

Desempenho de Redes Cooperativas *Full Duplex* Baseadas em NOMA e Seleção Parcial de *Relays*

Anderson Tregancini Jr, Edgar Eduardo Benitez Olivo e Diana Pamela Moya Osorio

Resumo— Este trabalho analisa o desempenho em termos da probabilidade de *outage* para um esquema cooperativo baseado em NOMA, que emprega seleção parcial de *relays*. O modelo do sistema considerado consiste de uma fonte, dois usuários os quais acessam o canal usando NOMA, e um cluster de *relays* amplifica-e-encaminha do tipo *full duplex*. Como contribuições deste trabalho, expressões analíticas exatas em forma de uma integral simples e expressões analíticas em forma fechada assintóticas no regime de alta relação sinal-ruído foram obtidas. A partir dessas expressões analíticas, avalia-se o desempenho do esquema de comunicação proposto. Simulações de Monte Carlo validam os resultados obtidos.

Palavras-Chave— Amplifica-e-encaminha, *full-duplex*, NOMA, probabilidade de *outage*, seleção parcial de *relays*.

Abstract— This work analyzes the performance in terms of the outage probability for a NOMA-based cooperative scheme, which employs partial relay selection. The considered system model consists of one source, two users accessing the channel using NOMA, and a cluster of full-duplex amplify-and-forward relays. As contributions of this work, exact single-fold integral expressions and asymptotic closed-form expressions at the high signal-to-noise ratio regime are obtained. From these analytical expressions the performance of the proposed communication scheme is assessed. Monte Carlo simulations validate the obtained results.

Keywords— Amplify-and-forward, *full-duplex*, NOMA, outage probability, partial relay selection.

I. INTRODUÇÃO

Com o aumento acelerado da demanda por aplicações e serviços baseados em redes sem fio, a necessidade de explorar eficientemente o espectro radioelétrico é cada vez mais imperiosa. Além disso, existem requerimentos que as redes de quinta geração (5G) devem satisfazer em relação à qualidade de serviço fornecida a seus usuários [1]. A fim de alcançar esses objetivos, as técnicas de acesso múltiplo não ortogonal (NOMA, *non-orthogonal multiple access*) vêm sendo consideradas como candidatas promissoras a fazer parte das especificações das redes 5G. NOMA é uma estratégia em que múltiplos usuários podem compartilhar os mesmos recursos de rádio utilizando-se da multiplexação no domínio do código ou no domínio da potência [2]. Em NOMA no domínio da potência, diferentes níveis de potência são alocados para cada usuário, dependendo das condições de canal por

estes experimentadas, permitindo assim aumentar a eficiência espectral do sistema. Para tanto, a fonte transmite os sinais de informação dos diferentes usuários em *broadcast*, usando técnicas de codificação por superposição enquanto que, no destino, algoritmos de cancelamento sucessivo de interferência (SIC, *successive interference cancellation*) são executados, a fim de cancelar a interferência multiusuário [3]. Neste trabalho, foca-se na técnica NOMA no domínio da potência.

Recentemente, o uso combinado de NOMA e comunicações cooperativas vem ganhando cada vez mais destaque, devido aos ganhos inerentes tanto em eficiência espectral, bem como em confiabilidade e extensão de cobertura [4]–[6]. Em redes cooperativas, um ou mais nós retransmissores (ou *relays*) auxiliam a comunicação entre fonte e destino. A operação dos *relays* é ditada principalmente por dois protocolos de retransmissão amplamente conhecidos, a saber: decodifica-e-encaminha (DF, *decode-and-forward*) e amplifica-e-encaminha (AF, *amplify-and-forward*) [7]. Além disso, dentre os modos de retransmissão, o modo *full duplex* (FD) surge como uma técnica promissora para alavancar a eficiência espectral do sistema, ao possibilitar a transmissão e recepção simultânea dos sinais em uma mesma frequência, recuperando assim a perda de eficiência espectral inerente ao modo *half duplex* (HD). No entanto, esse ganho em eficiência espectral vem a custo da auto-interferência (SI, *self interference*) sofrida entre a antena transmissora e a antena receptora no *relay*. Contudo, cabe ressaltar que resultados promissores têm sido recentemente reportados na literatura, mostrando que uma atenuação significativa da auto-interferência pode ser alcançada, viabilizando assim o uso do modo FD em redes sem fio [8]. Em vista disto, inúmeros trabalhos investigaram a aplicação da retransmissão FD em redes cooperativas baseadas em acesso múltiplo ortogonal (OMA, *orthogonal multiple access*) [9], [10]. Não obstante, os trabalhos que têm estudado o uso da retransmissão FD em redes cooperativas baseadas em NOMA ainda são escassos [5].

