

# Redes Cooperativas Cognitivas Multi-Usuário com Compartilhamento Espectral

Francisco Rafael Vasconcelos Guimarães, Daniel Benevides da Costa e Charles Casimiro Cavalcante

**Resumo**— Neste artigo, o desempenho de *outage* de redes cooperativas cognitivas com múltiplos *relays* amplifica-e-encaminha (AF) é investigado. Em nossa análise, assume-se que a rede secundária é composta por um nó fonte que comunica-se com um dentre  $L$  nós destinos através de um enlace direto e através de um dentre  $N$  nós *relays*. O nó destino secundário selecionado emprega uma técnica de combinação por seleção para selecionar o melhor *link* (direto ou auxiliar) a partir da fonte secundária. Considerando um ambiente com compartilhamento espectral, tem-se que a comunicação secundária é realizada levando em consideração uma restrição de interferência, na qual a potência de transmissão é governada pela interferência no receptor primário bem como pela máxima potência de transmissão dos respectivos nós secundários. Uma expressão em forma fechada para a probabilidade de *outage* é obtida e validada através de simulações Monte Carlo. Além disso, uma análise assintótica é realizada, revelando que a ordem de diversidade do sistema não é afetada pela interferência, sendo igual a  $L + N$ .

**Palavras-Chave**— Análise assintótica, compartilhamento espectral, probabilidade de *outage*, redes cooperativas cognitivas.

**Abstract**— In this paper, the outage performance of cooperative cognitive networks with multiple relays amplify-and-forward (AF) is investigated. In our analysis, it is assumed that the secondary network is composed by one source node that communicates with one out of  $L$  destinations through a direct link and also via the help of one out of  $N$  AF relays. The selected secondary destination employs a selection combining technique for choosing the best link (direct or dual-hop link) from the secondary source. Considering an underlay spectrum sharing approach, the secondary communication is performed taking into account an interference constraint, where the overall transmit power is governed by the interference at the primary receiver as well as by the maximum transmission power available at the respective nodes. A closed-form expression for the outage probability is derived and validated by Monte Carlo simulations. Also, an asymptotic analysis is carried out and reveals that the diversity order of the considered system is not affected by the interference, and equals to  $L + N$ .

**Keywords**— Asymptotic analysis, spectrum sharing, outage probability, cooperative cognitive networks.

## I. INTRODUÇÃO

No começo da última década, diversidade cooperativa foi proposta [1], [2] com o intuito de emular um arranjo físico de múltiplas antenas através do processamento e transmissão distribuídos da informação, propiciando assim que dispositivos de uma única antena explorassem os benefícios da diversidade espacial. Rádio-cognitivo, por sua vez, surgiu como uma técnica promissora [3] para o uso mais eficiente do espectro de frequência. Em particular, em sistemas cognitivos com compartilhamento espectral [4], os usuários não-licenciados (chamados de usuários secundários) são permitidos

a acessarem o espectro inicialmente alocado para os usuários licenciados (chamados de usuários primários) de tal forma que a interferência gerada pelo sistema secundário no receptor primário permaneça abaixo de um limite predefinido. Ao longo dos últimos anos, vários trabalhos investigaram o uso da diversidade cooperativa em sistemas rádio-cognitivo com compartilhamento espectral, e estes trabalhos serão descritos brevemente a seguir.

Em [5], considerando uma fonte secundária, um *relay* secundário, um destino secundário e um receptor primário, o desempenho de *outage* de redes cooperativas cognitivas (RCCs) com compartilhamento espectral (CE) e sujeita a desvanecimento Nakagami- $m$ , foi estudado, onde mostrou-se que o limiar de interferência resulta em um fenômeno chamado saturação da probabilidade de *outage*. Em [6], assumindo desvanecimento Rayleigh, uma RCC com CE constituída por uma fonte secundária, múltiplos *relays* secundários, um destino secundário e um receptor primário, foi investigada onde um critério de seleção de *relay* apropriado foi empregado. Seguindo uma abordagem diferente, os autores em [7] assumiram a presença de um *link* direto entre a fonte SU e o destino SU. Uma técnica de combinação por seleção (SC) foi utilizada no destino secundário com o intuito de escolher o melhor enlace (direto ou via *relay*) proveniente da fonte. Esse trabalho foi estendido em [8] para desvanecimento Nakagami- $m$ , enquanto que em [9] o desempenho de *outage* de RCCs com múltiplos *relays* secundários e a presença do enlace direto foi analisado.

