

# Seleção de *Relay* em Sistemas Cooperativos Cognitivos com Múltiplos Usuários Primários

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

**Resumo**— O desempenho de sistemas cooperativos cognitivos na presença de múltiplos receptores primários é investigado. Assumindo um ambiente com compartilhamento espectral, no qual a rede secundária é composta por uma fonte,  $N$  relays amplifica-e-encaminha e um nó destino, uma estratégia de seleção de *relay* é proposta de forma a maximizar a relação sinal-ruído fim-a-fim e, simultaneamente, satisfazer as restrições de interferência impostas pelos  $M$  receptores primários. Após a seleção de *relay* ser realizada, o nó destino seleciona o melhor caminho (*link* direto ou *link* via *relay*) proveniente da fonte utilizando um combinador por seleção. Uma expressão aproximada e em forma fechada para a probabilidade de *outage* é encontrada, a partir da qual uma análise assintótica é realizada, revelando que a ordem de diversidade do esquema proposto iguala a  $N+1$ , o que mostra que a mesma não é afetada nem pelo número de receptores primários nem pelo limiar de interferência. Simulações Monte Carlo são apresentadas com o intuito de validar a presente análise.

**Palavras-Chave**— Análise assintótica, compartilhamento espectral, probabilidade de *outage*, sistemas cooperativos cognitivos.

**Abstract**— The performance of cooperative cognitive systems in the presence of multiple receivers is investigated. Assuming a spectrum sharing environment, in which the secondary network is composed by one source,  $N$  amplify-and-forward relays, and one destination, a relay selection strategy is proposed with the aim to maximize the end-to-end signal-to-noise ratio and, at the same time, to satisfy the interference constraints imposed by the  $M$  primary receivers. After performing the relay selection, the secondary destination chooses the best path (direct link or relaying link) by employing a selection combining scheme. An approximate, closed-form expression for the outage probability is derived, from which an asymptotic analysis is carried out, revealing that the system diversity order equals to  $N + 1$ , and showing that it is not affected neither by the number of primary receivers nor by the interference threshold. Monte Carlo simulations are presented to corroborate the proposed analysis.

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

## I. INTRODUÇÃO

Ao longo da última década, comunicações sem fio têm experimentado um considerável aumento na demanda de novos serviços e aplicações. A necessidade de uma alta taxa/confiabilidade e de uma alocação espectral eficiente aumentou o interesse em se desenvolver novas técnicas para lidar com essas novas exigências. Nesse sentido, duas técnicas promissoras, chamadas diversidade cooperativa [1] e rádio-cognitivo [2], foram propostas e, a partir delas, um grande número de estudos foram desenvolvidos. A ideia da diversidade cooperativa é emular, em um sistema constituído por dispositivos de uma única antena, um arranjo de antenas

virtuais através da transmissão e do processamento distribuído da informação, de forma que os mesmos benefícios obtidos em sistemas MIMO possam ser conseguidos em sistemas com dispositivos de uma única antena. Rádio-cognitivo, por sua vez, provê um uso mais eficiente do espectro de rádio, permitindo que usuários não-licenciados, chamados usuários secundários, utilizem parte do espectro inicialmente alocado para usuários licenciados, chamados de usuários primários. Este acesso ao espectro deve ser feito de tal forma que a comunicação primária não seja afetada, levando assim a um ajuste da potência de transmissão dos nós secundários de acordo com um limiar de interferência estabelecido pela rede primária. O uso simultâneo do mesmo espectro de frequência entre usuários primário e secundário é conhecido como compartilhamento espectral [3].

Vários trabalhos investigaram o uso da diversidade cooperativa em sistemas sem fio com compartilhamento espectral, e alguns destes serão brevemente discutidos na sequência. Em [4], considerando uma fonte secundária, um *relay* secundário, um destino secundário e um receptor primário, a análise de *outage* de sistemas cooperativos cognitivos com compartilhamento espectral (SCCCEs) foi realizada considerando a ausência de *link* direto entre a fonte e o terminal destino. A análise de [4] foi estendida em [5] para o caso de múltiplos *relays* secundários, onde uma técnica de seleção de *relay* apropriada foi proposta. Em [6], o desempenho de SCCCEs foi investigado assumindo a presença de *link* direto entre a fonte e o destino, onde neste último uma estratégia de combinação por seleção (SC) foi utilizada para selecionar o melhor caminho (enlace direto ou enlace via *relay*) entre a fonte e o destino. Este trabalho foi estendido em [7] para canais Nakagami- $m$ . Em [8], o desempenho de SCCCEs com múltiplos *relays* decodifica-e-encaminha foi examinado, porém o critério de seleção de *relay* adotado não levou em consideração a informação de estado do canal entre a fonte e os *relays*.