Desse modo, apesar do progresso alcançado até o momento, diversos cenários que fazem uso de NOMA e comunicações cooperativas baseadas em retransmissão FD ainda permanecem inexplorados. A este respeito, este trabalho apresenta como contribuição a análise de desempenho de uma rede cooperativa baseada em NOMA, que consiste de uma fonte e dois destinos, os quais se comunicam através de um *relay*, que será selecionado a partir de um *cluster* de *relays* do tipo FD-AF. Visando um requerimento menor de *feedback overhead*, adota-se um esquema de seleção parcial de *relay* (PRS, *partial relay selection*) baseado na informação de estado de canal (CSI, *channel state information*) dos enlaces entre a

Anderson Tregancini Jr., Edgar Eduardo Benitez Olivo, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Campus São João da Boa Vista–SP, Brasil, E-mails: {anderson.tregancini, 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 financiado parcialmente pela CAPES–cód. de financiamento 001, pelo CNPq (421850/2018-3 e 428649/2016-5) e pela FAPESP (2017/20990-6).

fonte e os *relays*. Além disto, considera-se um cancelamento imperfeito de SI nos *relays* FD, o que implica na presença de uma SI residual no desempenho do sistema. Para o sistema de comunicação proposto, o desempenho do sistema é avaliado em termos da probabilidade de *outage* para cada nó destino, que acessa o canal a partir de NOMA.

As principais contribuições são anunciadas a seguir:

- Expressões para a relação sinal-interferência-mais-ruído (SINR, *signal-to-interference-plus-noise ratio*) fim-a-fim de cada usuário NOMA são obtidas.
- Expressões analíticas exatas em forma de uma integral simples para a probabilidade de *outage* são derivadas para ambos os usuários NOMA, a partir das expressões de SINR obtidas.
- Expressões analíticas em forma fechada são obtidas para o comportamento assintótico do desempenho de *outage* em alta relação sinal-ruído (SNR, *signal-to-noise ratio*).
- O impacto de parâmetros-chave do sistema, como o número de *relays* e o valor do ganho médio de canal de SI, sobre o desempenho do sistema é avaliado a partir das expressões analíticas obtidas.

As seções restantes deste trabalho são organizadas como segue. O modelo do sistema é apresentado na Seção II. As expressões analíticas para a probabilidade de *outage* são derivadas na Seção III. Os resultados numéricos são apresentados na Seção IV. Finalmente, as conclusões deste trabalho são apresentadas na Seção V.

II. MODELO DO SISTEMA

Neste trabalho, o *downlink* de uma rede cooperativa de dois saltos baseado em NOMA e retransmissão FD, é analisado. Neste cenário, considere uma fonte S que pretende se comunicar com dois destinos $\{D_\ell\}_{\ell=1}^2$ usando NOMA, com ajuda de um *relay*, escolhido dentre um *cluster* de K *relays* $\{R_k\}_{k=1}^K$, os quais operam em modo FD e sob o protocolo de retransmissão AF de ganho variável. Os nós S, D_1 e D_2 são equipados com apenas uma antena, enquanto os *relays* são equipados com duas antenas, uma para transmissão e outra para recepção dos sinais, possibilitando a operação FD à custa de SI. A seleção do *relay*, que participará do processo de comunicação entre a fonte e os usuários, é determinada a partir da estratégia PRS, considerando a disponibilidade da CSI dos primeiros saltos (enlaces $S \rightarrow R_k$). Além disto, considera-se que todos os enlaces são sujeitos a desvanecimento Rayleigh não seletivo em frequência e ruído AWGN (*additive white Gaussian noise*) com potência média N_0 . Assim, as SNRs recebidas nos enlaces dos primeiros saltos e dos segundos saltos são dadas, respectivamente, por $X_k = |h_{SR_k}|^2 P_S / N_0$ e $Y_{k\ell} = |h_{R_k D_\ell}|^2 P_R / N_0$, para $k = 1, \dots, K$ e $\ell = 1, 2$, em que $h_{SR_k} \sim \mathcal{CN}(0, \Omega_{SR_k})$ e $h_{R_k D_\ell} \sim \mathcal{CN}(0, \Omega_{R_k D_\ell})$ são os coeficientes complexos de canal correspondentes, sendo $\Omega_{SR_k} = E\{|h_{SR_k}|^2\}$ e $\Omega_{R_k D_\ell} = E\{|h_{R_k D_\ell}|^2\}$ os ganhos médio de canal; e P_S e P_R são, respectivamente, a potência transmitida em S e R_k . Além disto, um algoritmo imperfeito de cancelamento de auto interferência é assumido, desta forma que o enlace de SI residual é modelado como um canal sujeito a desvanecimento Rayleigh. Deste modo, a SNR recebida

