

# Análise de Outage para Redes Cooperativas-Cognitivas com Seleção Oportunista e Parcial de Relays Full Duplex

Daniel de Paiva Mucin, Edgar Eduardo Benitez Olivo e Diana Pamela Moya Osorio

**Resumo**— Neste artigo, o desempenho de dois esquemas de seleção de *relay* é analisado em termos da probabilidade de *outage* para uma rede cooperativa-cognitiva com compartilhamento espectral do tipo *underlay*, que consiste de múltiplos *relays* do tipo decodifica-e-encaminha operando em modo de retransmissão *full duplex*. Dois critérios de seleção de *relay* são considerados, a saber: (i) critério de seleção ótimo, que requer conhecimento global do estado de todos os enlaces da rede; e (ii) critério de seleção subótimo, que requer conhecimento parcial dos estados de canal da rede, mais especificamente, dos enlaces fonte-*relay*. Como contribuições deste trabalho, para cada critério de seleção de *relay* proposto, expressões analíticas para a probabilidade de *outage* assintótica em regime de alta relação sinal-ruído são obtidas. Além disso, simulações de Monte Carlo são realizadas para validar essas expressões e avaliar o desempenho da rede em função de parâmetros-chave do sistema.

**Palavras-Chave**— Decodifica-e-encaminha, diversidade cooperativa, probabilidade de *outage*, retransmissão *full duplex*, seleção de *relay*.

**Abstract**— In this paper, the performance of two relay selection schemes is analyzed in terms of the outage probability for a cognitive relaying network with underlay spectral sharing, which consists of multiple decode-and-forward relays operating in full-duplex mode. Two relay selection criteria are considered, namely: (i) optimal selection criterion, which requires global knowledge of the channel state information of the network; and (ii) suboptimal selection criterion, which requires partial knowledge of the channel state information, more specifically, of the source-relay links. As contributions of this work, for the proposed relay selection criteria, analytical expressions are obtained for the asymptotic outage probability at the high signal-to-noise ratio regime. In addition, Monte Carlo simulations are carried out to validate our expressions and evaluate the network performance in terms of key system parameters.

**Keywords**— Cooperative diversity, decode-and-forward, full-duplex relaying, outage probability, relay selection.

## I. INTRODUÇÃO

A escassez e subutilização de espectro é uma das principais barreiras a serem superadas para que os ganhos pretendidos pelas redes 5G em termos de taxa e capacidade se tornem uma realidade. As técnicas de rádio cognitivo têm sido propostas como uma solução promissora para vencer essa barreira. No contexto das técnicas de rádio cognitivo, o compartilhamento

Daniel de Paiva Mucin e Edgar Eduardo Benitez Olivo, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Câmpus de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista-SP, Brasil, E-mails: daniel.mucin@unesp.br, edgar.olivo@unesp.br.

Diana Pamela 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: dianamoya@ufscar.br.

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo CNPq (Procs. 421850/2018-3 e 428649/2016-5).

espectral do tipo *underlay* é considerado um forte candidato para mitigar a escassez de espectro, pois apresenta baixa complexidade de implementação e maior flexibilidade se comparado com os esquemas *overlay* e *interweave*, ao permitir que usuários não licenciados, denominados usuários secundários, obtenham acesso à banda licenciada, garantida aos usuários primários, desde que um certo nível de interferência na rede primária, denominado como temperatura de interferência, não seja excedido [1].

Concomitantemente, o conceito de comunicações cooperativas é amplamente conhecido pelo seu potencial de fornecer ganhos significativos de desempenho em termos da confiabilidade e extensão de cobertura da rede [2]. De acordo com esse conceito, diferentes nós de uma rede sem fio são capazes de transmitir, além de sua própria informação, aquela oriunda de outros nós, emulando um arranjo virtual de antenas e obtendo-se diferentes réplicas do sinal de interesse advindos desses diversos nós retransmissores (denominados *relays*) espacialmente distribuídos pela rede, criando assim um novo tipo de diversidade espacial, denominada diversidade cooperativa.

No contexto das comunicações cooperativas, a operação dos *relays* é ditada principalmente por dois protocolos de retransmissão amplamente conhecidos, a saber: amplifica-e-encaminha (AF, *amplify-and-forward*) e decodifica-e-encaminha (DF, *decode-and-forward*); assim como por dois modos de retransmissão: *half duplex* (HD) e *full duplex* (FD). De maneira geral, o protocolo DF apresenta melhor desempenho que o AF, às custas da complexidade de implantação e o modo FD apresenta melhor eficiência espectral em relação ao modo HD, às custas da auto-interferência sofrida pela antena receptora do *relay* a partir de sua própria antena transmissora, como consequência da retransmissão simultânea de informação [3].