Neste artigo, diferentemente dos trabalhos anteriores, o desempenho de *outage* de SCCCEs composto por uma fonte secundária,  $N$  *relays* secundários amplifica-e-encaminha (AF), um destino secundário e  $M$  receptores primários, é investigado. Assume-se a existência do enlace direto entre a fonte e o destino. A potência de transmissão dos nós secundários é configurada de forma que a interferência que a rede secundária causa nos receptores primários fique abaixo de um dado limiar. Uma estratégia de seleção de *relay* é adotada na qual o *relay* selecionado será aquele que maximiza a relação sinal-ruído (SNR) fim-a-fim e, simultaneamente, satisfaz o limiar de interferência imposto pelos  $M$  receptores primários. Após a seleção de *relay* ser realizada, o nó destino seleciona o melhor caminho (*link* direto ou *link* via *relay*) proveniente da fonte

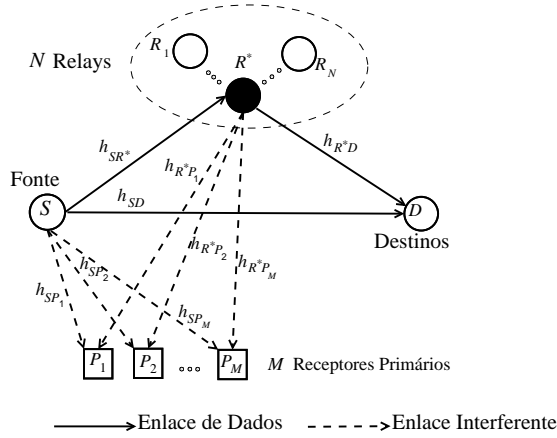


Fig. 1. Modelo sistêmico.

utilizando um combinador do tipo SC. Uma expressão aproximada e em forma fechada para a probabilidade de *outage* é encontrada, a partir da qual uma análise assintótica é realizada, revelando que a ordem de diversidade do esquema proposto é igual a  $N + 1$ , o que mostra que a mesma não é afetada nem pelo número de receptores primários nem pelo limiar de interferência. Simulações Monte Carlo são apresentadas com o intuito de validar a presente análise.

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 de uma variável aleatória (VA) arbitrária  $Z$ ,  $h_{AB}$  e  $d_{AB}$  simbolizam o coeficiente de canal e a distância entre dois nós arbitrários  $A$  e  $B$ , respectivamente,  $\Pr(\cdot)$  indica probabilidade e  $E[\cdot]$  denota média estatística.

## II. MODELOS SISTÊMICO E DE CANAL

Considere um SCCCE composto por uma fonte  $S$ ,  $N$  relays  $R_n$  ( $n = 1, \dots, N$ ), um destino  $D$  e  $M$  receptores primários  $P_m$  ( $m = 1, \dots, M$ ), como ilustrado na Fig. 1. Os transmissores primários não são levados em consideração uma vez que o foco deste artigo é a comunicação da rede secundária. Todos os nós são equipados com uma única antena e operam no modo *half-duplex*. É assumida a presença de linha de visada entre  $S$  e  $D$ . Os coeficientes de canal experimentam desvanecimento Rayleigh em bloco. Considera-se que todos os termos de ruído são AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) com densidade espectral de potência igual a  $N_0$ .

A SNR fim-a-fim via um relay arbitrário  $R_n$  pode ser expressa como  $\max_n \left[ \frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D}} \right]$ , em que  $\gamma_{SR_n} = W_S |h_{SR_n}|^2 / N_0$  e  $\gamma_{R_n D} = W_{R_n} |h_{R_n D}|^2 / N_0$  denotam a SNR instantânea dos enlaces do primeiro salto (i.e., da fonte para o  $n$ -ésimo relay) e do segundo salto (isto é, do  $n$ -ésimo relay para o destino), respectivamente,  $W_S$  e  $W_{R_n}$  são as potências de transmissão da fonte e do  $n$ -ésimo relay, sendo expressas como [4], [5]

$$\begin{aligned}
 W_S &\leq \min \left( \min_m \frac{Q_m}{|h_{SP_m}|^2}, W \right), \\
 W_{R_n} &\leq \min \left( \min_m \frac{Q_m}{|h_{R_n P_m}|^2}, W \right),
 \end{aligned} \quad (1)$$

em que  $W$  é a máxima potência de transmissão dos respectivos nós secundários e  $Q_m$  designa o limiar de interferência no  $m$ -ésimo receptor primário<sup>1</sup>.