no k -ésimo enlace de SI é dada por $U_k = |h_{RR_k}|^2 P_R / N_0$, em que $h_{RR_k} \sim \mathcal{CN}(0, \Omega_{RR_k})$ é o coeficiente complexo de canal com $\Omega_{RR_k} = E\{|h_{RR_k}|^2\}$. Para o modelo proposto, assume-se que D_2 apresenta melhores condições de canal que D_1 , de modo que $|h_{R_k D_1}|^2 < |h_{R_k D_2}|^2$. Além disto, foca-se em um cenário de extensão de cobertura, em que, devido a um sombreamento severo, o enlace entre S e D_ℓ está indisponível. Portanto, o processo de comunicação acontece exclusivamente via cooperação dos *relays*. Considerando de um esquema NOMA no domínio da potência, em uma primeira fase, S transmite de forma simultânea as informações de cada destino, de modo que o sinal transmitido em dado instante t é dado por

$$s(t) = \sqrt{a_1 P_S} x_1(t) + \sqrt{a_2 P_S} x_2(t), \quad (1)$$

em que a_1 e a_2 são os fatores de alocação de potência dos usuários D_1 e D_2 , usados para implementar NOMA, tal que as seguintes relações são satisfeitas: $a_1 > a_2$ e $a_1 + a_2 = 1$; e $x_1(t)$ e $x_2(t)$ são os sinais de interesse dos usuários D_1 e D_2 , respectivamente. Desse modo, o sinal recebido no *relay* R_k é dado por

$$r_k(t) = h_{SR_k} s(t) + h_{RR_k} \sqrt{P_R} v_k(t) + n_{R_k}(t), \quad (2)$$

em que

$$v_k(t) = \beta r_k(t - T_d) \quad (3)$$

é o sinal transmitido pelo k -ésimo *relay* na segunda fase do processo de comunicação, sendo β o fator de amplificação relativo ao protocolo de retransmissão AF, T_d o atraso de processamento da informação no *relay*¹ e $n_{R_k}(t) \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$ é a componente AWGN em R_k . Após recursivas substituições de (2) em (3), assumindo sinais de energia unitária normalizada, tal que $E\{|x_1(t)|^2\} = E\{|x_2(t)|^2\} = 1$, a potência média do sinal retransmitido pelo k -ésimo *relay* pode ser obtida como

$$\begin{aligned} & E\{|v_k(t)|^2\} \\ &= \beta^2 \sum_{j=1}^L (\beta^2 |h_{RR_k}|^2 P_R)^{j-1} [|h_{SR_k}|^2 P_S + N_0] \\ &\stackrel{(b)}{=} \beta^2 (1 - \beta^2 |h_{RR_k}|^2 P_R)^{-1} [|h_{SR_k}|^2 P_S + N_0], \end{aligned} \quad (4)$$

onde L é o comprimento de quadro, tipicamente composto por um grande número de símbolos, de modo que $T_d \ll T_L$, em que $T_L = L T_s$ é a duração do quadro, sendo T_s o período de símbolo. Além disto, no passo (b), considerou-se a expressão de convergência de uma progressão geométrica, com $\beta^2 |h_{RR_k}|^2 P_R < 1$. Portanto, o fator de amplificação no *relay* AF pode ser obtido como

$$\beta^2 = [|h_{SR_k}|^2 P_S + |h_{RR_k}|^2 P_R + N_0]^{-1}. \quad (5)$$

Por outro lado, os sinais recebidos em D_1 e D_2 , vindos de R_k são dados, respectivamente, por

$$y_{D_1}(t) = h_{R_k D_1} \sqrt{P_R} v_k(t) + n_{D_1}(t), \quad (6)$$

$$y_{D_2}(t) = h_{R_k D_2} \sqrt{P_R} v_k(t) + n_{D_2}(t), \quad (7)$$

¹ Assume-se que o atraso T_d é maior que o intervalo de tempo de símbolo do sinal, de modo a evitar a correlação entre os símbolos recebidos e transmitidos pelo *relay* em um certo intervalo de tempo [9].

em que $n_{D_\ell}(t)$, para $\ell=1, 2$, são as componentes AWGN em cada destino.

A partir da análise de sinais, e após algumas manipulações algébricas, a SINR fim-a-fim instantânea recebida em D_1 pode ser obtida como

$$\gamma_{D_1} = \frac{a_1 X_k Y_{k1}}{a_2 X_k Y_{k1} + Y_{k1} U_k + X_k + Y_{k1} + U_k + 1}. \quad (8)$$

Além disso, de acordo com os princípios de NOMA, o usuário mais próximo (usuário mais forte) D_2 precisa primeiramente decodificar a mensagem destinada ao usuário mais afastado (usuário mais fraco) D_1 , o que é factível uma vez que $a_1 > a_2$. Uma vez que a informação do usuário mais fraco é obtida, assume-se que D_2 está apto a decodificar sua própria informação aplicando uma determinada técnica de SIC. Desta forma, as SINRs fim-a-fim instantâneas recebidas em D_2 , relativas a informação do usuário D_1 e a sua própria informação, podem ser expressas, respectivamente, como

$$\gamma_{D_{12}} = \frac{a_1 X_k Y_{k2}}{a_2 X_k Y_{k2} + Y_{k2} U_k + X_k + Y_{k2} + U_k + 1}, \quad (9)$$

$$\gamma_{D_2} = \frac{a_2 X_k Y_{k2}}{Y_{k2} U_k + X_k + Y_{k2} + U_k + 1}. \quad (10)$$