Neste artigo, diferentemente dos trabalhos anteriores, o desempenho de *outage* de RCCs com múltiplos *relays* amplifica-e-encaminha (AF) é investigado. Em nossa análise, assume-se que a rede secundária é composta por um nó fonte que comunica-se com um dentre  $L$  nós destinos através de um enlace direto e através de um dentre  $N$  nós *relays*. Considera-se que a fonte tem linha de visada com todos os nós destinos. Um esquema de seleção de nós eficiente e de baixa complexidade é proposto. Explicando brevemente, a fonte secundária primeiro seleciona o melhor nó destino secundário baseado na qualidade dos *links* direto e, após isso, seleciona o melhor *relay* secundário que forneça o melhor caminho da fonte para o destino selecionado. Uma técnica do tipo SC é empregada no terminal destino selecionado para selecionar o melhor *link* (direto ou auxiliar) a partir da fonte secundária. Considerando um ambiente com compartilhamento espectral, a comunicação secundária é realizada levando em consideração uma restrição de interferência, na qual a potência de transmissão é governada pela interferência no receptor primário bem como pela máxima potência de transmissão dos respectivos nós secundários. Uma expressão em forma fechada para a probabilidade de *outage*

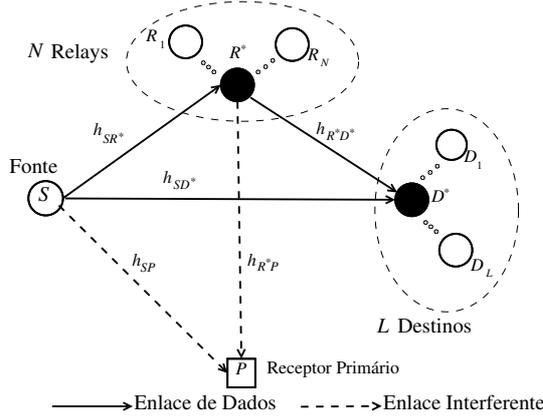


Fig. 1. Modelo sistêmico.

é obtida e validada através de simulações Monte Carlo. Além disso, uma análise assintótica é realizada, revelando que a ordem de diversidade do sistema não é afetada pela interferência, sendo igual a  $L + N$ . Por fim, observa-se que a restrição na potência dos nós secundários provoca um fenômeno de saturação na probabilidade de *outage*, similar ao observado em [5].

Ao longo deste artigo,  $f_Z(\cdot)$  e  $F_Z(\cdot)$  denotam, respectivamente, a função densidade de probabilidade (PDF) e a função de distribuição acumulada (CDF) de uma variável aleatória (VA) arbitrária  $Z$ , e  $E[\cdot]$  denota esperança estatística.

## II. MODELO SISTÊMICO E DESCRIÇÃO DO ESQUEMA DE COMUNICAÇÃO

Considere uma RCC composta por uma fonte secundária  $S$ ,  $N$  relays secundários  $R_n$  ( $n = 1, \dots, N$ ),  $L$  nós destinos secundários  $D_l$  ( $l = 1, \dots, L$ ) e um receptor primário  $P$ , como mostrado na Fig. 1. O transmissor primário não é levado em consideração uma vez que o trabalho foca na comunicação da rede secundária. Todos os nós são equipados com apenas uma única antena e operam no modo *half-duplex*. Seja  $I$  a máxima interferência tolerável no receptor primário e,  $P_s$  e  $P_{R_n}$  as máximas potências de transmissão da fonte secundária e do  $n$ -ésimo relay secundário, respectivamente. Os termos de ruído são do tipo AWGN (*additive white Gaussian noise*) com densidade espectral de potência igual a  $N_0$ . Seja também  $h_{JK}$  e  $d_{JK}$  os coeficientes de canal e a distância entre dois nós  $J$  e  $K$ , respectivamente ( $J \in \{S, R_n\}$ ,  $K \in \{R_n, P, D_l\}$ ). Os canais estão sujeitos a desvanecimento Rayleigh em bloco, ou seja, durante cada processo de comunicação, o canal permanece constante. Considerando um ambiente de compartilhamento espectral, as potências de transmissão de  $S$  e  $R_n$  podem ser escritas, respectivamente, como

$$\bar{P}_S = \min\left(\frac{I}{|h_{SP}|^2}, P_s\right), \quad \bar{P}_{R_n} = \min\left(\frac{I}{|h_{R_n P}|^2}, P_{R_n}\right). \quad (1)$$