Antes da comunicação iniciar, um processo de seleção de *relay* é realizado. Nesse caso, um dentre  $N$  relays é selecionado para ajudar no processo de comunicação da rede secundária. Mais especificamente, o *relay*  $R^*$  escolhido será aquele que maximizar a SNR fim-a-fim, isto é:

$$R^* = \arg \max_n \left[ \frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D}} \right]. \quad (2)$$

Após a seleção de *relay*, o processo de comunicação inicia, sendo composto por duas fases. Na fase I, a fonte envia informação para  $R^*$  e  $D$  com potência de transmissão igual a  $W_S$ . Na fase II, o *relay* selecionado amplifica o sinal recebido da fonte por um fator  $G$  (determinado pelas estatísticas instantâneas do enlace fonte-relay selecionado) e o encaminha para  $D$  com potência de transmissão igual a  $W_{R_n}$ . Concluída a transmissão em duas fases, um combinador do tipo SC é empregado no terminal destino. Neste caso, o percurso (*link* direto ou *link* via *relay*) com a maior SNR instantânea é selecionado tal que a SNR fim-a-fim pode ser escrita como

$$\gamma_{\text{end}} = \max \left[ \max_l [\gamma_{SD_l}], \max_n \left[ \frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D}} \right] \right], \quad (3)$$

em que  $\gamma_{SD_l} = W_S |h_{SD_l}|^2 / N_0$ . Perceba que os dois termos dentro do operador  $\max[\cdot, \cdot]$  em (3) não são estatisticamente independentes devido a presença da VA comum  $|h_{SP_m}|^2$ , o que torna a análise um pouco intrincada.

## III. PROBABILIDADE DE OUTAGE

A probabilidade de *outage* é definida como a probabilidade da SNR fim-a-fim,  $\gamma_{\text{end}}$ , permanecer abaixo de um limiar predefinido,  $\gamma_{\text{th}}$ . Na sequência, por simplicidade de notação, assume-se que  $Q_m = Q$ ,  $m = 1, \dots, M$ , de forma que as expressões  $\min_m (Q_m / |h_{SP_m}|^2)$  e  $\min_m (Q_m / |h_{R_n P_m}|^2)$  ficam equivalentes a  $Q / (\max_m |h_{SP_m}|^2)$  e  $Q / (\max_m |h_{R_n P_m}|^2)$ , respectivamente.

Como mencionado anteriormente, perceba que os termos  $\gamma_{SD_l}$  e  $\max_n \left[ \frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D}} \right]$  em (3) não são estatisticamente independentes devido a presença de um termo comum,  $|h_{SP_m}|^2$ . Para lidar com isso, seja então  $X = \max_m |h_{SP_m}|^2$ . De acordo com a lei da probabilidade condicional, a probabilidade de *outage* condicional pode ser escrita como

$$\begin{aligned}
 \Pr(\gamma_{\text{end}} < \gamma_{\text{th}} | X) &= \overbrace{\Pr(\gamma_{SD} < \gamma_{\text{th}} | X)}^{\varphi} \\
 &\times \underbrace{\Pr \left( \max_n \left[ \frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D}} \right] < \gamma_{\text{th}} | X \right)}_{\theta}.
 \end{aligned} \quad (4)$$

<sup>1</sup> Assume-se que os receptores primários estão localizados em um ambiente tal que os *links* de  $S$  para  $P_m$  experimentam desvanecimento Rayleigh independente e identicamente distribuído (i.i.d.). O mesmo pode ser dito a respeito dos *links* de  $R_n$  para  $P_m$ . Entretanto, os canais pertencentes aos enlaces interferentes  $S$ - $P_m$  experimentam condições de desvanecimento Rayleigh distintas dos enlaces  $R_n$ - $P_m$ .

