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

Os autores estão vinculados à Universidade Federal do Ceará (UFC), Grupo de Pesquisa em Telecomunicacões Sem Fio (GTEL), Fortaleza-CE.

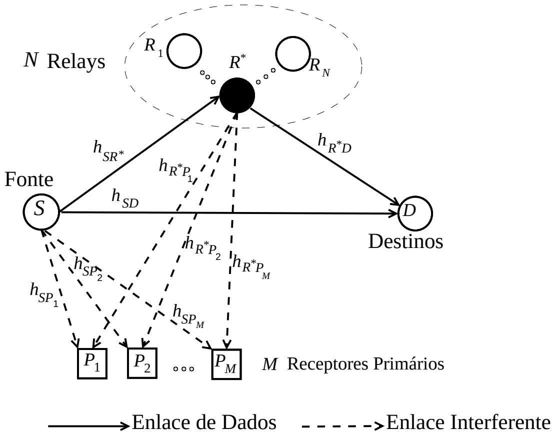

Fig. 1. Modelo sistêmico.

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 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.

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 ($n=1,...,N$), um destino D e M receptores primários P_m ($m=1,...,M$), 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 $\max_n \left[\frac{\gamma_{SR_n}\gamma_{R_nD}}{1+\gamma_{SR_n}+\gamma_{R_nD}}\right]$, em que $\gamma_{SR_n} = W_S|h_{SR_n}|^2/N_0$ e $\gamma_{R_nD} = W_{R_n}|h_{R_nD}|^2/N_0$ 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]

$$W_S \leq \min\left(\min_m \frac{Q_m}{|h_{SP_m}|^2}, W\right),$$
$$W_{R_n} \leq \min\left(\min_m \frac{Q_m}{|h_{R_nP_m}|^2}, W\right), \qquad (1)$$

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[1].

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:

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

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

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

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 intricada.

III. Probabilidade de Outage

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

Como mencionado anteriormente, perceba que os termos γ_{SD_l} e $\max_n\left[\frac{\gamma_{SR_n}\gamma_{R_nD}}{1+\gamma_{SR_n}+\gamma_{R_nD}}\right]$ 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

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

[1]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, φ em (4) pode ser calculado como

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

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

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

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

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

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

em que

$$\gamma_{SR^*D} = \max_n \left[\frac{\gamma_{SR_n}\gamma_{R_nD}}{1+\gamma_{SR_n}+\gamma_{R_nD}}\right] \tag{8}$$

e

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

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

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

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 $P_{\text{out}} = \varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4$, em que

$$\varphi_1 = \int_0^{Q/W} \int_0^{Q/W} F_{\gamma_{SD}}\left(\gamma_{\text{th}}|X\right) F_{\gamma_{SR^*D}}\left(\gamma_{\text{th}}|X,Y\right) \times f_X(x) f_Y(y)\,dx\,dy, \tag{11}$$

$$\varphi_2 = \int_0^{Q/W} \int_{Q/W}^{\infty} F_{\gamma_{SD}}\left(\gamma_{\text{th}}|X\right) F_{\gamma_{SR^*D}}\left(\gamma_{\text{th}}|X,Y\right) \times f_X(x) f_Y(y)\,dx\,dy, \tag{12}$$

$$\varphi_3 = \int_{Q/W}^{\infty} \int_0^{Q/W} F_{\gamma_{SD}}\left(\gamma_{\text{th}}|X\right) F_{\gamma_{SR^*D}}\left(\gamma_{\text{th}}|X,Y\right) \times f_X(x) f_Y(y)\,dx\,dy, \tag{13}$$

$$\varphi_4 = \int_{Q/W}^{\infty} \int_{Q/W}^{\infty} F_{\gamma_{SD}}\left(\gamma_{\text{th}}|X\right) F_{\gamma_{SR^*D}}\left(\gamma_{\text{th}}|X,Y\right) \times f_X(x) f_Y(y)\,dx\,dy, \tag{14}$$

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

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

em que

$$\lambda_{IJ}^W \triangleq \frac{1}{E\left[W\,|h_{IJ}|^2/N_0\right]}, \tag{16}$$

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

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

em que $y\lambda_{R_nD}^Q \triangleq 1/E\left[(Q/y)(|h_{R_nD}|^2/N_0)\right]$ e $\Delta_I = y\gamma_{\text{th}}(\gamma_{\text{th}}+1)\lambda_{R_nD}^Q$. A fim de prosseguir no cálculo de φ_2, utiliza-se a seguinte identidade

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

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 φ_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 $\lambda_{SR_n}^Q \triangleq 1/E\left[Q\,|h_{SR_n}|^2/N_0\right]$ e $\lambda_{SD}^Q \triangleq 1/E\left[Q\,|h_{SD}|^2/N_0\right]$.

