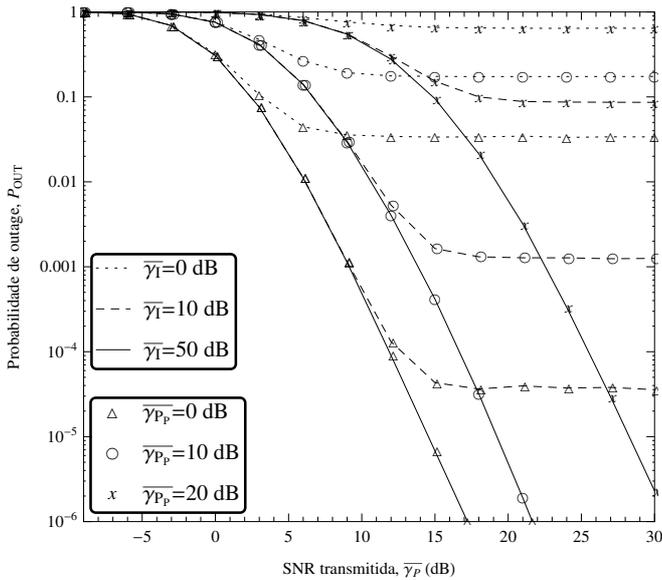


Fig. 5. Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida  $\bar{\gamma}_P$ , para diferentes valores de  $\bar{\gamma}_I$  e  $\bar{\gamma}_{P_p}$ , considerando  $L = 3$ .

mais próximas de  $D_I$ , é observado que o critério parcial (e, portanto o critério baseado em  $Z_I$ ) apresentam uma perda em ganho de diversidade, assim o aumento do número de destinos não resulta em ganho de diversidade e apenas traz ganhos de desempenho, atingindo uma ordem de diversidade aproximadamente igual a 2. Para os outros casos, o ganho de diversidade atingido é igual para todos os casos ( $\approx 3$ ) e o ganho em desempenho apresenta variações mínimas entre um e outro critério. Isto é devido ao fato de que em posições mais próximas de  $F$ , o primeiro salto se encontra fortalecido e uma maior diversidade no segundo salto resulta em ganhos de desempenho do enlace de *relaying* e, portanto, do critério ótimo. Já para posições relativas mais próximas de  $D_I$ , o primeiro salto é enfraquecido, representando assim um gargalo no desempenho, que impede atingir ganho de diversidade ao explorar o enlace de *relaying*.

Na Fig. 5 é ilustrada a probabilidade de *outage* vs. a SNR transmitida  $\bar{\gamma}_P$ , fixando o número de destinos em  $L = 3$ . Para este caso, foi considerada apenas a maximização do enlace direto como critério de escolha, para a posição  $d_X/d_{W_I} = 0,5$ . Foram realizadas simulações para  $\bar{\gamma}_{P_p} = 0, 10, 20$  dB e  $\bar{\gamma}_I = 0, 10, 50$  dB. Observa-se que patamares de desempenho são determinados apenas pela variação da temperatura de interferência  $\bar{\gamma}_I$ , devido à restrição imposta sobre a potência transmitida dos nós secundários. Por outro lado, a variação da SNR transmitida da fonte primária,  $\bar{\gamma}_{P_p}$ , não apresenta influência no surgimento dos patamares de desempenho, porém o seu incremento resulta em grandes perdas de desempenho da rede secundária, como indicado pela diferença entre as curvas para  $\bar{\gamma}_{P_p} = 0$  e 20 dB para  $\bar{\gamma}_I = 10$  dB. Portanto, evidencia-se que a consideração da interferência da rede primária sobre a secundária é de crucial importância pois pode acarretar em perdas significativas na confiabilidade da comunicação na rede secundária, chegando inclusive a inviabilizar o compartilhamento espectral.

## V. CONCLUSÕES

No presente artigo foram avaliados diferentes critérios de seleção de destino para uma rede cooperativa-cognitiva multiusuário do tipo *underlay*. Verificou-se que o critério ótimo, que maximiza a MRC dos sinais vindos dos enlaces direto e de *relaying*, atinge o melhor desempenho. No entanto, o critério baseado apenas na maximização do enlace direto consegue atingir o mesmo desempenho que o critério ótimo para posições do *relay* próximas aos destinos, dado que o enlace do *relay* não permite explorar a diversidade, devido que o primeiro salto encontra-se enfraquecido e representa um gargalo no desempenho. Já para posições do *relay* próximas da fonte, o ganho de diversidade se vê refletido no enlace de *relaying*, ao ter um primeiro salto fortalecido. Assim, para essas posições, o critério ótimo representa uma melhor estratégia. Também, foi constatado que a temperatura de interferência causa patamares no desempenho do sistema e que um aumento no nível de interferência da rede primária sobre a secundária provoca perdas significativas de desempenho da rede secundária, podendo inviabilizar o compartilhamento espectral.

## REFERÊNCIAS

- [1] C. Wang, F. Haider, X. Gao, X. You, Y. Yang, D. Yuan, H. Aggoune, H. Haas, S. Fletcher, and E. Hepsaydir, "Cellular architecture and key technologies for 5G wireless communication networks," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 122–130, Feb. 2014.
- [2] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: Making software radios more personal," *IEEE Pers. Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 13–18, Aug. 1999.
- [3] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, Feb. 2005.
- [4] A. Goldsmith, S. Jafar, I. Maric, and S. Srinivasa, "Breaking spectrum gridlock with cognitive radios: An information theoretic perspective," *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 894–914, Maio 2009.
- [5] M. Khoshkholgh, K. Navaie, and H. Yanikomeroglu, "Access strategies for spectrum sharing in fading environment: Overlay, underlay, mixed," *IEEE Trans. Mobile Comput.*, vol. 9, no. 12, pp. 1780–1793, Dec. 2010.
- [6] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks efficient protocols and outage behavior," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Nov. 2004.
- [7] F. R. V. Guimarães, D. B. da Costa, T. A. Tsiftsis, C. C. Cavalcante, and G. K. Karagiannidis, "Multiuser and multirelay cognitive radio networks under spectrum-sharing constraints," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 1, pp. 443–439, Jan. 2014.
- [8] E. E. Benitez Olivo, D. P. Moya Osorio, D. B. da Costa, and J. C. S. Santos Filho, "Outage performance of spectrally efficient schemes for multiuser cognitive relaying networks with underlay spectrum sharing," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 12, pp. 6629–6642, Dec. 2014.
- [9] H. Huang, N. C. Beaulieu, Z. Li, and J. Si, "On the performance of underlay cognitive multisource multirelay cooperative networks," *IEEE Commun. Letters*, vol. 19, no. 4, pp. 605–608, Apr. 2015.
- [10] A. M. Salhab and S. A. Zummo, "Cognitive DF generalized order relay selection networks with interference from primary user," in *Proc. IEEE Wireless Commun. Netw. Conf. (WCNC)*, pp. 357–362, Mar. 2015.
- [11] X. Zhang, Z. Zhang, J. Xing, R. Yu, P. Zhang, and W. Wang, "Exact outage analysis in cognitive two-way relay networks with opportunistic relay selection under primary user's interference," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 64, no. 6, pp. 2502–2511, Jun. 2015.
- [12] Y. Huang, F. Al-Qahtani, Q. Wu, C. Zhong, J. Wang, and H. Alnuweiri, "Outage analysis of spectrum sharing relay systems with multiple secondary destinations under primary user's interference," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 63, no. 7, pp. 3456–3464, Sep. 2014.