Uma vez que os ganhos de canal são exponencialmente distribuídos,  $\varphi$  em (4) pode ser calculado como

$$\varphi = F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{th}|X) = 1 - e^{-\gamma_{th} \lambda_{SD}}, \quad (5)$$

em que  $\lambda_{SD} \triangleq 1/E[\gamma_{SD}]$ . Por outro lado, para determinar  $\theta$  em (4), utilizamos os resultados presentes em [9] para o caso de uma única antena, i.e.,

$$\theta = 1 - \lambda_{SR_n} e^{-\gamma_{th}(\lambda_{SR_n} + \lambda_{R_n D})} 2\sqrt{\frac{\Delta}{\lambda_{SR_n}}} K_1\left(2\sqrt{\Delta\lambda_{SR_n}}\right), \quad (6)$$

onde  $\lambda_{SR_n} \triangleq 1/E[\gamma_{SR_n}]$ ,  $\lambda_{R_n D} \triangleq 1/E[\gamma_{R_n D}]$ ,  $K_n(\cdot)$  é a função de Bessel modificada de segundo tipo e  $n$ -ésima ordem [10, eq. (8.432.6)], e  $\Delta = \gamma_{th}(\gamma_{th} + 1)\lambda_{R_n D}$ .

Seja agora  $Y = \max_m |h_{R_n P_m}|^2$ . Utilizando o Teorema da Probabilidade Total, a probabilidade de *outage* pode ser determinada como

$$P_{out} = \int_0^\infty \int_0^\infty F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{th}|X) F_{\gamma_{SR^*D}}(\gamma_{th}|X, Y) \times f_X(x) f_Y(y) dx dy, \quad (7)$$

em que

$$\gamma_{SR^*D} = \max_n \left[ \frac{\gamma_{SR_n} \gamma_{R_n D}}{1 + \gamma_{SR_n} + \gamma_{R_n D}} \right] \quad (8)$$

e

$$\begin{aligned} f_X(x) &= M(1 - e^{-x \lambda_{SP}})^{(M-1)} \lambda_{SP} e^{-x \lambda_{SP}}, \\ f_Y(y) &= M(1 - e^{-y \lambda_{R_n P}})^{(M-1)} \lambda_{R_n P} e^{-y \lambda_{R_n P}}, \end{aligned} \quad (9)$$

com  $\lambda_{SP} \triangleq 1/E[|h_{SP_m}|^2]$  e  $\lambda_{R_n P} \triangleq 1/E[|h_{R_n P_m}|^2]$ . Antes do cálculo de (7), é importante observar que

$$\min\left(\frac{Q}{\chi}, W\right) = \begin{cases} W, & \text{quando } \chi \leq Q/W, \\ Q/\chi, & \text{quando } \chi > Q/W, \end{cases} \quad (10)$$

Assim, baseado em (10) e para satisfazer todas as combinações das condições da potência de transmissão, a probabilidade de *outage* pode ser calculada expandido (7) em uma soma de quatro termos, sendo cada um expresso como uma integral dupla. Mais especificamente,  $P_{out}$  pode ser reescrita como  $P_{out} = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4$ , em que

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= \int_0^{Q/W} \int_0^{Q/W} F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{th}|X) F_{\gamma_{SR^*D}}(\gamma_{th}|X, Y) \\ &\times f_X(x) f_Y(y) dx dy, \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= \int_0^{Q/W} \int_{Q/W}^\infty F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{th}|X) F_{\gamma_{SR^*D}}(\gamma_{th}|X, Y) \\ &\times f_X(x) f_Y(y) dx dy, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \varphi_3 &= \int_{Q/W}^\infty \int_0^{Q/W} F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{th}|X) F_{\gamma_{SR^*D}}(\gamma_{th}|X, Y) \\ &\times f_X(x) f_Y(y) dx dy, \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} \varphi_4 &= \int_{Q/W}^\infty \int_{Q/W}^\infty F_{\gamma_{SD}}(\gamma_{th}|X) F_{\gamma_{SR^*D}}(\gamma_{th}|X, Y) \\ &\times f_X(x) f_Y(y) dx dy, \end{aligned} \quad (14)$$

onde, por questão de simplicidade de notação, assume-se que

$W_S = W_{R_n} = W$ . Fazendo as substituições apropriadas em (11) e utilizando a expansão binomial para reescrever as PDFs de  $X$  e  $Y$  dadas em (9), tem-se