Por outro lado, considerando o critério de PRS baseado no CSI do primeiro-salto, o índice do *relay* selecionado para assistir o processo de comunicação entre a fonte e os destinos é dado por

$$k^* = \arg \max_k (Z_k), \quad (11)$$

onde Z_k é a SINR do primeiro-salto no k -ésimo *relay*, dada por

$$Z_k \triangleq \frac{X_k}{U_k + 1}. \quad (12)$$

III. PROBABILIDADE DE OUTAGE

A. Análise Exata

Nesta seção, a probabilidade de outage exata é analisada para os usuários D_1 e D_2 . Por simplicidade, os limiares de SINR usados para definir o evento de *outage* dos usuários D_1 e D_2 , τ_1 e τ_2 , são assumidos como sendo iguais, isto é $\tau_1 = \tau_2 = \tau$. Além disto, considera-se que $P_S = P_R = P$. Daqui em diante, assumiremos canais independentes e identicamente distribuídos (i.i.d.), tem-se que $\Omega_{SR_k} = \Omega_{SR}$, $\Omega_{R_k D_\ell} = \Omega_{RD_\ell}$ e $\Omega_{RR_k} = \Omega_{RR}$.

1) *Probabilidade de Outage de D_1* : Para um dado limiar de *outage* τ , o evento que define probabilidade de *outage* em D_1 é expresso como

$$\begin{aligned} OP_1 &= \Pr(\gamma_{D_1} < \tau) \\ &= \Pr\left(\frac{a_1 X_{k^*} Y_{k^*1}}{a_2 X_{k^*} Y_{k^*1} + Y_{k^*1} U_{k^*} + X_{k^*} + Y_{k^*1} + U_{k^*} + 1} < \tau\right), \end{aligned} \quad (13)$$

em que k^* refere-se ao índice do *relay* escolhido, de acordo com o critério em (11). De (13), uma expressão analítica exata para a probabilidade de *outage* de D_1 apresentada na seguinte proposição.

Proposição 1: Em um sistema NOMA cooperativo com dois destinos, em que um dentre K *relays* do tipo FD-AF

é escolhido para auxiliar na comunicação entre a fonte e esses destinos, a probabilidade de *outage* exata para o usuário mais fraco, D_1 , é dada por

$$\begin{aligned} OP_1 &= 1 - e^{-\frac{\tau}{\bar{\gamma}_{RD_1}}} \\ &+ \frac{e^{-\frac{\tau}{\bar{\gamma}_{RD_1}}}}{\bar{\gamma}_{RD_1}} \int_0^\infty \left[1 - \frac{e^{-\frac{(y_1 + \tau + 1)\tau}{y_1 \bar{\gamma}_{SR}}}}{1 + \frac{\bar{\gamma}_{RR}(y_1 + \tau + 1)\tau}{y_1 \bar{\gamma}_{SR}}} \right]^K e^{-\frac{y_1}{\bar{\gamma}_{RD_1}}} dy_1, \end{aligned} \quad (14)$$

em que $\bar{\gamma}_{SR} = \gamma_0 \Omega_{SR}$, $\bar{\gamma}_{RD_1} = \gamma_0 \Omega_{RD_1}$, e $\bar{\gamma}_{RR} = \gamma_0 \Omega_{RR}$ denotam as SNRs recebidas médias nos enlaces $S \rightarrow R_k$, $R_k \rightarrow D_1$, e SI , respectivamente, sendo $\gamma_0 = P/N_0$ a SNR transmitida e $\tilde{\tau} \triangleq \tau/(a_1 - a_2\tau)$.

Demonstração: Vide Apêndice I. ■

2) *Probabilidade de outage de D_2* : O usuário D_2 estará em *outage* dada a ocorrência de um dos seguintes eventos: (i) a SINR fim-a-fim de D_2 relativa a informação do usuário mais fraco D_1 , $\gamma_{D_{12}}$, estiver abaixo do limiar τ , o que implica que o processo de SIC em D_2 falha; ou (ii) a SINR fim-a-fim do usuário D_2 após executar com sucesso o processo de SIC, γ_{D_2} , estiver abaixo do limiar τ . Conseqüentemente, a probabilidade de *outage* para o usuário D_2 é definida como

$$OP_2 = \Pr(\gamma_{R_k^* D_{12}} < \tau) + \Pr(\gamma_{R_k^* D_2} < \tau, \gamma_{R_k^* D_{12}} > \tau). \quad (15)$$

Substituindo (9) e (10) em (15), uma expressão analítica exata para a probabilidade de *outage* de D_2 é obtida, como apresentado a seguir.