As redes cooperativas-cognitivas têm recebido atenção especial da comunidade científica, já que o uso combinado de técnicas de compartilhamento espectral e de comunicações cooperativas tornam possível melhorar, simultaneamente, a eficiência espectral e a confiabilidade das redes sem fio [4].

Recentemente, em [5], foi analisado o desempenho em termos da probabilidade de *outage* para uma rede cooperativa-cognitiva FD-AF, em que o critério de seleção oportunista de *relays* foi considerado; no entanto, a existência do enlace direto e a potência máxima disponível dos nós secundários da rede não foram considerados nesse trabalho. Muito recentemente, em [6], foi analisado o desempenho em termos da probabilidade de *outage* em uma rede cooperativa-cognitiva

FD-DF com compartilhamento espectral do tipo *underlay*, em que a influência do enlace direto e a potência máxima disponível dos nós secundários da rede foram considerados; porém, nesse trabalho não foi avaliado o ganho obtido a partir de esquemas de seleção de *relays*. Em [7], os autores deste artigo avaliaram o desempenho de *outage* para quatro critérios diferentes de seleção de *relay* por meio de simulações exaustivas de Monte Carlo, considerando uma rede cooperativa-cognitiva FD-DF com compartilhamento espectral do tipo *underlay* com a presença do enlace direto. Naquele trabalho, as curvas simuladas não foram validadas por uma análise matemática.

Portanto, este artigo pretende contribuir para o estudo das redes cooperativas-cognitivas por meio da análise da probabilidade de *outage* assintótica do modelo de sistema proposto em [7], para dois critérios de seleção de *relay*. As expressões obtidas se encontram na forma integral devido à complexidade do problema proposto, em que há correlação entre as diferentes variáveis do sistema.

*Notação:* Ao longo deste artigo,  $f_X(\cdot)$  e  $F_X(\cdot)$  denotam a função densidade de probabilidade (PDF, *probability density function*) e a função distribuição acumulada (CDF, *cumulative distribution function*) de uma variável aleatória  $X$ , respectivamente;  $E[\cdot]$  é o operador esperança e  $\Pr[\cdot]$  denota a probabilidade de ocorrência de um dado evento.

## II. MODELO DO SISTEMA

Considera-se uma rede cooperativa-cognitiva com compartilhamento espectral do tipo *underlay*, como apresentada na Fig. 1, composta por uma fonte  $S$ , um *cluster* de *relays*  $R_n$ , para  $n = 1, \dots, N$ , e um destino  $D$ , os quais operam sob a presença de um receptor primário  $P$ . Para tornar possível o modo de retransmissão *full duplex*, assume-se que os *relays* são equipados com duas antenas (uma para transmissão e outra para recepção).

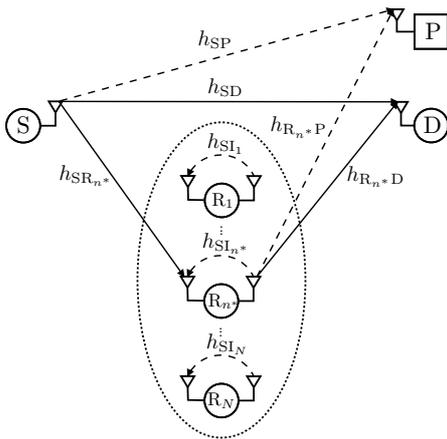


Fig. 1. Modelo do sistema (sinal de interesse: linha sólida; sinal de interferência: linha tracejada).

Os coeficientes de canal do  $n$ -ésimo primeiro salto, do  $n$ -ésimo segundo salto e do enlace direto, presentes na rede secundária, são denotados por  $h_{SR_n}$ ,  $h_{R_n D}$  e  $h_{SD}$ , respectivamente; o coeficiente do canal de auto-interferência residual no  $n$ -ésimo *relay* (obtido após um processo de cancelamento imperfeito de interferência) é denotado por  $h_{SI_n}$ , em que

$n = 1, \dots, N$ ; e os coeficientes de canal dos enlaces de interferência,  $S \rightarrow P$  e  $R_n \rightarrow P$ , são respectivamente denotados por  $h_{SP}$  e  $h_{R_n P}$ . Considera-se que todos os enlaces da rede experimentam desvanecimento do tipo Rayleigh e que seus respectivos coeficientes de canal são independentes e identicamente distribuídos (i.i.d.). Dessa forma, os ganhos de canal correspondentes são definidos como  $g_A = |h_A|^2$ , para  $A \in \{SR_n, R_n D, SD, SI_n, SP, R_n P\}$ , os quais seguem distribuições exponenciais com valor médio  $\Omega_A = E[|h_A|^2]$ .