$$\begin{aligned} \varphi_1 &= M^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} (-1)^{m+t} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \left(1 - e^{-\gamma_{th} \lambda_{SD}^W}\right) \\ &\times \prod_{n=1}^N \left(1 - \lambda_{SR_n}^W e^{-\gamma_{th}(\lambda_{SR_n}^W + \lambda_{R_n D}^W)} 2\sqrt{\frac{\Delta}{\lambda_{SR_n}}} K_1\left(2\sqrt{\Delta\lambda_{SR_n}}\right)\right) \\ &\times \frac{\left(1 - e^{-\frac{Q}{W} \lambda_{SP}(m+1)}\right) \left(1 - e^{-\frac{Q}{W} \lambda_{R_n P}(t+1)}\right)}{\lambda_{SP}(m+1) \lambda_{R_n P}(t+1)}, \end{aligned} \quad (15)$$

em que

$$\lambda_{IJ}^W \triangleq \frac{1}{E[W|h_{IJ}|^2/N_0]}, \quad (16)$$

com  $I \in \{S, R_n\}$  e  $J \in \{R_n, D\}$ . Similarmente, após as substituições apropriadas, (12) pode ser escrito como

$$\begin{aligned} \varphi_2 &= \int_0^{Q/W} \int_{Q/W}^\infty \left(1 - e^{-\gamma_{th} \lambda_{SD}^W}\right) M(1 - e^{-x \lambda_{SP}})^{(M-1)} \\ &\times \prod_{n=1}^N \left(1 - \lambda_{SR_n}^W e^{-\gamma_{th}(\lambda_{SR_n}^W + y \lambda_{R_n D}^Q)}\right) \\ &\times 2\sqrt{\frac{\Delta_I}{\lambda_{SR_n}}} K_1\left(2\sqrt{\Delta_I \lambda_{SR_n}}\right) \\ &\times \lambda_{SP} e^{-x \lambda_{SP}} M(1 - e^{-y \lambda_{R_n P}})^{(M-1)} \times \lambda_{R_n P} e^{-y \lambda_{R_n P}} dx dy, \end{aligned} \quad (17)$$

em que  $y \lambda_{R_n D}^Q \triangleq 1/E[(Q/y)(|h_{R_n D}|^2/N_0)]$  e  $\Delta_I = y \gamma_{th}(\gamma_{th} + 1) \lambda_{R_n D}^Q$ . A fim de prosseguir no cálculo de  $\varphi_2$ , utiliza-se a seguinte identidade

$$\prod_{k=1}^K (1 - x_k) = \sum_{k=0}^K \frac{(-1)^k}{k!} \sum_{n_1=\dots=n_k}^K \dots \sum_{n_1 < \dots < n_k}^K \prod_{t=1}^k x_{n_t}. \quad (18)$$

Como em [11], assume-se que os *relays* estão muito próximos uns dos outros de forma que os *links* de  $S$  para  $R_n$  possuem a mesma SNR média, i.e.,  $\lambda_{SR_n} = \lambda_{SR}, \forall n$ . O mesmo pode ser dito para os *links* de  $R_n$  para  $D$ . Ainda assim, determinar uma expressão exata e em forma fechada para  $\varphi_2$  não é trivial. Porém, fazendo o uso da aproximação  $K_1(\zeta) \simeq 1/\zeta$  [10, eq. (9.6.9)], (17) pode ser aproximado por (19), apresentado no topo da próxima página. Usando uma abordagem similar, (13) e (14) podem ser aproximados por (20) e (21), respectivamente, em que  $\lambda_{SR_n}^Q \triangleq 1/E[Q|h_{SR_n}|^2/N_0]$  e  $\lambda_{SD}^Q \triangleq 1/E[Q|h_{SD}|^2/N_0]$ .

Finalmente, substituindo (15), (19), (20) e (21) em  $P_{out}$ , uma expressão aproximada e em forma fechada para a probabilidade de *outage* é obtida. Até onde os autores estão cientes, tal expressão ainda não foi apresentada na literatura. Na sequência, uma análise assintótica será apresentada com intuito de obter alguns *insights* do sistema em estudo. Por exemplo, a partir da análise assintótica, o ganho de diversidade do sistema considerado será obtido, sendo mostrado que ele não é afetado nem pelo número de receptores primários e nem pelo limiar de interferência estabelecido pelos receptores primários.