Proposição 2: Em um sistema NOMA cooperativo com dois destinos, em que um dentre K *relays* do tipo FD-AF é escolhido para auxiliar na comunicação entre a fonte e esses destinos, a probabilidade de *outage* exata para o usuário mais forte, D_2 , é dada por

$$\begin{aligned} OP_2 &= 1 - e^{-\frac{\theta}{\bar{\gamma}_{RD_2}}} \\ &+ \frac{e^{-\frac{\theta}{\bar{\gamma}_{RD_2}}}}{\bar{\gamma}_{RD_2}} \int_0^\infty \left[1 - \frac{e^{-\frac{(y_2 + \theta + 1)\theta}{y_2 \bar{\gamma}_{SR}}}}{1 + \frac{\bar{\gamma}_{RR}(y_2 + \theta + 1)\theta}{y_2 \bar{\gamma}_{SR}}} \right]^K e^{-\frac{y_2}{\bar{\gamma}_{RD_2}}} dy_2, \end{aligned} \quad (16)$$

em que $\bar{\gamma}_{RD_2} = \gamma_0 \Omega_{RD_2}$ denota a SNR do enlace entre R e D_2 , $\theta \triangleq \max\{\tilde{\tau}, \tau'\}$ e $\tau' \triangleq \tau/a_2$.

Demonstração: Vide Apêndice II. ■

Embora as expressões para a probabilidade de *outage* derivadas em (14) e (16) estejam em forma de um integral simples, com o intuito de reduzir ainda mais a complexidade computacional apresentam-se expressões analíticas em forma fechada, derivadas a partir de uma análise assintótica no regime de alta SNR.

B. Análise Assintótica

De (14) e (16), expressões assintóticas em forma fechada são obtidas para as probabilidades de *outage* exata de ambos destinos em alta SNR, as quais são apresentadas nas proposições a seguir.

Proposição 3: Em um sistema NOMA cooperativo com dois destinos, em que um dentre K *relays* do tipo FD-AF

é escolhido para auxiliar na comunicação entre a fonte e esses destinos, a probabilidade de *outage* assintótica para o usuário mais fraco, D_1 , é dada por

$$OP_1 \simeq \left[\frac{\Omega_{RR}\tilde{\tau}}{\Omega_{RR}\tilde{\tau} + \Omega_{SR}} \right]^K. \quad (17)$$

Demonstração: A partir de (14), utilizando as séries de Maclaurin, de forma que $e^x \approx 1+x$, tem-se que, no regime de alta SNR (ou seja, para $\gamma_0 \rightarrow \infty$), uma expressão assintótica em forma fechada para a probabilidade de *outage* de D_1 , é obtida como apresentado em (17). ■

Proposição 4: Em um sistema NOMA cooperativo com dois destinos, em que um dentre K relays do tipo FD-AF é escolhido para auxiliar na comunicação entre a fonte e esses destinos, a probabilidade de *outage* assintótica para o usuário mais forte, D_2 , é dada por

$$OP_2 \simeq \left[\frac{\Omega_{RR}\theta}{\Omega_{RR}\theta + \Omega_{SR}} \right]^K. \quad (18)$$

Demonstração: Similar à demonstração da Proposição 3. ■

IV. RESULTADOS NUMÉRICOS

Nesta seção, exemplos ilustrativos são considerados para avaliar o desempenho dos usuários D_1 e D_2 em termos da probabilidade de *outage*. Além do mais, as expressões analíticas obtidas na Seção III são validadas por meio de simulações de Monte Carlo. Para este propósito, considera-se uma topologia linear em que as distâncias normalizadas dos enlaces $S \rightarrow D_\ell$, $S \rightarrow R_k$, $R_k \rightarrow D_\ell$ são dadas, respectivamente, por $d_{SD_1} = 1$; $d_{SR_k} = 0,5$; $d_{R_k D_1} = 0,5$ e $d_{R_k D_2} = 0,25$ de modo que $|h_{R_k D_1}|^2 < |h_{R_k D_2}|^2$. Além disto, considera-se que os ganhos médios de todos os enlaces são determinados pela perda de percurso, tal que $\Omega_A = d_A^{-\alpha}$, para $A \in \{SR_k, R_k D_\ell\}$, em que d_A é a distância entre dois nós e $\alpha = 4$ é o expoente de perda de percurso. Para os cenários a seguir, considera-se um limiar de *outage* igual a $\tau = 0$ dB. A Fig. 1 mostra o desempenho em termos da probabilidade de *outage* para os destinos D_1 e D_2 , que acessam o canal usando NOMA, em função da SNR transmitida, para diferentes valores de números de relays $K = 1, 2, 3$. Os fatores de alocação de potência dos usuários D_1 e D_2 assumem valores de $a_1 = 0,7$ e $a_2 = 0,3$, respectivamente, e o ganho médio do canal de SI é considerado como $\Omega_{RR} = -10$ dB. Da Fig. 1, note que as expressões derivadas da análise exata, dadas em (14) e (16), ajustam-se perfeitamente com as obtidas pelas simulações de Monte Carlo. Note que as curvas de *outage* apresentam um patamar no regime de alta SNR, resultando em um sistema com ordem de diversidade igual a zero, o que corrobora-se por meio das expressões assintóticas obtidas em (17) e (18). Tal valor na ordem de diversidade do sistema deve-se ao efeito deletério da SI residual nos relays FD, o mesmo que se acentua à medida que a potência transmitida aumenta, impedindo assim uma melhora no desempenho do sistema. Por outro lado, observa-se que, a medida que o número de relays aumenta, o valor do patamar de *outage* diminui e, conseqüentemente, o desempenho do sistema é melhorado, como esperado. Entretanto, observa-se que no regime de baixa SNR, o aumento do número de relays para $K \geq 2$, apenas apresenta melhora de desempenho para o