Ademais, denota-se por  $I$  a temperatura de interferência máxima tolerada pelo receptor primário  $P$ , causada de maneira simultânea por  $S$  e  $R_n$ . Sendo assim, é necessário que as potências transmitidas da fonte e do *relay* escolhido para cooperação, respectivamente denotadas por  $P_S$  e  $P_{R_n}$ , satisfaçam a seguinte restrição:

$$g_{SP}P_S + g_{R_n P}P_{R_n} \leq I, \quad (1)$$

em que

$$P_S = \eta_1 \min \left\{ P_t, \frac{I}{g_{SP}} \right\}, \quad (2)$$

$$P_{R_n} = \eta_2 \min \left\{ P_t, \frac{I}{g_{R_n P}} \right\}, \quad (3)$$

sendo  $P_t$  a potência transmitida máxima disponível em  $S$  e  $R_n$ ,  $0 \leq \eta_1 \leq 1$  um fator de alocação de potência arbitrário entre  $S$  e  $R_n$ , e  $\eta_2 = 1 - \eta_1$ , a fim de satisfazer a restrição dada em (1). Assim, as SNRs recebidas instantâneas no  $n$ -ésimo primeiro salto,  $n$ -ésimo segundo salto, enlace direto e  $n$ -ésimo enlace de auto-interferência, podem ser expressas como  $\gamma_{SR_n} = g_{SR_n}P_S/N_0$ ,  $\gamma_{R_n D} = g_{R_n D}P_{R_n}/N_0$ ,  $\gamma_{SD} = g_{SD}P_S/N_0$  e  $\gamma_{SI_n} = g_{SI_n}P_{R_n}/N_0$ , respectivamente, em que  $P_S$  e  $P_{R_n}$  são dadas em (2) e (3), e  $N_0$  é a potência do ruído AWGN (*additive white Gaussian noise*), existente nos terminais receptores da rede. Define-se ainda  $\gamma_P \triangleq P_t/N_0$  como a SNR transmitida máxima dos nós da rede secundária e  $\gamma_I \triangleq I/N_0$  como a relação interferência-ruído máxima suportada pelo receptor da rede primária. Logo, tem-se que

$$\gamma_{SR_n} = \eta_1 \min \left\{ \gamma_P, \frac{\gamma_I}{g_{SP}} \right\} g_{SR_n}, \quad (4)$$

$$\gamma_{R_n D} = \eta_2 \min \left\{ \gamma_P, \frac{\gamma_I}{g_{R_n P}} \right\} g_{R_n D}, \quad (5)$$

$$\gamma_{SD} = \eta_1 \min \left\{ \gamma_P, \frac{\gamma_I}{g_{SP}} \right\} g_{SD}, \quad (6)$$

$$\gamma_{SI_n} = \eta_2 \min \left\{ \gamma_P, \frac{\gamma_I}{g_{R_n P}} \right\} g_{SI_n}. \quad (7)$$

*Remark:* Note a correlação entre as SNRs recebidas instantâneas por meio dos ganhos de canal variáveis  $g_{SP}$  e  $g_{R_n P}$ .

## III. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO DE RELAY

Para o sistema sob análise, assume-se que a combinação dos sinais provenientes de  $S$  e  $R_n$  em  $D$ , é feita por meio da técnica JD (*joint decoding*) [4], de tal forma que a SNR do sinal recebido em  $D$  é obtida pela soma das SNRs recebidas desde  $S$  e  $R_n$ . Logo, tem-se que a SNR fim-a-fim recebida instantânea é dada por

$$\gamma = \min \left( \frac{\gamma_{SR_n}}{1 + \gamma_{SI_n}}, \gamma_{R_n D} + \gamma_{SD} \right), \quad (8)$$

sendo que o índice  $n^*$  refere-se ao *relay* que é selecionado para cooperação, segundo um dos dois critérios de seleção de *relay* apresentados abaixo.

- 1) **Seleção Oportunista de Relay:** Denotado por ORS (*opportunistic relay selection*), o *relay* utiliza conhecimento global da informação de estado de canal (CSI, *channel state information*) de todos os enlaces que constituem a rede. Segundo este critério, o *relay* escolhido para a cooperação,  $R_{n^*}$ , é aquele que maximiza  $\gamma$  em D, cujo índice é obtido como

$$n^* = \arg \max_n \left\{ \min \left( \frac{\gamma_{SR_n}}{1 + \gamma_{SI_n}}, \gamma_{R_n D} + \gamma_{SD} \right) \right\}. \quad (9)$$

- 2) **Seleção Parcial Baseada nos Enlaces do Primeiro Salto:** Denotado por PRS-1H (*partial relay selection based on first-hop links*), este critério escolhe o *relay*  $R_{n^*}$  que maximiza a relação sinal-ruído-mais-interferência (SINR, *signal-to-interference-plus-noise ratio*) recebida instantânea no primeiro salto. Portanto, tem-se que

$$n^* = \arg \max_n \left\{ \frac{\gamma_{SR_n}}{1 + \gamma_{SI_n}} \right\}. \quad (10)$$