$$\begin{aligned} \varphi_2 \simeq & M^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} \sum_{n=0}^N (-1)^{(m+t+n)} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \binom{N}{n} \lambda_{R_n P} \left(1 - e^{-\gamma_{th} \lambda_{SD}^W}\right) \frac{\left(1 - e^{-\frac{Q}{W} \lambda_{SP}(m+1)}\right)}{\lambda_{SP}(m+1)} \\ & \times \frac{\exp\left(-\gamma_{th} n \left(\lambda_{SR_n}^W + \frac{Q}{W} \lambda_{R_n D}^Q\right) - \frac{Q}{W} \lambda_{R_n P}(t+1)\right)}{\gamma_{th} n \lambda_{R_n D}^Q + \lambda_{R_n P}(t+1)}. \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \varphi_3 \simeq & \sum_{l=0}^1 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} \sum_{n=0}^N M^2 (-1)^{(m+t+n+l)} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \binom{N}{n} \lambda_{R_n P} \frac{\left(1 - e^{-\frac{Q}{W} \lambda_{R_n P}(t+1)}\right)}{\lambda_{R_n P}(t+1)} \exp\left(-l \frac{Q}{W} \gamma_{th} \lambda_{SD}^Q\right) \\ & \times \lambda_{SP} \frac{\exp\left(-n \gamma_{th} \left(\frac{Q}{W} \lambda_{SR_n}^Q + \lambda_{R_n D}^W\right) - \frac{Q}{W} \lambda_{SP}(m+1)\right)}{l \gamma_{th} \lambda_{SD}^Q + n \gamma_{th} \lambda_{SR_n}^Q + \lambda_{SP}(m+1)}. \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \varphi_4 \simeq & \sum_{l=0}^1 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} \sum_{n=0}^N M^2 (-1)^{(m+t+n+l)} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \binom{N}{n} \lambda_{R_n P} \exp\left(-l \frac{Q}{W} \gamma_{th} \lambda_{SD}^Q\right) \exp\left(-\frac{Q}{W} \lambda_{R_n P}(t+1)\right) \\ & \times \frac{1}{n \gamma_{th} \lambda_{R_n D}^Q + \lambda_{R_n P}(t+1)} \frac{\exp\left(-n \gamma_{th} \frac{Q}{W} (\lambda_{SR_n}^Q + \lambda_{R_n D}^Q) - \frac{Q}{W} \lambda_{SP}(m+1)\right)}{l \gamma_{th} \lambda_{SD}^Q + n \gamma_{th} \lambda_{SR_n}^Q + \lambda_{SP}(m+1)}. \end{aligned} \quad (21)$$

#### A. Análise Assintótica

Para realizar a análise assintótica, seja  $\bar{\gamma} \triangleq 1/N_0$  a SNR do sistema e seja  $Q/W = \mu$ , em que  $\mu$  é uma constante positiva. Utilizando a expansão em série de MacLaurin para a função exponencial e a aproximação da função Bessel,  $K_1(\tau) \simeq 1/\tau$ , e percebendo que quando  $\bar{\gamma} \rightarrow \infty$ ,  $\lambda_{SP} \gg \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}$  e  $\lambda_{R_n P} \gg \frac{\gamma_{th}}{\bar{\gamma}}$ , uma expressão assintótica para cada termo  $\varphi_i$  pode ser escrita como

$$\begin{aligned} P_{out}^{\varphi_1} \simeq & (\gamma_{th} \lambda_{SD}^W) M^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} (-1)^{m+t} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \\ & \times \frac{\left(1 - e^{-\mu \lambda_{SP}(m+1)}\right)}{\lambda_{SP}(m+1)} \frac{\left(1 - e^{-\mu \lambda_{R_n P}(t+1)}\right)}{\lambda_{R_n P}(t+1)} \\ & \times \prod_{n=1}^N \left[\gamma_{th} \left(\lambda_{SR_n}^W + \lambda_{R_n D}^W\right)\right] \propto \left(\frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{N+1}, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} P_{out}^{\varphi_2} \simeq & (\gamma_{th} \lambda_{SD}^W) M^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} (-1)^{m+t} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \\ & \times \frac{\left(1 - e^{-\mu \lambda_{SP}(m+1)}\right)}{\lambda_{SP}(m+1)} \frac{e^{-\mu \lambda_{R_n P}(t+1)}}{(t+1)} \\ & \times \prod_{n=1}^N \left[\gamma_{th} \left(\lambda_{SR_n}^W + \mu \lambda_{R_n D}^Q\right)\right] \propto \left(\frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{N+1}, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} P_{out}^{\varphi_3} \simeq & \left(\mu \gamma_{th} \lambda_{SD}^Q\right) M^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} (-1)^{m+t} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \\ & \times \frac{\left(1 - e^{-\mu \lambda_{R_n P}(t+1)}\right)}{\lambda_{R_n P}(t+1)} \frac{e^{-\mu \lambda_{SP}(m+1)}}{(m+1)} \\ & \times \prod_{n=1}^N \left[\gamma_{th} \left(\mu \lambda_{SR_n}^Q + \lambda_{R_n D}^W\right)\right] \propto \left(\frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{N+1}, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} P_{out}^{\varphi_4} \simeq & \left(\mu \gamma_{th} \lambda_{SD}^Q\right) M^2 \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{t=0}^{M-1} (-1)^{m+t} \binom{M-1}{m} \binom{M-1}{t} \\ & \times \frac{\left(e^{-\mu \lambda_{R_n P}(t+1)}\right)}{(t+1)} \frac{e^{-\mu \lambda_{SP}(m+1)}}{(m+1)} \\ & \times \prod_{n=1}^N \left[\mu \gamma_{th} \left(\lambda_{SR_n}^Q + \lambda_{R_n D}^Q\right)\right] \propto \left(\frac{1}{\bar{\gamma}}\right)^{N+1}. \end{aligned} \quad (25)$$