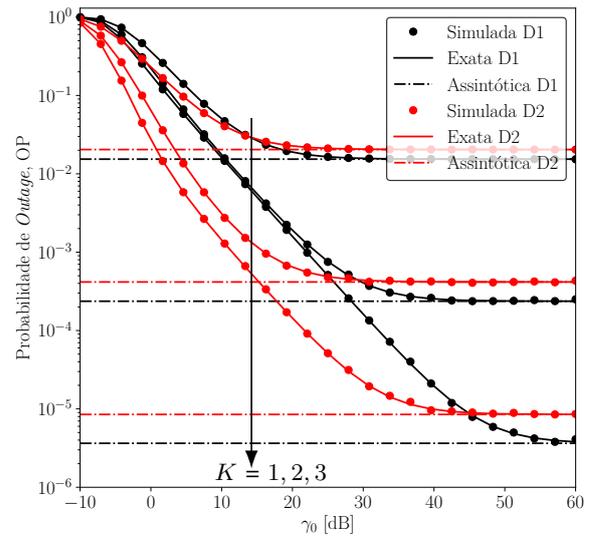


Fig. 1. Probabilidade de *Outage* de usuários que acessam o canal por NOMA, D_1 e D_2 , versus SNR transmitida para diferentes números de relays $K = 1, 2$ e 3, considerando um canal de SI de ganho médio $\Omega_{RR} = -10$ dB e fatores de alocação de potência $(a_1; a_2) = (0,7; 0,3)$.

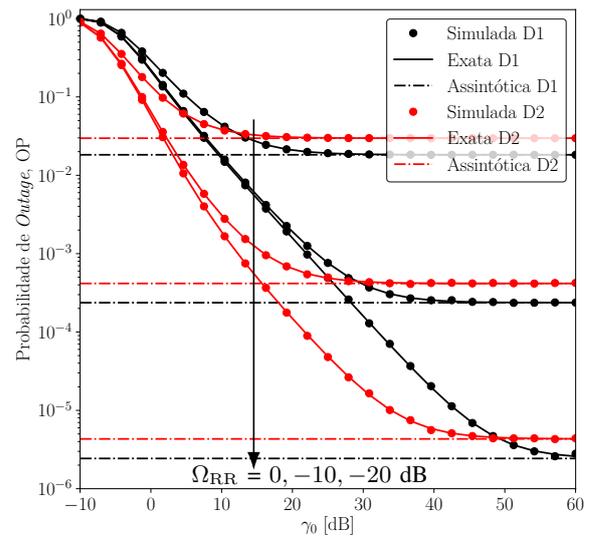


Fig. 2. Probabilidade de *Outage* de usuários que acessam o canal por NOMA, D_1 e D_2 , versus SNR transmitida para diferentes valores de ganho médio do canal de SI $\Omega_{RR} = 0, -10$ e -20 dB, considerando o número de relays $K = 2$ e fatores de alocação de potência $(a_1; a_2) = (0,7; 0,3)$.

usuário mais forte, D_2 , uma vez que este apresenta uma perda de percurso menos severa do que D_1 , por estar mais próximo dos relays. Fato que não se aplica ao usuário mais fraco, requerendo-se de valores maiores de SNR transmitida para explorar os benefícios da diversidade cooperativa. A Fig. 2 mostra a probabilidade de *outage* para ambos os destinos, D_1 e D_2 , em função da SNR transmitida para diferentes valores de ganho médio do canal de SI, $\Omega_{RR} = 0, -10$ e -20 dB, considerando $K = 2$ e $(a_1; a_2) = (0,7; 0,3)$. A partir desta figura, note que conforme Ω_{RR} decresce, o nível de *outage* também diminui, como esperado. Estes resultados reforçam a importância da utilização de técnicas de cancelamento de SI

altamente eficazes.