Focando na comunicação da rede secundária, um esquema de múltiplo acesso por divisão no tempo (TDMA) é empregado, sendo realizado em duas fases. Entretanto, antes do processo de comunicação iniciar, um esquema de seleção de nós eficiente e de baixa complexidade é realizado. Primeiramente, o

melhor destino secundário  $D^*$  é selecionado de acordo com a qualidade de canal do *link* direto, isto é,

$$D^* = \arg \max_l [\gamma_{SD_l}], \quad (2)$$

em que  $\gamma_{SD_l} = \bar{P}_S d_{SD_l}^{-\alpha} |h_{SD_l}|^2 / N_0$ , com  $\alpha$  sendo o coeficiente de perda de percurso. Após o destino secundário ser selecionado, o processo de seleção de *relay* é realizado de forma que o *relay* escolhido,  $R^*$ , maximize a relação sinal-ruído (SNR) fim-a-fim da fonte secundária para o destino secundário escolhido, isto é,

$$R^* = \arg \max_n \left[ \frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D^*}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D^*}} \right]. \quad (3)$$

em que  $\gamma_{SR_n} = \bar{P}_S d_{SR_n}^{-\alpha} |h_{SR_n}|^2 / N_0$  e  $\gamma_{R_n D^*} = \bar{P}_{R_n} d_{R_n D^*}^{-\alpha} |h_{R_n D^*}|^2 / N_0$ .

Após a seleção de nós, o processo de comunicação da rede secundária inicia. Como mencionado anteriormente, o processo de comunicação consiste de duas fases: na fase I, a fonte secundária envia a sua informação para  $R^*$  e  $D^*$  com potência de transmissão igual  $\bar{P}_{R_n}$ . Na fase II, o *relay* amplifica o sinal recebido da fonte por um fator  $G$  e o encaminha para o destino selecionado. Como o protocolo utilizado é o AF de ganho variável, o fator  $G$  é determinado pelas estatísticas instantâneas do enlace fonte-*relay*. Após a segunda fase, o destino selecionará o caminho com a maior SNR instantânea, utilizando a estratégia SC. Portanto, a SNR fim-a-fim pode ser escrita como

$$\gamma_{\text{end}} = \max \left[ \max_l [\gamma_{SD_l}], \max_n \left[ \frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D^*}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D^*}} \right] \right]. \quad (4)$$

Em (4), perceba que os dois termos dentro do operador  $\max[\cdot, \cdot]$  não são estatisticamente independentes devido a presença da VA  $|h_{SP}|^2$ .

## III. ANÁLISE DA PROBABILIDADE DE OUTAGE

A probabilidade de *outage* é definida como a probabilidade da SNR fim-a-fim instantânea,  $\gamma_{\text{end}}$ , estar abaixo de um certo limiar,  $\gamma_{\text{th}}$ . Devido ao termo comum,  $|h_{SP}|^2$ , mencionado acima, a probabilidade de *outage* condicional pode ser escrita da seguinte forma

$$\Pr(\gamma_{\text{end}}^{AF} < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}) = \Pr \left( \overbrace{\max_l [\gamma_{SD_l}] < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}}^{\theta} \right) \times \Pr \left( \underbrace{\max_n \left[ \frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D^*}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D^*}} \right] < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}}_{\Psi} \right). \quad (5)$$

Como todos os enlaces de  $S$  para  $D_l$  são estatisticamente independentes, e os ganhos de canal são exponencialmente distribuídos,  $\theta$  pode ser escrito como

$$\begin{aligned} \theta &= \prod_{l=1}^L \Pr(\gamma_{SD_l} < \gamma_{\text{th}} | h_{SP}) = \prod_{l=1}^L F_{\gamma_{SD_l}}(\gamma_{\text{th}} | h_{SP}) \\ &= \prod_{l=1}^L (1 - e^{-\gamma_{\text{th}} \beta_{SD_l}}), \end{aligned} \quad (6)$$

em que  $\beta_{SD_l} \triangleq 1/E[\gamma_{SD_l}]$ . Por sua vez, usando o Teorema da Probabilidade Total [10],  $\Psi$  em (5) pode ser escrito como

$$\begin{aligned} \Psi &= \Pr\left(\max_n \left[ \frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D_l}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D_l}} \right] < \gamma_{th} | h_{SP} \right) \\ &= \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \\ &\times \underbrace{\prod_{n=1}^N \Pr\left(\left[ \frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D_l}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D_l}} \right] < \gamma_{th} | h_{SP} \right)}_{\Theta}, \end{aligned} \quad (7)$$

