

# Sistema MIMO-NOMA Cooperativo com Seleção de Antena e Retransmissão DF

Joab Costa Rodrigues Lima, Jéssica de Paulo Rodrigues, Daniel Benevides da Costa, Ugo Silva Dias e Rafael Timóteo de Sousa Jr.

**Resumo**— Este artigo investiga o desempenho de um sistema cooperativo com múltiplas antenas e empregando acesso múltiplo não-ortogonal para a transmissão da informação. Em particular, uma estação base utiliza a técnica de codificação por superposição para se comunicar simultaneamente com um par de usuários através da ajuda de um *relay* do tipo decodifica-e-encaminha. O esquema de seleção de antena transmissora e a técnica de combinação por seleção são empregadas na estação base e nos usuários, respectivamente. Expressões em forma fechada para a probabilidade de *outage* são obtidas e através delas uma análise assintótica é realizada. Exemplos numéricos representativos são apresentados com o intuito de investigar o efeito do número de antenas, coeficientes de alocação de potência, bem como a distância entre os terminais, no desempenho sistêmico. Por fim, simulações computacionais são apresentados para validar os resultados analíticos.

**Palavras-Chave**— Acesso múltiplo não-ortogonal, cancelamento sucessivo de interferência, codificação por superposição, diversidade cooperativa, múltiplas antenas, probabilidade de *outage*.

**Abstract**— This paper investigates the performance of a cooperative system with multiple antennas and employing non-orthogonal multiple access for the information transmission. In particular, a multi-antenna base station uses superposition coding to communicate simultaneously with a pair of multi-antenna users by the aid of a single-antenna decode-and-forward relay. The transmit antenna selection scheme and the selection combining technique are employed in the base station and users, respectively. Closed-form expressions for the outage probability are obtained and based on them an asymptotic analysis is performed. Representative numerical examples are presented with the purpose of investigating the effect of antenna number, power allocation coefficients, as well as the distance between the terminals, in the system performance. Finally, computational simulations are presented to validate the analytical results.

**Keywords**— Non-orthogonal multiple access, successive interference cancelation, superposition coding, cooperative diversity, multiple antennas, outage probability.

J. C. R. Lima e D. B. da Costa, Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Ceará, Sobral-CE, E-mails: joabcr@gmail.com, danielbcosta@ieee.org.

J. de P. Rodrigues, Centro de Ciências Exatas e Tecnologia, Universidade Estadual Vale do Acaraú, Sobral-CE, E-mail: jessicadpaulo@gmail.com.

U. S. Dias e R. T. de Sousa Jr., Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, Emails: ugodias@ieee.org, desousa@unb.br.

O trabalho foi financiado em partes pela FUNCAP via edital PRONEM 01/2016.

Os autores agradecem o apoio das Agências brasileiras de pesquisa, desenvolvimento e inovação CAPES (Projeto FORTE 23038.007604/2014-69), CNPq (Projeto INCT em Segurança Cibernética 465741/2014-2) e Fundação de Apoio à Pesquisa do Distrito Federal FAPDF (Projetos UIoT 0193.001366/2016 e SSDDC 0193.001365/2016), bem como ao Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão/SPO (TED 005/2016 DIPLA e TED 011/2016 SEST), ao Gabinete de Segurança Institucional da Presidência da República (TED 002/2017) e à Defensoria Pública da União (TED DPGU 066/2016).

## I. INTRODUÇÃO

Acesso múltiplo não-ortogonal (NOMA, do inglês *Non-Orthogonal Multiple Access*) tem surgido como uma tecnologia promissora para atender as demandas heterogêneas das redes sem fio da próxima geração, o que justifica a grande atenção que tem recebido recentemente da comunidade científica como sendo uma das técnicas a serem aplicadas nas redes móveis de quinta geração (5G) [1], [2]. NOMA é fundamentalmente diferente dos esquemas convencionais de acesso múltiplo ortogonal (OMA, do inglês *Orthogonal Multiple Access*). Em OMA, os recursos de comunicação, seja tempo, frequência ou código, são aproveitados por cada usuário de maneira ortogonal. Por sua vez, o princípio NOMA tem uma definição mais ampla, onde vários esquemas de acesso múltiplo propostos recentemente podem ser vistos como casos especiais dessa técnica. A ideia principal por trás de NOMA é servir múltiplos usuários no mesmo bloco de recurso, tais como: intervalo de tempo, subportadora, código de espalhamento, entre outros. NOMA oferece várias vantagens para suprir as demandas das redes móveis de próxima geração, como melhor eficiência espectral, maior *throughput*, baixa latência de transmissão, alta confiabilidade, conectividade massiva e maior justiça entre os usuários [3].