#### IV. PROBABILIDADE DE OUTAGE

Por definição, o sistema está em *outage* quando  $\gamma$  está abaixo de um certo limiar,  $\gamma_{th}$ . Portanto, a probabilidade de *outage* pode ser expressa como [8]

$$P_{out} = \Pr(\gamma < \gamma_{th}). \quad (11)$$

Para o sistema sob análise, substituindo (8) em (11), a probabilidade de *outage* pode ser escrita como

$$P_{out} = \Pr \left[ \min \left( \frac{\gamma_{SR_{n^*}}}{1 + \gamma_{SI_{n^*}}}, \gamma_{R_{n^*} D} + \gamma_{SD} \right) < \gamma_{th} \right]. \quad (12)$$

A fim de viabilizar a análise matemática do sistema, considerou-se o regime de alta SNR transmitida,  $\gamma_P \rightarrow \infty$ . Assim, as expressões em (4) a (7), respectivamente, podem ser expressas em alta SNR como  $\gamma_{SR_n} = \eta_1 \gamma_I g_{SR_n} / g_{SP}$ ,  $\gamma_{R_n D} = \eta_2 \gamma_I g_{R_n D} / g_{R_n P}$ ,  $\gamma_{SD} = \eta_1 \gamma_I g_{SD} / g_{SP}$  e  $\gamma_{SI_n} = \eta_2 \gamma_I g_{SI_n} / g_{R_n P}$ .

A partir de (12), considerando que o *relay* é escolhido de acordo com um dos dois critérios de seleção apresentados na Seção III, as expressões para a probabilidade de *outage* assintótica para cada critério de seleção de *relay* do sistema sob análise são obtidas da maneira apresentada nas seguintes Proposições.

**Proposição 1:** A expressão analítica para a probabilidade de *outage* assintótica, em que o critério oportunista de seleção de *relay* é usado, é dada por

$$\begin{aligned} P_{out} &= \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1 \gamma_I}} \left\{ \int_0^\infty \int_0^\infty \left[ F_{g_{SR}} \left( \frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I \eta_1} \left( 1 + \frac{\gamma_I \eta_2 w}{y_n} \right) \right) \right. \right. \\ &+ F_{g_{RD}} \left( \frac{y_n (\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I \eta_2} \right) - F_{g_{SR}} \left( \frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I \eta_1} \left( 1 + \frac{\gamma_I \eta_2 w}{y_n} \right) \right) \\ &\times F_{g_{RD}} \left( \frac{y_n (\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I \eta_2} \right) \left. \right] f_{g_{SI}}(w) f_{g_{RP}}(y_n) dw dy_n \Big\}^N \\ &\times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{SP}}(x) dz dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &+ \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1 \gamma_I}} \left[ \int_0^\infty \int_0^\infty F_{g_{SR}} \left( \frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I \eta_1} \left( 1 + \frac{\gamma_I \eta_2 w}{y_n} \right) \right) \right. \\ &\times f_{g_{SI}}(w) f_{g_{RP}}(y_n) dw dy_n \Big]^N f_{g_{SD}}(z) f_{g_{SP}}(x) dz dx. \quad (13) \end{aligned}$$

**Demonstração:** Vide Apêndice I. ■

**Proposição 2:** A expressão analítica para a probabilidade de *outage* assintótica, em que o critério de seleção parcial de *relay* baseado nos enlaces do primeiro salto é usado, é dada por

$$\begin{aligned} P_{out} &= N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\gamma_{th}} \left[ \int_0^\infty F_{\gamma_{R_1}}(u) f_{g_{RP}}(y_i) dy_i \right]^{N-1} \\ &\times f_{\gamma_{R_1}}(u) f_{g_{RP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dud y_n dx \\ &+ N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1 \gamma_I}} \int_0^\infty \left[ F_{g_{RD}} \left( \frac{y_n (\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I \eta_2} \right) \right] \\ &\times \left[ \int_0^\infty F_{\gamma_{R_1}}(u) f_{g_{RP}}(y_i) dy_i \right]^{N-1} \\ &\times f_{\gamma_{R_1}}(u) f_{g_{SD}}(z) f_{g_{RP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dud z dy_n dx \\ &- N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^{\frac{x\gamma_{th}}{\eta_1 \gamma_I}} \int_0^{\gamma_{th}} \left[ F_{g_{RD}} \left( \frac{y_n (\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I \eta_2} \right) \right] \\ &\times \left[ \int_0^\infty F_{\gamma_{R_1}}(u) f_{g_{RP}}(y_i) dy_i \right]^{N-1} \\ &\times f_{\gamma_{R_1}}(u) f_{g_{SD}}(z) f_{g_{RP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dud z dy_n dx, \quad (14) \end{aligned}$$