V. CONCLUSÕES

Este trabalho analisou o desempenho em termos da probabilidade de *outage* para um sistema baseado em NOMA cooperativo consistindo de dois usuários em que um esquema de seleção parcial dentre múltiplos *relays* do tipo FD-AF é aplicado. Foram derivadas expressões analíticas exatas para a probabilidade de *outage* de ambos os usuários mais próximo e mais afastado. Simulações de Monte Carlo foram realizadas para validar a precisão das expressões analíticas obtidas. Os resultados numéricos mostraram que patamares de desempenho de *outage* ocorrem devido à SI residual presente nos *relays* FD, levando o sistema a apresentar ordem de diversidade nula. Em vista disto, com o intuito de reduzir a complexidade computacional, foram obtidas expressões em forma fechada para probabilidade de *outage* a partir da análise assintótica em alta SNR, onde caracterizou-se o patamar de *outage* em termos dos parâmetros do sistema. Observou-se ainda que o nível deste patamar é reduzido à medida que o número de *relays* aumenta ou o ganho médio do canal de SI diminui.

APÊNDICE I

DEMONSTRAÇÃO DA PROPOSIÇÃO 1

Na sequência, a probabilidade de *outage* exata para o usuário mais fraco D_1 é derivada. De (12) e (13) tem-se que

$$\begin{aligned}
 \text{OP}_1 &= \Pr\left(\frac{a_1 Z_{k^*} Y_{k^*1}}{a_2 Z_{k^*} Y_{k^*1} + Z_{k^*} + Y_{k^*1} + 1} < \tau\right) \\
 &= \Pr\left(Z_{k^*} < \frac{\tilde{\tau}(Y_{k^*1} + 1)}{Y_{k^*1} - \tilde{\tau}}\right) \\
 &\stackrel{(c)}{=} \sum_{k=1}^K \left[\Pr\left(Z_k < \frac{\tilde{\tau}(Y_{k1} + 1)}{Y_{k1} - \tilde{\tau}} \mid k^* = k\right) \prod_{\substack{j=1 \\ j \neq k}}^K \Pr(Z_j < Z_k) \right] \\
 &\stackrel{(d)}{=} K \left[\int_0^{\tilde{\tau}} \int_0^{\infty} [F_Z(z)]^{K-1} f_Z(z) f_{Y_1}(y_1) dz dy_1 \right] \\
 &\quad + K \left[\int_{\tilde{\tau}}^{\infty} \int_0^{\frac{\tilde{\tau}(y_1+1)}{y_1-\tilde{\tau}}} [F_Z(z)]^{K-1} f_Z(z) f_{Y_1}(y_1) dz dy_1 \right] \\
 &= F_{Y_1}(\tilde{\tau}) + \int_{\tilde{\tau}}^{\infty} \left[F_Z\left(\frac{(y_1+1)\tilde{\tau}}{y_1-\tilde{\tau}}\right) \right]^K f_{Y_1}(y_1) dy_1, \quad (19)
 \end{aligned}$$

onde em (c) aplicou-se o Teorema da Probabilidade Total e em (d) considerou-se a suposição de canais i.i.d. Além disto, $F_{Y_1}(y_1) = 1 - \exp(-y_1/\bar{\gamma}_{RD_1})$ e $f_{Y_1}(y_1) = (1/\bar{\gamma}_{RD_1}) \exp(-y_1/\bar{\gamma}_{RD_1})$ são respectivamente a CDF e a PDF de uma variável aleatória exponencial de valor médio $\bar{\gamma}_{RD_1}$. Além do mais, a CDF de Z_k pode ser obtida como

$$\begin{aligned}
 F_Z(z) &= \Pr\left(\frac{X_k}{U_k + 1} < z\right) = \int_0^{\infty} F_X(z(u+1)) f_U(u) du \\
 &= 1 - \frac{e^{-\frac{z}{\bar{\gamma}_{SR}}}}{1 + (\bar{\gamma}_{RR}/\bar{\gamma}_{SR})z}, \quad (20)
 \end{aligned}$$

em que $F_X(x) = 1 - \exp(-x/\bar{\gamma}_{SR})$ e $f_U(u) = (1/\bar{\gamma}_{RR}) \exp(-u/\bar{\gamma}_{RR})$ são a CDF e a PDF de variáveis aleatórias exponenciais de médias $\bar{\gamma}_{SR}$ e $\bar{\gamma}_{RR}$, respectivamente. Então, após a substituir (20) em (19), a probabilidade de *outage* exata para o usuário mais fraco, D_1 , é obtida como apresentado em (14).