Agora, utilizando os resultados obtidos em [11], segue que

$$\begin{aligned} \Pr(D^* = D_l) &= 1 + \sum_{k=1}^{L-1} \sum_{\substack{A_k \subseteq \{1,2,\dots,l-1,l+1,\dots,L\} \\ |A_k|=k}} (-1)^k \\ &\times \frac{\beta_{SD_l}}{\beta_{SD_l} + \sum_{j \in A_k} \beta_{SD_j}}. \end{aligned} \quad (8)$$

tal que  $\Theta$  pode ser determinado como

$$\begin{aligned} \Theta &= \int_0^\infty \Pr\left(\max_n \left[ \frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D_l}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D_l}} \right] < \gamma_{th} | h_{SP} \right) \\ &\times f_{\gamma_{SR_n}}(\gamma_{SR_n}) d\gamma_{SR_n} \\ &= 1 - \beta_{SR_n} e^{-\gamma_{th}(\beta_{SR_n} + \beta_{R_n D_l})} 2\sqrt{\frac{z}{\beta_{SR_n}}} K_1\left(2\sqrt{z\beta_{SR_n}}\right), \end{aligned} \quad (9)$$

em que  $\beta_{SR_n} \triangleq 1/E[\gamma_{SR_n}]$ ,  $\beta_{R_n D_l} \triangleq 1/E[\gamma_{R_n D_l}]$ ,  $z = \gamma_{th}(\gamma_{th} + 1)\beta_{R_n D_l}$ , e  $K_1(\cdot)$  é a função Bessel modificada de segundo tipo de primeira ordem [12, eq. (8.432.6)]. Agora, seja  $X = |h_{SP}|^2$ ,  $Y = |h_{R_n P}|^2$ ,  $\gamma_{SD^*} = \max_l[\gamma_{SD_l}]$ ,  $\gamma_{SR^*D^*} = \max_n[\min_l[\gamma_{SR_n}, \gamma_{R_n D^*}]]$ . Mostra-se que uma expressão geral para o cálculo da probabilidade de *outage* é obtida como

$$\begin{aligned} P_{out} &= \int_0^\infty \int_0^\infty F_{\gamma_{SD^*}}(\gamma_{th}|X) F_{\gamma_{SR^*D^*}}(\gamma_{th}|X, Y) \\ &\times f_X(x) f_Y(y) dx dy, \end{aligned} \quad (10)$$

em que  $F_{\gamma_{SD^*}}(\gamma_{th}|X) = \prod_{l=1}^L (1 - e^{-\gamma_{th} \beta_{SD_l}})$  e

$F_{\gamma_{SR^*D^*}}(\gamma_{th}|X, Y) = \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \times \Theta$ . Sem perda de generalidade, seja  $P_{R_n} = P_S = Q$ . Observe que

$$\min\left(\frac{I}{\Lambda}, Q\right) = \begin{cases} Q, & \text{quando } \Lambda \leq I/Q, \\ I/\Lambda, & \text{quando } \Lambda > I/Q. \end{cases} \quad (11)$$

Assim, a probabilidade de *outage* pode ser expressa como a soma de quatro termos,  $P_{out} = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4$ , onde cada termo são mostrados no topo da próxima página. Fazendo as substituições apropriadas, mostra-se que

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \int_0^{I/Q} \int_0^{I/Q} \prod_{l=1}^L (1 - e^{-\gamma_{th} \beta_{SD_l}}) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \prod_{n=1}^N \\ &\left(1 - \beta_{SR_n}^Q e^{-\gamma_{th}(\beta_{SR_n}^Q + \beta_{R_n D_l}^Q)} 2\sqrt{\frac{z}{\beta_{SR_n}}} K_1\left(2\sqrt{z\beta_{SR_n}}\right)\right) \\ &\times \beta_{SP} e^{-x\beta_{SP}} \beta_{R_n P} e^{-y\beta_{R_n P}} dx dy, \end{aligned} \quad (16)$$

resultando em (17), apresentado na próxima página. Por sua vez,  $\xi_2$  pode ser expresso como