em que

$$F_{\gamma_{R_1}}(u) = 1 - \frac{\eta_1 y \Omega_{SR} e^{-\frac{ux}{\gamma_I \eta_1 \Omega_{SR}}}}{\eta_1 y \Omega_{SR} + \eta_2 ux \Omega_{SI}}, \quad (15)$$

$$f_{\gamma_{R_1}}(u) = \frac{xy e^{-\frac{ux}{\gamma_I \eta_1 \Omega_{SR}}} (\eta_1 \Omega_{SR} (y + \gamma_I \eta_2 \Omega_{SI}) + \eta_2 ux \Omega_{SI})}{\gamma_I (-\eta_2 ux \Omega_{SI} - \eta_1 y \Omega_{SR})^2}, \quad (16)$$

com  $\gamma_{R_1} = \gamma_{SR} / (1 + \gamma_{SI})$ .

**Demonstração:** Vide Apêndice II. ■

#### V. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, utiliza-se de exemplos ilustrativos para avaliar o desempenho de *outage* dos critérios de seleção de *relay* e validar as expressões analíticas obtidas na Seção IV. Considera-se uma topologia de rede bidimensional com distâncias normalizadas, em que a fonte, o *cluster* de *relays* e o destino da rede secundária estão localizados nas coordenadas (0;0), (0,5;0) e (1;0), respectivamente, e o receptor primário está localizado na coordenada (0,25;1). Assume-se que o ganho médio do canal entre um dado par de nós é  $\Omega_A = d_A^{-\alpha}$ , para  $A \in \{SR_n, R_n D, SD, SP, R_n P\}$ , onde  $d_A$  é a distância entre os nós, e  $\alpha$  é o expoente de perda de percurso. Estabelece-se  $\alpha = 4$  e o limiar alvo de SNR recebida instantânea  $\gamma_{th} = 0$  dB.

A Fig. 2 apresenta o desempenho de *outage* pela SNR máxima transmitida do sistema,  $\gamma_P$ , para os dois critérios de seleção avaliados e um número diferente de *relays*  $N = 1, 2, 3$ . Assumiu-se que  $\Omega_{SI_n} = -10$  dB,  $\gamma_I = 20$  dB e  $\eta_1 = 0,5$  (isto é, um esquema de alocação igual de potência entre os nós S e  $R_{n^*}$ ). Note que, para  $N = 1$ , os dois critérios apresentam o mesmo desempenho, como esperado. Note ainda que, para  $N > 1$ , pelo fato de explorar o conhecimento global dos estados de canal da rede, o critério oportunista possui um desempenho superior em relação ao critério parcial estudado. Porém, o critério PRS-1H, baseado no conhecimento de CSI

dos primeiros saltos, apresenta o mesmo desempenho que o critério oportunista para a região de alta SNR. Logo, o uso deste critério parcial mostra ser mais eficiente em termos do *feedback overhead* requerido, já que uma menor quantidade de CSI é necessária para determinar o *relay* escolhido, quando comparado ao uso do critério oportunista. Cabe destacar que, as assíntotas obtidas a partir da avaliação das expressões analíticas em (13) e (14) coincidem perfeitamente com os resultados obtidos por simulação na região de alta SNR, validando assim a análise.

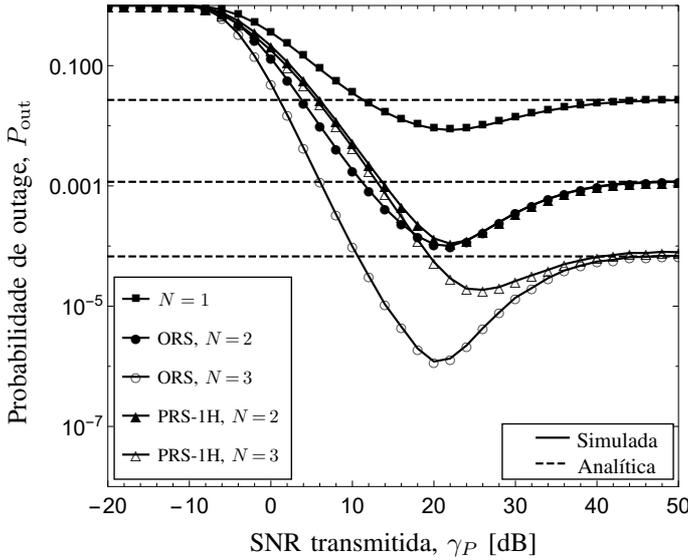


Fig. 2. Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, para os dois critérios de seleção de *relay*, considerando um número diferente de *relays*  $N=1, 2, 3$ ;  $\Omega_{SI_n} = -10$  dB;  $\gamma_I = 20$  dB e  $\eta_1 = 0,5$ .