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.

$$\varphi_2 \simeq M^2 \sum_{m=0}^{M-1}\sum_{t=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N}(-1)^{(m+t+n)}\binom{M-1}{m}\binom{M-1}{t}\binom{N}{n}\lambda_{R_nP}\left(1-e^{-\gamma_{\text{th}}\,\lambda_{SD}^{W}}\right)\frac{\left(1-e^{\left(-\frac{Q}{W}\lambda_{SP}(m+1)\right)}\right)}{\lambda_{SP}(m+1)}$$
$$\times\frac{\exp\left(-\gamma_{\text{th}}\,n\left(\lambda_{SR_n}^{W}+\frac{Q}{W}\lambda_{R_nD}^{Q}\right)-\frac{Q}{W}\lambda_{R_nP}(t+1)\right)}{\gamma_{\text{th}}\,n\,\lambda_{R_nD}^{Q}+\lambda_{R_nP}(t+1)}. \quad (19)$$

$$\varphi_3 \simeq \sum_{l=0}^{1}\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{t=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N}M^2(-1)^{(m+t+n+l)}\binom{M-1}{m}\binom{M-1}{t}\binom{N}{n}\lambda_{R_nP}\frac{\left(1-e^{\left(-\frac{Q}{W}\lambda_{R_nP}(t+1)\right)}\right)}{\lambda_{R_nP}(t+1)}\exp\left(-l\,\frac{Q}{W}\gamma_{\text{th}}\,\lambda_{SD}^{Q}\right)$$
$$\times\lambda_{SP}\frac{\exp\left(-n\,\gamma_{\text{th}}\left(\frac{Q}{W}\lambda_{SR_n}^{Q}+\lambda_{R_nD}^{W}\right)-\frac{Q}{W}\lambda_{SP}(m+1)\right)}{l\,\gamma_{\text{th}}\,\lambda_{SD}^{Q}+n\,\gamma_{\text{th}}\lambda_{SR_n}^{Q}+\lambda_{SP}(m+1)}. \quad (20)$$

$$\varphi_4 \simeq \sum_{l=0}^{1}\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{t=0}^{M-1}\sum_{n=0}^{N}M^2(-1)^{(m+t+n+l)}\binom{M-1}{m}\binom{M-1}{t}\binom{N}{n}\lambda_{R_nP}\exp\left(-l\,\frac{Q}{W}\gamma_{\text{th}}\,\lambda_{SD}^{Q}\right)\exp\left(-\frac{Q}{W}\,\lambda_{R_nP}(t+1)\right)$$
$$\times\frac{1}{n\,\gamma_{\text{th}}\lambda_{R_nD}^{Q}+\lambda_{R_nP}(t+1)}\frac{\exp\left(-n\,\gamma_{\text{th}}\frac{Q}{W}\left(\lambda_{SR_n}^{Q}+\lambda_{R_nD}^{Q}\right)-\frac{Q}{W}\lambda_{SP}(m+1)\right)}{l\,\gamma_{\text{th}}\,\lambda_{SD}^{Q}+n\,\gamma_{\text{th}}\lambda_{SR_n}^{Q}+\lambda_{SP}(m+1)}. \quad (21)$$

A. Análise Assintótica

Para realizar a análise assintótica, seja $\overline{\gamma} \triangleq 1/N_0$ a SNR do sistema e seja $Q/W = \mu$, em que μ 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 $\overline{\gamma} \to \infty$, $\lambda_{SP} \gg \frac{\gamma_{\text{th}}}{\overline{\gamma}}$ e $\lambda_{R_nP} \gg \frac{\gamma_{\text{th}}}{\overline{\gamma}}$, uma expressão assintótica para cada termo φ_i pode ser escrita como

$$P_{\text{out}}^{\varphi_1} \simeq \left(\gamma_{\text{th}}\lambda_{SD}^{W}\right)M^2\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{t=0}^{M-1}(-1)^{m+t}\binom{M-1}{m}\binom{M-1}{t}$$
$$\times\frac{\left(1-e^{(-\mu\,\lambda_{SP}(m+1))}\right)}{\lambda_{SP}(m+1)}\frac{\left(1-e^{(-\mu\,\lambda_{R_nP}(t+1))}\right)}{\lambda_{R_nP}(t+1)}$$
$$\times\prod_{n=1}^{N}\left[\gamma_{\text{th}}\left(\lambda_{SR_n}^{W}+\lambda_{R_nD}^{W}\right)\right]\propto\left(\frac{1}{\overline{\gamma}}\right)^{N+1}, \quad (22)$$

$$P_{\text{out}}^{\varphi_2} \simeq \left(\gamma_{\text{th}}\lambda_{SD}^{W}\right)M^2\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{t=0}^{M-1}(-1)^{m+t}\binom{M-1}{m}\binom{M-1}{t}$$
$$\times\frac{\left(1-e^{(-\mu\,\lambda_{SP}(m+1))}\right)}{\lambda_{SP}(m+1)}\frac{e^{(-\mu\lambda_{R_nP}(t+1))}}{(t+1)}$$
$$\times\prod_{n=1}^{N}\left[\gamma_{\text{th}}\left(\lambda_{SR_n}^{W}+\mu\,\lambda_{R_nD}^{Q}\right)\right]\propto\left(\frac{1}{\overline{\gamma}}\right)^{N+1}, \quad (23)$$