$$\begin{aligned} \xi_2 &= \int_0^{I/Q} \int_{I/Q}^\infty \prod_{l=1}^L (1 - e^{-\gamma_{th} \beta_{SD_l}^Q}) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \\ &\times \prod_{n=1}^N \left(1 - \beta_{SR_n}^Q e^{-\gamma_{th}(\beta_{SR_n}^Q + y\beta_{R_n D_l}^I)} 2\sqrt{\frac{z_I}{\beta_{SR_n}^Q}} K_1\left(2\sqrt{z_I \beta_{SR_n}^Q}\right)\right) \\ &\times \beta_{SP} e^{-x\beta_{SP}} \beta_{R_n P} e^{-y\beta_{R_n P}} dx dy, \end{aligned} \quad (18)$$

em que  $z_I = y\gamma_{th}(\gamma_{th} + 1)\beta_{R_n D_l}^I$ . Devido a dificuldade de se encontrar uma expressão em forma fechada para (18),  $K_1(\zeta)$  será aproximado por  $1/\zeta$  [12, eq. (9.6.9)] já que o argumento da função Bessel é em geral pequeno. Na sequência, é assumido que os enlaces de  $S$  para  $R_n$  e, de  $S$  e  $R_n$  para  $D$  são independentes e identicamente distribuídos (i.i.d). Entretanto, vale salientar que os canais pertencentes a diferentes saltos possuem condições de desvanecimento distintas umas das outras. Logo, (18) pode ser aproximado por

$$\begin{aligned} \xi_2 &\approx \int_0^{I/Q} \int_{I/Q}^\infty \prod_{l=1}^L (1 - e^{-\gamma_{th} \beta_{SD_l}^Q}) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \\ &\times \prod_{n=1}^N \left(1 - e^{-\gamma_{th}(\beta_{SR_n}^Q + y\beta_{R_n D_l}^I)}\right) \\ &\times \beta_{SP} e^{-x\beta_{SP}} \beta_{R_n P} e^{-y\beta_{R_n P}} dx dy, \end{aligned} \quad (19)$$

resultando em

$$\begin{aligned} \xi_2 &\approx \prod_{l=1}^L (1 - e^{-\gamma_{th} \beta_{SD_l}^Q}) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) (1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{SP}}) \beta_{R_n P} \\ &\times \sum_{n=0}^N \binom{N}{n} (-1)^n \exp\left(-\gamma_{th} n \left(\beta_{SR_n}^Q + \frac{I}{Q} \beta_{R_n D_l}^I\right)\right) \\ &\times \frac{e^{-\frac{I}{Q} \beta_{R_n P}}}{\gamma_{th} n \beta_{R_n D_l}^I + \beta_{R_n P}}. \end{aligned} \quad (20)$$

Para  $\xi_3$  e  $\xi_4$ , pode-se usar a mesma abordagem utilizada em  $\xi_2$ , ou seja, considerando os *links* i.i.d. e utilizando a aproximação [12, eq. (9.6.9)], chega-se a forma aproximada  $\xi_3$ , dado em (21), e

$$\begin{aligned} \xi_4 &\approx \sum_{m=0}^L \binom{L}{m} (-1)^m \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \sum_{n=0}^N \binom{N}{n} (-1)^n \beta_{SP} \\ &\times \beta_{R_n P} \exp\left(-\gamma_{th} \frac{I}{Q} (m\beta_{SD_m}^I + n\beta_{SR_n}^I + n\beta_{R_n D_m}^I)\right) \\ &\times \frac{e^{-\frac{I}{Q}(\beta_{SP} + \beta_{R_n P})}}{[\gamma_{th}(m\beta_{SD_m}^I + n\beta_{SR_n}^I) + \beta_{SP}] [\gamma_{th} n \beta_{R_n D_m}^I + \beta_{R_n P}]}, \end{aligned} \quad (22)$$

em que  $\beta_{SR_n}^I \triangleq \frac{1}{E[I d_{SR_n}^{-\alpha} |h_{SR_n}|^2 / N_0]}$  e  $\beta_{SD_l}^I \triangleq \frac{1}{E[I d_{SD_l}^{-\alpha} |h_{SD_l}|^2 / N_0]}$ . Finalmente, substituindo (17), (20), (21), e (22) em  $P_{out} = \xi_1 + \xi_2 + \xi_3 + \xi_4$ , uma fórmula aproximada para a probabilidade de *outage* do protocolo AF de ganho variável é obtida.