A Fig. 3 ilustra o efeito da auto-interferência inerente aos *relays* FD no desempenho de *outage* do sistema para os dois critérios de seleção avaliados, em que dois valores de ganho médio do canal de auto-interferência são considerados,  $\Omega_{SI_n} = -5$  e  $-10$  dB, assim como um número fixo de *relays*,  $N=3$ . Para este cenário, assumiu-se que  $\gamma_I = 20$  dB e  $\eta_1 = 0,5$ . Observe que nas curvas de desempenho surgem patamares na região de alta SNR. Isto se deve a dois fatores principais: a auto-interferência presente no *relay* e a restrição de temperatura de interferência no receptor primário. Note que, para baixos valores do ganho médio do canal de auto-interferência (como, por exemplo,  $\Omega_{SI_n} = -10$  dB), a probabilidade de *outage* é governada de maneira majoritária pela restrição de temperatura de interferência,  $\gamma_I$ , uma vez que, para valores de SNR transmitida aproximadamente igual ao valor de  $\gamma_I$ , ou seja,  $\gamma_P \approx \gamma_I = 20$  dB, patamares são obtidos nas curvas de desempenho. Em contrapartida, com o aumento do ganho médio do canal de auto-interferência, deteriora-se o desempenho de *outage* do sistema, comportamento esperado e que resulta em um aumento do nível do patamar nas curvas. Neste cenário, o desempenho do critério PRS-1H também converge àquele apresentado pelo critério ORS para regiões de alta SNR.

## VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho, analisou-se a probabilidade de *outage* de uma rede cooperativa-cognitiva baseada em *relays* do tipo

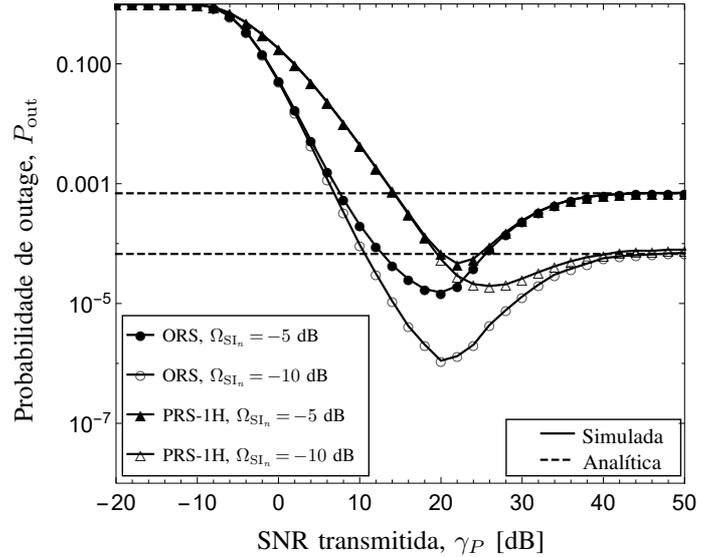


Fig. 3. Probabilidade de *outage* vs. SNR transmitida, para os dois critérios de seleção de *relay*, considerando um número de *relays*  $N=3$ ;  $\Omega_{SI_n} = -5$  e  $-10$  dB;  $\gamma_I = 20$  dB e  $\alpha_1 = 0,5$ .

*full duplex* sob o protocolo decodifica-e-encaminha, para diferentes parâmetros do sistema e dois critérios de seleção de *relay*. Expressões analíticas para a probabilidade de *outage* assintótica para cada critério de seleção de *relay* foram obtidas e validadas por meio de simulações exaustivas de Monte Carlo. Constatou-se que o desempenho do sistema pode ser degradado de maneira significativa a depender do valor da auto-interferência inerente aos *relays* do tipo FD. Constatou-se também que o melhor desempenho é obtido por meio do critério de seleção oportunista, como esperado, já que o mesmo detém conhecimento do CSI global da rede. Porém, o critério PRS-1H, que considera as informações de estado de canal do primeiro salto, atingiu o mesmo desempenho que o critério de seleção oportunista na região de alta SNR transmitida. Dessa maneira, o uso do critério PRS-1H nessa região é mais eficiente em termos do *feedback overhead* requerido.

## APÊNDICE I

### DEMONSTRAÇÃO DA PROPOSIÇÃO 1

Para o critério ORS, a probabilidade de *outage* em (12) pode ser reescrita como

$$\begin{aligned}
 P_{out} &= \Pr \left[ \min \left( \frac{\gamma_{SR_1}}{1 + \gamma_{SI_1}}, \gamma_{R_1D} + \gamma_{SD} \right) < \gamma_{th}, \right. \\
 &\quad \left. \dots, \min \left( \frac{\gamma_{SR_N}}{1 + \gamma_{SI_N}}, \gamma_{R_ND} + \gamma_{SD} \right) < \gamma_{th} \right] \\
 &\stackrel{(a)}{=} \int_0^\infty \int_0^\infty \prod_{n=1}^N \Pr \left[ \min \left( \frac{\gamma_I \eta_1 g_{SR_n}}{x \left( 1 + \frac{\gamma_I \eta_2 g_{SI_n}}{g_{R_nP}} \right)}, \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \frac{\gamma_I \eta_2 g_{R_nD}}{g_{R_nP}} + \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x} \right) < \gamma_{th} \mid n^* = n \right] f_{g_{SD}}(z) f_{g_{SP}}(x) dz dx, \quad (17)
 \end{aligned}$$