Das expressões analíticas acima, é fácil perceber que o sistema possui ordem de diversidade igual a  $N + 1$ . Observe que as restrições de interferência nem o número de receptores primários influenciam no ganho de diversidade.

#### IV. RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÕES

Nesta Seção, alguns exemplos numéricos serão apresentados com o intuito de validar a análise apresentada neste artigo. Como em trabalhos anteriores [9], é considerado um plano bidimensional para a localização dos nós da rede, onde, sem perda de generalidade, a fonte secundária está localizada em  $(0, 0)$ , os  $N$  relays secundários estão posicionados em  $(0.5, 0)$ , o destino secundário está localizado em  $(1, 0)$  e os  $M$  receptores primários estão posicionados em  $(0, 1)$ . A média estatística dos ganhos de canal entre dois nós é determinada por  $d^{-\rho}$ , com  $d$  denotando a distância entre os respectivos nós e  $\rho$  sendo o coeficiente de perda de percurso, cujo valor escolhido na simulação foi  $\rho = 4$ . O limiar de *outage*,  $\gamma_{th}$ , escolhido foi 3 dB. Como será observado, todos os casos investigados revelam uma excelente concordância entre os resultados analíticos e simulados.

A Fig. 2 mostra o comportamento das curvas *outage* aproximada e assintótica assumindo  $N = 3$  relays e diferentes números de receptores primários. Como esperado, quando o número de receptores primários aumenta, o desempenho de

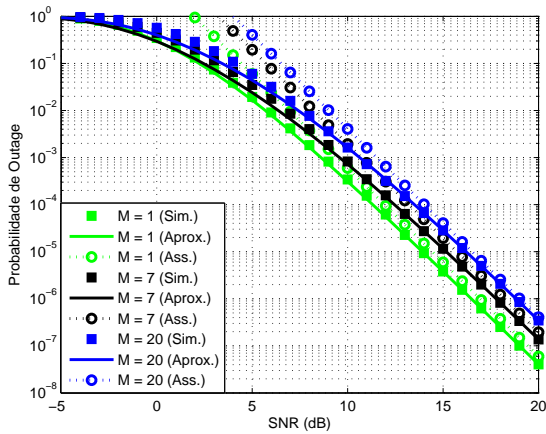


Fig. 2. Probabilidade de *outage* e comportamento assintótico para diferentes números de receptores primários ( $N = 3$ ,  $Q/N_0 = W/N_0$ ).

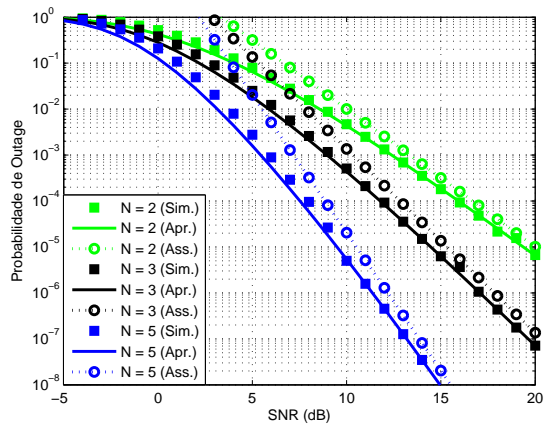


Fig. 3. Probabilidade de *outage* e comportamento assintótico para diferentes números de relays ( $M = 3$ ,  $W = Q = 0.5$ ).