$$\xi_1 = \int_0^{I/Q} \int_0^{I/Q} F_{\gamma_{SD^*}}(\gamma_{th}|X) F_{\gamma_{SR^*D^*}}(\gamma_{th}|X, Y) f_X(x) f_Y(y) dx dy. \quad (12)$$

$$\xi_2 = \int_0^{I/Q} \int_{I/Q}^{\infty} F_{\gamma_{SD^*}}(\gamma_{th}|X) F_{\gamma_{SR^*D^*}}(\gamma_{th}|X, Y) f_X(x) f_Y(y) dx dy. \quad (13)$$

$$\xi_3 = \int_{I/Q}^{\infty} \int_0^{I/Q} F_{\gamma_{SD^*}}(\gamma_{th}|X) F_{\gamma_{SR^*D^*}}(\gamma_{th}|X, Y) f_X(x) f_Y(y) dx dy. \quad (14)$$

$$\xi_4 = \int_{I/Q}^{\infty} \int_{I/Q}^{\infty} F_{\gamma_{SD^*}}(\gamma_{th}|X) F_{\gamma_{SR^*D^*}}(\gamma_{th}|X, Y) f_X(x) f_Y(y) dx dy. \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \xi_1 &= \prod_{l=1}^L \left(1 - e^{-\gamma_{th} \beta_{SD_l}^Q}\right) \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) (1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{SP}}) (1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{R_n P}}) \\ &\times \prod_{n=1}^N \left(1 - \beta_{SR_n}^Q e^{-\gamma_{th} (\beta_{SR_n}^Q + \beta_{R_n D_l}^Q)} 2 \sqrt{\frac{\gamma_{th} (\gamma_{th} + 1) \beta_{R_n D_l}^Q}{\beta_{SR_n}^Q}} K_1 \left(2 \sqrt{\gamma_{th} (\gamma_{th} + 1) \beta_{R_n D_l}^Q \beta_{SR_n}^Q}\right)\right). \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \xi_3 &\approx \sum_{m=0}^L \binom{L}{m} (-1)^m \sum_{l=1}^L \Pr(D^* = D_l) \sum_{n=0}^N \binom{N}{n} (-1)^n \beta_{SP} (1 - e^{-\frac{I}{Q} \beta_{R_n P}}) e^{(-\frac{I}{Q} \beta_{SP})} \\ &\times \exp\left(-\gamma_{th} \left(m \frac{I}{Q} \beta_{SD_m}^I + n \left(\frac{I}{Q} \beta_{SR_n}^I + \beta_{R_n D_m}^Q\right)\right)\right) \frac{1}{\gamma_{th} (m \beta_{SD_m}^I + n \beta_{SR_n}^I) + \beta_{SP}}. \end{aligned} \quad (21)$$

#### A. Análise Assintótica

Com o intuito de determinar a ordem de diversidade do sistema em estudo, uma análise assintótica será agora realizada. Seja  $\bar{\gamma} \triangleq 1/N_0$  a SNR do sistema e  $I/Q = \mu$ , sendo  $\mu$  uma constante positiva. Quando  $\bar{\gamma} \rightarrow \infty$ , observa-se que  $\beta_{SP} \gg \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}$  e  $\beta_{R_n P} \gg \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}$ . Utilizando a expansão em série de MacLaurin para funções exponenciais, ou seja,  $e^{-\bar{\gamma}x} \simeq 1 - \bar{\gamma}x$ , aproximando o valor de  $K_1(\zeta)$  por  $1/\zeta$  e após algumas manipulações algébricas, chega-se às seguintes expressões assintóticas:

$$\begin{aligned} P_{out}^{\xi_1} &\simeq \prod_{l=1}^L \left(\gamma_{th} \beta_{SD_l}^Q\right) \Pr(D^* = D_l) \mu^2 \beta_{SP} \beta_{R_n P} \\ &\times \prod_{n=1}^N \left[\gamma_{th} \left(\beta_{SR_n}^Q + \beta_{R_n D_l}^Q\right)\right] \propto \left(\frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{L+N}, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} P_{out}^{\xi_2} &\simeq \prod_{l=1}^L \left(\gamma_{th} \beta_{SD_l}^Q\right) \Pr(D^* = D_l) \mu \beta_{SP} (1 - \mu \beta_{R_n P}) \\ &\times \prod_{n=1}^N \left[\gamma_{th} \left(\beta_{SR_n}^Q + \mu \beta_{R_n D_l}^I\right)\right] \propto \left(\frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{L+N}, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} P_{out}^{\xi_3} &\simeq \prod_{l=1}^L \left(\mu \gamma_{th} \beta_{SD_l}^I\right) \Pr(D^* = D_l) \mu \beta_{R_n P} (1 - \mu \beta_{SP}) \\ &\times \prod_{n=1}^N \left[\gamma_{th} \left(\mu \beta_{SR_n}^I + \beta_{R_n D_l}^Q\right)\right] \propto \left(\frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{L+N}, \end{aligned} \quad (25)$$