em que o passo (a) é obtido ao substituir as expressões das SNRs recebidas instantâneas para o regime assintótico de alta SNR e ao descondicionar a probabilidade de *outage* do sistema em relação aos ganhos de canal variáveis  $g_{SP}$  e  $g_{SD}$ , a fim de tornar o evento conjunto em um produto, ao passo que o *relay* escolhido ( $n^* = n$ ) é obtido por meio de (9). No passo

(b), separa-se o operador  $\min(\cdot, \cdot)$  [9, cap. 6] e isolam-se os ganhos de canal variáveis  $g_{SR_n}$  e  $g_{R_nD}$ , tal que,

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}} & \stackrel{(b)}{=} \int_0^\infty \int_0^\infty \prod_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \left[ \Pr \left( g_{SR_n} < \frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I \eta_1} \right) \right. \\
 & \quad \times \left( 1 + \frac{\gamma_I \eta_2 w}{y_n} \right) \Big|_{n^* = n} \\
 & \quad + \Pr \left( g_{R_nD} < \frac{y_n (\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I \eta_2} \Big|_{n^* = n} \right) \\
 & \quad - \Pr \left( g_{SR_n} < \frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I \eta_1} \left( 1 + \frac{\gamma_I \eta_2 w}{y_n} \right) \Big|_{n^* = n} \right) \\
 & \quad \times \Pr \left( g_{R_nD} < \frac{y_n (\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I \eta_2} \Big|_{n^* = n} \right) \\
 & \quad \times f_{g_{SI_n}}(w) f_{g_{R_nP}}(y_n) dw dy_n \Big] f_{g_{SD}}(z) f_{g_{SP}}(x) dz dx. \quad (18)
 \end{aligned}$$

De (18), observa-se que, para os termos  $A_1$  e  $A_2$ , o evento de *outage* pode ocorrer para  $z < x\gamma_{th}/\eta_1\gamma_I$ , sendo que para valores de  $z$  maiores que este, o ganho do canal  $g_{R_nD}$  teria que ser menor que uma grandeza negativa, o que é improvável, já que o mesmo é sempre positivo. Portanto, tem-se que  $\Pr(g_{R_nD} < y_n(\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})/\gamma_I(1 - \eta_1)) = 0$ . Logo, a expressão da probabilidade de *outage* pode ser escrita como

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}} & = \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I} \prod_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \left[ F_{g_{SR_n}} \left( \frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I \eta_1} \left( 1 + \frac{\gamma_I \eta_2 w}{y_n} \right) \right) \right. \\
 & \quad + F_{g_{R_nD}} \left( \frac{y_n (\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I \eta_2} \right) - F_{g_{SR_n}} \left( \frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I \eta_1} \left( 1 + \frac{\gamma_I \eta_2 w}{y_n} \right) \right) \\
 & \quad \times F_{g_{R_nD}} \left( \frac{y_n (\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I \eta_2} \right) f_{g_{SI_n}}(w) f_{g_{R_nP}}(y_n) dw dy_n \Big] \\
 & \quad \times f_{g_{SD}}(z) f_{g_{SP}}(x) dz dx \\
 & + \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I} \left[ \prod_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty F_{g_{SR_n}} \left( \frac{x\gamma_{th}}{\gamma_I \eta_1} \left( 1 + \frac{\gamma_I \eta_2 w}{y_n} \right) \right) \right. \\
 & \quad \times f_{g_{SI_n}}(w) f_{g_{R_nP}}(y_n) dw dy_n \Big] f_{g_{SD}}(z) f_{g_{SP}}(x) dz dx. \quad (19)
 \end{aligned}$$

Assumindo que os coeficientes de canal são i.i.d., os produtórios em (19) podem ser expressos como potência de seus fatores, já que as variáveis aleatórias que representam cada canal podem ser consideradas instâncias independentes de uma mesma distribuição e a expressão em (13) pode ser obtida.