Neste artigo, será considerado NOMA no domínio da potência, uma das variações de NOMA em que as informações de vários usuários são sobrepostas no domínio da potência e transmitidas simultaneamente. No receptor o sinal sobreposto é separado usando cancelamento sucessivo de interferência (SIC, do inglês *Successive Interference Cancellation*) através da decodificação dos sinais um a um até encontrar o sinal desejado. De maneira geral, em NOMA uma menor potência de transmissão é alocada para os usuários com melhores condições de canal ao passo em que uma maior potência de transmissão é alocada aos usuários com piores condições de canal, buscando o equilíbrio entre taxa de transferência do sistema e justiça do usuário [4]. Vários trabalhos mostram que o NOMA pode alcançar um desempenho superior ao OMA, como relatado em [5].

Por outro lado, a retransmissão cooperativa se tornou uma tecnologia importante para combater o desvanecimento, aumentar a cobertura dos serviços de rede e melhorar a capacidade do sistema [6]. Além disso, a implantação de múltiplas antenas nos terminais da rede aumenta significativamente a confiabilidade da transmissão e pode aumentar a capacidade do sistema sem causar expansão da largura de banda. Diante da eficiência dessa técnica na melhoria do desempenho dos sistemas de comunicação, ao longo dos últimos anos vários

artigos investigaram a retransmissão cooperativa em sistemas NOMA [4], [7], [8], [9], e estes trabalhos serão brevemente discutidos na sequência.

Em [10], um esquema cooperativo NOMA é proposto no qual os usuários com melhores condições de canal atuam como *relays* para melhorar a retransmissão dos usuários com condições ruins de canais. Em [11], um cenário semelhante é considerado para uma rede de retransmissão amplifica-e-encaminha (AF, do inglês *Amplify-and-Forward*) sobre canais de desvanecimento Nakagami- $m$ . Utilizando *relays* dedicados, o trabalho [12] estuda um cenário NOMA cooperativo com transmissão de informações e transferência de energia simultâneos, onde usuários localizados próximos da fonte agem como *relays* na colheita de energia para ajudar os usuários NOMA. O impacto da seleção de *relays* em sistemas NOMA cooperativo foi estudado em [13] e [14]. A análise de um sistema MIMO com NOMA cooperativo foi abordada em [15]. Em [9], um sistema MIMO baseado em NOMA AF cooperativo, considerando o desvanecimento Nakagami- $m$  e aplicando um esquema de seleção de antenas transmissoras (TAS, do inglês *Transmit Antenna Selection*) foi estudado. Outros trabalhos, [16], [17] introduziram a ideia de NOMA cooperativo com múltiplas antenas utilizando colheita de energia pelo *relay* de retransmissão e um esquema TAS para a seleção da antena de transmissão. Comum a maioria desses trabalhos é que a retransmissão acontece utilizando o protocolo AF.

Neste artigo, considera-se um sistema NOMA cooperativo com múltiplas antenas transmissoras na estação base, uma única antena no *relay*, e múltiplas antenas nos dois usuários móveis. Canais com desvanecimento Rayleigh são assumidos. Diferentemente de outros trabalhos, a retransmissão acontece sobre o protocolo decodifica-e-encaminha (DF, do inglês *Decode-and-Forward*). Os dois usuários da rede são ordenados de acordo com a qualidade dos canais entre o nó de retransmissão e os mesmos. Além disso, a antena transmissora que maximiza o ganho do canal entre a estação base e nó *relay* é selecionada enquanto que a combinação por seleção (SC, do inglês *Selection Combining*) é aplicada aos usuários móveis. O desempenho de *outage* da rede é estudado e expressões em forma fechada para a probabilidade de *outage* dos dois usuários são obtidas. Além disso, o comportamento de *outage* assintótico em regiões de alta relação sinal-ruído (SNR, do inglês *Signal-to-Noise Ratio*) é investigado, onde a ordem de diversidade de cada usuário é determinada. Por fim, simulações numéricas são realizadas para verificar a análise teórica.

## II. MODELO SISTÊMICO

Considera-se um cenário MIMO-NOMA cooperativo de dois saltos, como mostrado na Figura 1, em que uma estação base (S) transmite simultaneamente os sinais de dois usuários (usuário distante - U1, usuário próximo - U2) com a ajuda de um *relay* R dedicado do tipo DF. Todos os nós operam no modo *half-duplex*. A estação base e os usuários são equipados com M e N antenas transmissoras e receptoras, respectivamente, e o *relay* é equipado com uma única antena e retransmite o sinal utilizando o protocolo DF. Sem perda de generalidade, uma topologia de rede homogênea é considerada

e a distância entre os nós são denotadas como  $d_{SR}$ ,  $d_1$  e  $d_2$ , entre S-R, R-U1 e R-U2, respectivamente, em que  $d_1 > d_2$ . Devido a longa distância ou obstáculos significativos entre S e os usuários móveis, nenhum *link* direto existe entre eles. Os *links* sem fio experimentam desvanecimento Rayleigh não seletivo em frequência e um ruído aditivo gaussiano branco (AWGN, do inglês *Additive White Gaussian Noise*). Considera-se também que S possui informações do estado do canal (CSI, do inglês *Channel State Information*) de todos os links. Com base nos valores do CSI, S aloca potência para cada usuário móvel de maneira fixa. A transmissão de S para os usuários é dividida em duas fases e seleção de antena é empregado. Em particular, TAS é usado na primeira fase, enquanto SC é utilizado na segunda fase.