APÊNDICE II

DEMONSTRAÇÃO DA PROPOSIÇÃO 2

Na sequência é derivado a probabilidade de *outage* para o usuário mais forte D_2 . De (12) e (15), seguindo um procedimento similar àquela apresentado na demonstração da Proposição 1, obtém-se que

$$\begin{aligned}
 \text{OP}_2 &\stackrel{(e)}{=} \Pr\left(\frac{Z_{k^*} Y_{k^*2}}{Z_{k^*} + Y_{k^*2} + 1} < \tilde{\tau}\right) + \Pr\left(\frac{Z_{k^*} Y_{k^*2}}{Z_{k^*} + Y_{k^*2} + 1} < \tau'\right) \\
 &\quad - \Pr\left(\frac{Z_{k^*} Y_{k^*2}}{Z_{k^*} + Y_{k^*2} + 1} < \tilde{\tau}, \frac{Z_{k^*} Y_{k^*2}}{Z_{k^*} + Y_{k^*2} + 1} < \tau'\right) \\
 &\stackrel{(f)}{=} \Pr\left(\frac{Z_{k^*} Y_{k^*2}}{Z_{k^*} + Y_{k^*2} + 1} < \max\{\tilde{\tau}, \tau'\} \triangleq \theta\right) \\
 &= \Pr\left(Z_{k^*} < \frac{(Y_{k^*2} + 1)\theta}{Y_{k^*2} - \theta}\right), \quad (21)
 \end{aligned}$$

onde em (e) aplicou-se a identidade $\Pr(A, B) = \Pr(A) - \Pr(A, \bar{B})$; e em (f) considerou-se que a ocorrência do evento de menor valor entre $\tilde{\tau}$ e τ' no evento conjunto em (e) implica na ocorrência do outro evento; logo, a probabilidade de *outage* é determinada por $\max\{\tilde{\tau}, \tau'\}$. A partir de (21), seguindo um procedimento similar à demonstração da Proposição 1, tem-se que

$$\text{OP}_2 = F_{Y_2}(\theta) + \int_{\theta}^{\infty} \left[F_Z\left(\frac{(y_2+1)\theta}{y_2-\theta}\right) \right]^K f_{Y_2}(y_2) dy_2, \quad (22)$$

em que $F_{Y_2}(y_2) = 1 - \exp(-y_2/\bar{\gamma}_{RD_2})$ e $f_{Y_2}(y_2) = (1/\bar{\gamma}_{RD_2}) \exp(-y_2/\bar{\gamma}_{RD_2})$ são a CDF e a PDF de uma variável aleatória exponencial de valor médio $\bar{\gamma}_{RD_2}$, respectivamente; $F_Z(\cdot)$ é dado em (20). Portanto, desenvolvendo (22), a probabilidade de *outage* exata para o usuário mais forte, D_2 , é obtida como em (16).

REFERÊNCIAS

- [1] H. Tullberg, P. Popovski, Z. Li, M. A. Uusitalo, A. Hoglund, O. Bulakci, M. Fallgren, and J. F. Monserrat, "The METIS 5G System Concept: Meeting the 5G Requirements" *IEEE Commun. Magazine*, vol. 54, no. 12, pp. 132–139, Dec. 2016.
- [2] Y. Liu, Z. Qin, M. El-kashlan, Z. Ding, A. Nallanathan, and L. Hanzo, "Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond," *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 12, pp. 2347–2381, Dec. 2017.
- [3] S. M. R. Islam, N. Avazov, O. A. Dobre and K. s. Kwak, "Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges," in *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 721–742, Oct. 2016.
- [4] S. Lee, D. B. da Costa, Q. T. Vien, T. Q. Duong, and R. T. de Sousa, "Non-orthogonal multiple access schemes with partial relay selection," *IET Commun.*, vol. 11, no. 6, pp. 846–854, Apr. 2017.
- [5] N. Guo, J. Ge, C. Zhang, Q. Bu and P. Tian, "Non-orthogonal multiple access in full-duplex relaying system with Nakagami- m fading," *IET Commun.*, vol. 13, no. 3, pp. 271–280, Feb. 2019.
- [6] Y. Li, Y. Li, X. Chu, Y. Ye and H. Zhang, "Performance analysis of relay selection in cooperative NOMA networks," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 4, pp. 760–763, Apr. 2019.
- [7] J. Laneman, D. 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.
- [8] D. Korpi, M. Heinö, C. Icheln, K. Haneda and M. Valkama, "Compact inband full-duplex relays with beyond 100 dB self-interference suppression: Enabling techniques and field measurements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 65, no. 2, pp. 960–965, Feb. 2017.
- [9] D. P. Moya Osorio, E. E. Benitez Olivo, H. Alves, J. C. S. Santos Filho, and M. Latva-aho, "Exploiting the direct link in full-duplex amplify-and-forward relaying networks," *IEEE Sig. Process. Lett.*, vol. 22, no. 10, pp. 1766–1770, Oct. 2015.
- [10] I. Krikidis, H. Suraweera, P. Smith, and C. Yuen, "Full-duplex relay selection for amplify-and-forward cooperative networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 12, pp. 4381–4393, Dec. 2012.