## APÊNDICE II

### DEMONSTRAÇÃO DA PROPOSIÇÃO 2

Para o critério PRS-1H, a probabilidade de *outage* em (12) pode ser reescrita como

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}} & \stackrel{(c)}{=} \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \Pr \left[ \min \left( \gamma_{R_{1,n}}, \frac{\gamma_I \eta_2 g_{R_nD}}{y_n} + \frac{\gamma_I \eta_1 g_{SD}}{x} \right) < \gamma_{th} \Big|_{n^* = n} \right] \\
 & \quad \times \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^{N-1} \Pr \left( \gamma_{R_{1,i}} < \gamma_{R_{1,n}} \right) f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) dy_n dx, \quad (20)
 \end{aligned}$$

em que o passo (c) é obtido tal como o passo (a), porém, ao descondicionar os ganhos de canal variáveis  $g_{SP}$  e  $g_{R_nP}$  e ao aplicar o Teorema da Probabilidade Total [9, cap. 2].

A variável  $\gamma_{R_{1,n}}$  denota a SINR recebida instantânea dos enlaces de primeiro salto. De acordo com (10), o  $n$ -ésimo *relay* escolhido ( $n^* = n$ ) é aquele que apresenta a maior SINR recebida nos enlaces do primeiro salto, em comparação com os outros *relays* disponíveis (denotados com o subíndice  $i$ ). Assim, expandindo o operador  $\min(\cdot, \cdot)$  e utilizando as considerações feitas para a limitação de intervalos do ganho de canal variável  $g_{R_nD}$  em (18), a probabilidade de *outage* pode ser reescrita como

$$\begin{aligned}
 P_{\text{out}} & = \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \left[ F_{\gamma_{R_{1,n}}}(\gamma_{th}) \right] \left[ \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^{N-1} \int_0^\infty F_{\gamma_{R_{1,i}}}(u) f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right] \\
 & \quad \times f_{\gamma_{R_{1,n}}}(u) f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) du dy_n dx \\
 & + \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I} \int_0^\infty \left[ F_{g_{R_nD}} \left( \frac{y_n (\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I \eta_2} \right) \right] \\
 & \quad \times \left[ \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^{N-1} \int_0^\infty F_{\gamma_{R_{1,i}}}(u) f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right] \\
 & \quad \times f_{\gamma_{R_{1,n}}}(u) f_{g_{SD}}(z) f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) du dz dy_n dx \\
 & - \sum_{n=1}^N \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^\infty \frac{x\gamma_{th}}{\eta_1\gamma_I} \int_0^\infty \left[ F_{\gamma_{R_{1,n}}}(\gamma_{th}) F_{g_{R_nD}} \left( \frac{y_n (\gamma_{th} - \frac{\gamma_I \eta_1 z}{x})}{\gamma_I \eta_2} \right) \right] \\
 & \quad \times \left[ \prod_{\substack{i=1 \\ i \neq n}}^{N-1} \int_0^\infty F_{\gamma_{R_{1,i}}}(u) f_{g_{R_iP}}(y_i) dy_i \right] \\
 & \quad \times f_{\gamma_{R_{1,n}}}(u) f_{g_{SD}}(z) f_{g_{R_nP}}(y_n) f_{g_{SP}}(x) du dz dy_n dx. \quad (21)
 \end{aligned}$$

Assumindo que os coeficientes de canal são i.i.d., os produtórios e somatórios em (21) podem ser expressos como potência e multiplicação de seus fatores, respectivamente, obtendo assim a expressão de *outage* em (14).

## REFERÊNCIAS

- [1] A. Goldsmith, S. A. 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, May 2009.
- [2] Y. Yang, H. Hu, J. Xu, and G. Mao, "Relay technologies for WiMAX and LTE-Advanced mobile systems," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 47, no. 10, pp. 100–105, Oct. 2009.
- [3] D. Kim, H. Lee, and D. Hong, "A survey of in-band full-duplex transmission: From the perspective of phy and mac layers," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 17, no. 4, pp. 2017–2046, Fourthquarter 2015.
- [4] E. E. B. Olivo, D. P. M. Osorio, H. Alves, J. C. S. S. Filho, and M. Latva-aho, "An adaptive transmission scheme for cognitive decode-and-forward relaying networks: Half duplex, full duplex, or no cooperation," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 8, pp. 5586–5602, Aug. 2016.
- [5] B. Zhong and Z. Zhang, "Opportunistic two-way full-duplex relay selection in underlay cognitive networks," *IEEE Systems Journal*, vol. 12, no. 1, pp. 725–734, March 2018.
- [6] S. Poor and A. V. Babu, "Outage performance comparison of dual-hop full duplex underlay cognitive relay networks," *Wireless Pers. Commun.*, Feb. 2019. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11277-019-06207-2>.
- [7] D. P. Mucin, E. E. B. Olivo and D. P. M. Osorio, "Esquemas de seleção de relay para redes cooperativas-cognitivas full duplex sob o protocolo decodifica-e-encaminha," in *Proc. XXXVI Brazilian Telecommunications and Signal Processing Symposium (SBRT'18)*, Campina Grande, PB, Brazil, Sep. 2018.
- [8] A. Goldsmith, *Wireless Communications*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
- [9] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2002.