$$P_{\text{out}}^{\varphi_3} \simeq \left(\mu\,\gamma_{\text{th}}\lambda_{SD}^{Q}\right)M^2\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{t=0}^{M-1}(-1)^{m+t}\binom{M-1}{m}\binom{M-1}{t}$$
$$\times\frac{\left(1-e^{(-\mu\,\lambda_{R_nP}(t+1))}\right)}{\lambda_{R_nP}(t+1)}\frac{e^{(-\mu\lambda_{SP}(m+1))}}{(m+1)}$$
$$\times\prod_{n=1}^{N}\left[\gamma_{\text{th}}\left(\mu\,\lambda_{SR_n}^{Q}+\lambda_{R_nD}^{W}\right)\right]\propto\left(\frac{1}{\overline{\gamma}}\right)^{N+1}, \quad (24)$$

$$P_{\text{out}}^{\varphi_4} \simeq \left(\mu\,\gamma_{\text{th}}\lambda_{SD}^{Q}\right)M^2\sum_{m=0}^{M-1}\sum_{t=0}^{M-1}(-1)^{m+t}\binom{M-1}{m}\binom{M-1}{t}$$
$$\times\frac{\left(e^{(-\mu\,\lambda_{R_nP}(t+1))}\right)}{(t+1)}\frac{e^{(-\mu\lambda_{SP}(m+1))}}{(m+1)}$$
$$\times\prod_{n=1}^{N}\left[\mu\,\gamma_{\text{th}}\left(\lambda_{SR_n}^{Q}+\lambda_{R_nD}^{Q}\right)\right]\propto\left(\frac{1}{\overline{\gamma}}\right)^{N+1}. \quad (25)$$

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 ρ sendo o coeficiente de perda de percurso, cujo valor escolhido na simulação foi $\rho = 4$. O limiar de *outage*, γ_{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

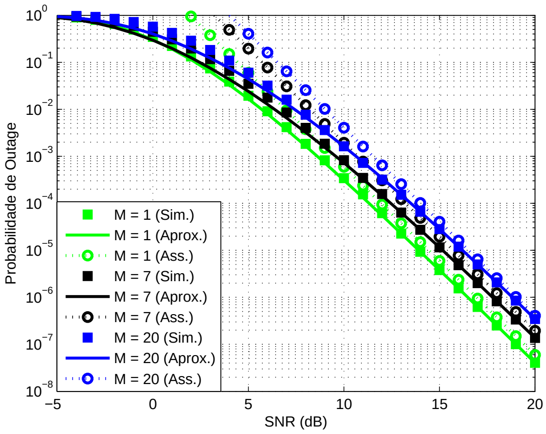

Fig. 2. Probabilidade de *outage* e comportamento assintótico para diferentes números de receptores primários ($N = 3$, $Q/N_0 = W/N_0$).

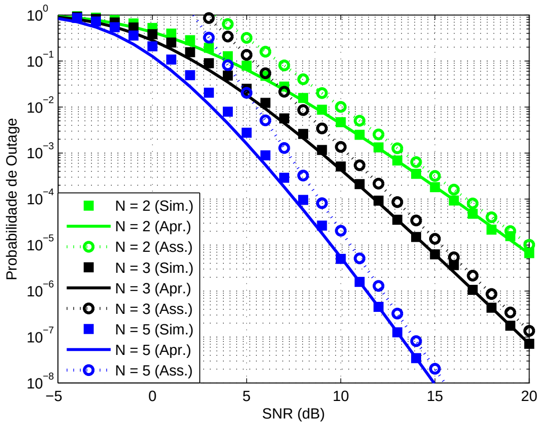

Fig. 3. Probabilidade de *outage* e comportamento assintótico para diferentes números de *relays* ($M = 3$, $W = Q = 0.5$).

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, perceba 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

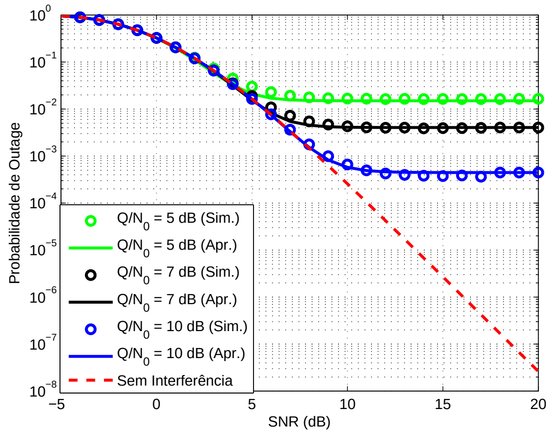

Fig. 4. Impacto da restrição de interferência na probabilidade de *outage* ($M = 5, N = 3$).

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. (KHT), 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. Doung, D. B. da Costa, M. Elkashlan 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.