$$\begin{aligned} P_{out}^{\xi_4} &\simeq \prod_{l=1}^L \left(\mu \gamma_{th} \beta_{SD_l}^I\right) \Pr(D^* = D_l) (1 - \mu \beta_{SP} - \mu \beta_{R_n P}) \\ &\times \prod_{n=1}^N \left[\mu \gamma_{th} \left(\beta_{SR_n}^I + \beta_{R_n D_l}^I\right)\right] \propto \left(\frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{L+N}. \end{aligned} \quad (26)$$

Analisando as equações acima, percebe-se que o sistema possui ordem de diversidade igual a  $N + L$ , sendo não afetado pela restrição de interferência.

#### IV. RESULTADOS NUMÉRICOS E SIMULAÇÕES

Com o objetivo de avaliar o desempenho da rede cooperativa cognitiva multi-usuário considerada, alguns gráficos serão agora apresentados. Assumir-se-á que a média estatística dos ganhos de canal é determinada pela distância entre os nós. Além disso, sem perda de generalidade, o limiar  $\gamma_{th}$  e o coeficiente de perda de percurso  $\alpha$  escolhidos são 3 dB e 4, respectivamente. De forma similar a [11], a RCC é gerada em um plano 2-D em que a fonte secundária está localizada em (0, 0), os nós destinos são posicionados em (1, 0), os relays são colocados em (0.5, 0), e o receptor primário está localizado em (0, 1). Como será observado, uma excelente concordância entre os resultados analíticos e simulados é obtida.

A Fig. 2 descreve a probabilidade de *outage* versus a SNR do sistema,  $\bar{\gamma}$ , para três diferentes combinações de relays e destinos secundários. Perceba que as curvas assintóticas estão muito próximas das curvas simuladas em regiões de alta SNR, o que confirma a coerência da análise feita. Nota-se também que a ordem de diversidade é dada por  $L + N$ , como esperado.

Para uma análise mais detalhada, a Fig. 3 mostra a probabilidade de *outage* para casos em que a ordem de diversidade

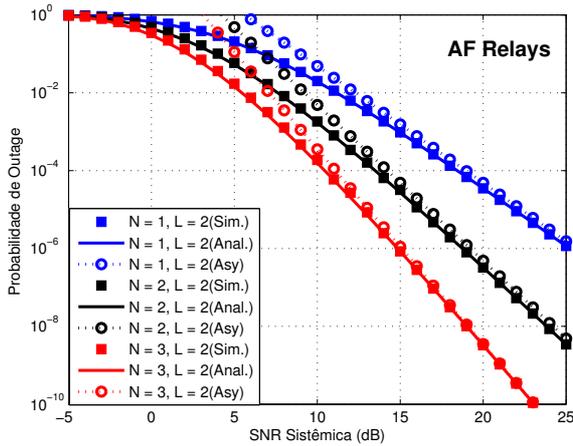


Fig. 2. Probabilidade de *outage* e comportamento assintótico para diferentes combinações de *relays* e destinos secundários ( $I = Q = 0.5$ ).

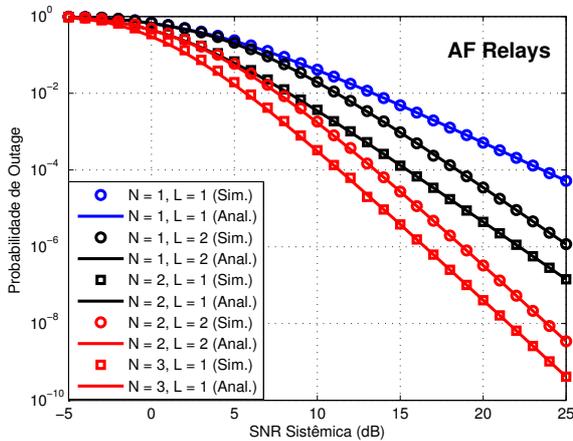


Fig. 3. Probabilidade de *outage* para diferentes combinações de *relays* e destinos secundários ( $I = Q = 0.5$ ).