*outage* piora. Entretanto, pode ser visto que o número de receptores primários não influencia da ordem de diversidade do sistema, a qual é igual a  $N + 1$

Diferentemente da Fig. 2, na Fig. 3 foi fixado o número de receptores primários,  $M = 3$ , e variado o número de relays. Como esperado, percebe-se que o aumento de  $N$  provoca um melhor desempenho de *outage* e um aumento na ordem de diversidade do sistema, mostrando que a diversidade cooperativa apresenta um grande benefício para o desempenho do sistema. Nestas duas figuras, as curvas assintóticas e aproximada estão muito próximas da curva simulada em regiões de alta SNR, o que confirma que a análise feita está correta.

A Fig 4 mostra como a restrição de interferência,  $Q$ , influencia no desempenho de *outage*. Assumindo  $N = M = 3$ , percebe-se que o sistema satura após um certo valor de SNR. Isto acontece porque o sistema atinge a máxima potência de transmissão permitida. Além disso, quando o limiar de interferência aumenta, o comportamento sistêmico se aproxima do caso de “não-interferência”.

## V. CONCLUSÕES

O desempenho de *outage* de SCCCEs na presença de enlace direto foi investigado. Empregando uma estratégia de seleção

de *relay*, uma expressão aproximada e em forma fechada para a probabilidade de *outage* foi encontrada, a partir da qual foi

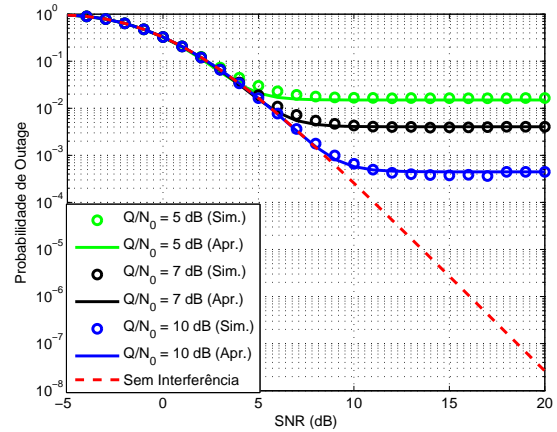


Fig. 4. Impacto da restrição de interferência na probabilidade de *outage* ( $M = 5$ ,  $N = 3$ ).

realizada uma análise assintótica. Observou-se que: (i) nem o número de receptores nem os limiares de interferência têm influência na ordem de diversidade do sistema, e (ii) a restrição de interferência imposta pelos receptores primários causa um fenômeno de saturação na probabilidade de *outage*. De acordo com o conhecimento dos autores, este tipo de análise não foi desenvolvida na literatura ainda, o que a torna muito importante para o desenvolvimento de sistemas cooperativos cognitivos com compartilhamento espectral e na presença de múltiplos receptores primários.

## REFERÊNCIAS

- [1] J. N. Laneman, D. N. C. Tse e G. W. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, Dez. 2004.
- [2] J. Mitola, “Cognitive radio: An integrated agent architecture for software defined radio,” Ph.D. dissertation, Royal Inst. Technol. (KTH), Dez. 2000.
- [3] A. Ghasemi e E. S. Sousa, “Fundamental limits of spectrum-sharing in fading environments,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 2, pp. 649–658, Fev. 2007.
- [4] C. Zhong, T. Ratnarajah, e 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.
- [5] J. Lee, H. Wang, J. G. Andrews e D. Hong, “Outage probability of cognitive relay networks with interference constraints,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 2, pp. 390–395, Fev. 2011.
- [6] T. Q. Duong, V. N. Q. Bao, G. C. Alexandropoulos, e H. -J. Zepernick, “Cooperative spectrum sharing networks with AF relay and selection diversity,” *IET Electron. Lett.*, vol. 47, no. 20, Set. 2011.
- [7] T. Q. Duong, D. B. da Costa, M. El-kashlan e 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.
- [8] L. Luo, P. Zhang, G. Zhang, e J. Qin, “Outage performance for cognitive relay networks with underlay spectrum sharing,” *IEEE Commun. Lett.*, vol. 15, no. 7, pp. 710–712, Jul. 2011.
- [9] M. A. B. de Melo e 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.
- [10] M. Abramowitz e I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables*, New York, 1972.
- [11] D. B. da Costa e S. Aissa, “End-to-end performance of dual-hop semi-blind relaying systems with partial relay selection,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 8, pp. 4306–4315, Ago. 2009.