é mantida a mesma. Por exemplo, considerando a ordem de diversidade igual a 4, o caso  $\{N = 3, L = 1\}$  apresenta um melhor desempenho do que o caso quando  $\{N = 2, L = 2\}$ . Em outras palavras, para a mesma ordem de diversidade, o desempenho de *outage* é melhor quando o número de *relays* secundários ultrapassa o número de destinos secundários. Isto mostra que o uso da diversidade cooperativa é mais benéfico para o desempenho sistêmico do que a diversidade multiusuário, o que motiva o seu uso.

Fig. 4 mostra o impacto do limiar de interferência na probabilidade de *outage* do sistema assumindo  $N = L = 2$ . Percebe-se que, devido a restrição de interferência, a probabilidade de *outage* do sistema satura por atingir o teto para a potência de transmissão. Além disso, ao passo que  $I$  se torna maior, o desempenho sistêmico melhora, se aproximando do caso sem interferência.

## V. CONCLUSÕES

Neste artigo, o desempenho de redes cooperativas cognitivas multiusuário com compartilhamento espectral foi investigado.

Empregando um esquema de seleção de nós eficiente e um

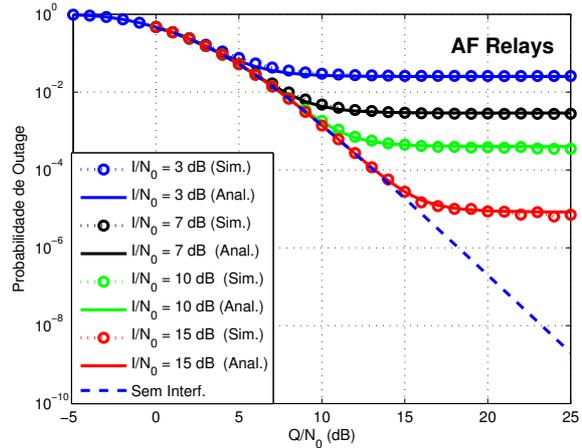


Fig. 4. Impacto da restrição de interferência no comportamento do sistema.

receptor do tipo SC no destino secundário selecionado, uma expressão aproximada e em forma fechada para a probabilidade de *outage* foi encontrada e validada através de simulações Monte Carlo. Uma análise assintótica foi realizada, revelando que a interferência imposta pela rede primária não influencia na ordem de diversidade do sistema considerado. Os resultados encontrados mostraram-se ser simples e computacionalmente eficientes, sendo de suma importância para o desenvolvimento futuro de redes cooperativas cognitivas multiusuário com compartilhamento espectral.

## REFERÊNCIAS

- [1] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, "User cooperation diversity - part I: system description," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 11, pp. 1927–1938, Nov. 2003.
- [2] 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, Dec. 2004.
- [3] J. Mitola III and G. Q. Maguire, Jr., "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Pers. Commun*, vol. 6, no. 4, pp. 13–18, 1999.
- [4] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 2, Feb. 2007.
- [5] C. Zhong, T. Ratnarajah and K.-K. Wong, "Outage analysis of decode-and-forward cognitive dual-hop systems with the interference constraint in Nakagami- $m$  fading channels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 6, pp. 2875–2879, Jul. 2011.
- [6] J. Lee, H. Wang, J. G. Andrews and D. Hong, "Outage probability of cognitive relay networks with interference constraints," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 2, pp. 390–395, Feb. 2011.
- [7] T. Q. Duong, V. N. Q. Bao, G. C. Alexandropoulos and H. -J. Zepernick, "Cooperative spectrum sharing networks with AF relay and selection diversity," *IET Electron. Lett.*, vol. 47, no. 20, Sep. 2011.
- [8] T. Q. Doung, D. B. da Costa, M. Elkashlan and V. N. Q. Bao, "Cognitive amplify-and-forward relay networks over Nakagami- $m$  fading," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 5, pp. 2368–2374, Jun. 2012.
- [9] L. Luo, P. Zhang, G. Zhang, and J. Qin, "Outage performance for cognitive relay networks with underlay spectrum sharing," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 7, pp. 710–712, Jul. 2011.
- [10] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. McGraw-Hill, 2002, 4th Ed.
- [11] M. A. B. de Melo and D. B. da Costa, "An efficient relay-destination selection scheme for multiuser multirelay downlink cooperative networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 5, pp. 2354–2360, Jun. 2012.
- [12] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, New York, 1972.