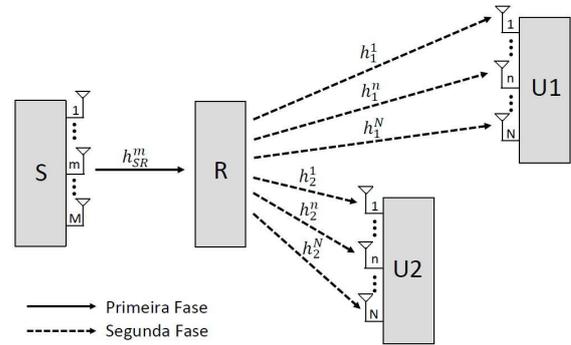


Fig. 1. Sistema MIMO-NOMA Cooperativo com Relay Dedicado DF.

Os coeficientes do canal correspondente ao *link* S-R são denotados por  $h_{SR}^m \sim \mathcal{CN}(0, \beta_{SR}^m)$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ . Assume-se também que os coeficientes dos canais para os *links* R-U1 e R-U2 são denotados por  $h_{R1}^n \sim \mathcal{CN}(0, 1)$  e  $h_{R2}^n \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ , respectivamente.

Na primeira fase, S seleciona uma antena transmissora que maximize o ganho de canal entre S e R, e usa a única antena selecionada para transmitir o sinal sobreposto  $x_S$  para U1 e U2 com o auxílio de R. O sinal sobreposto  $x_S$  pode ser expresso como  $x_S = \sum_{i=1}^2 \sqrt{a_i P_S} x_i$ , em que  $a_i$  é o coeficiente de alocação de potência para U $_i$ ,  $x_i$  é a mensagem destinada a U $_i$  ( $i = 1, 2$ ), e  $P_S$  é a potência transmitida por S. Seguindo o princípio de NOMA, assume-se que  $|a_1| > |a_2|$  devido  $|h_1|^2 < |h_2|^2$ , com  $\sum_{i=1}^2 a_i = 1$ .

O sinal recebido por R da  $m$ -ésima antena é dado por:

$$y_R^m = h_{SR}^m \sqrt{\frac{P_S}{d_{SR}^\tau}} \sum_{i=1}^2 \sqrt{a_i} x_i + \eta_R, \quad (1)$$

em que  $h_{SR}^m$  é o coeficiente do canal associado a  $m$ -ésima antena de S,  $\eta_R \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$  denota o ruído AWGN no *relay* e  $\tau$  é o coeficiente de perda de percurso.

O *relay* R recebe o sinal da fonte e implementa SIC. Primeiro  $x_1$  é decodificado e removido do sinal recebido. Então,  $x_2$  é decodificado do sinal remanescente. Considerando SIC perfeito, a relação sinal-ruído mais interferência (SNIR, do inglês *Signal-to-Noise-plus-Interference Ratio*) associada a decodificação de  $x_1$  e a SNR associada a decodificação de  $x_2$

são expressas, respectivamente, por:

$$\gamma_{R1}^m = \frac{|h_{SR}^m|^2 a_1 \rho_S}{|h_{SR}^m|^2 a_2 \rho_S + d_{SR}^\tau}, \quad (2)$$

$$\gamma_{R2}^m = \frac{|h_{SR}^m|^2 a_2 \rho_S}{d_{SR}^\tau}. \quad (3)$$

em que  $\rho_S = \frac{P_S}{N_0}$ .

Considerando o esquema TAS em S, a antena selecionada  $m^*$  é calculada como  $m^* = \arg \max_{1 \leq m \leq M} |h_{SR}^m|$ . Dessa forma, a SINR para  $x_1$  e a SNR para  $x_2$  são dadas, respectivamente por  $\gamma_{R1} = \max_{1 \leq m \leq M} \{\gamma_{R1}^m\}$  e  $\gamma_{R2} = \max_{1 \leq m \leq M} \{\gamma_{R2}^m\}$  na primeira fase.

Na segunda fase, o *relay* retransmite o sinal sobreposto detectado  $x_R$  para U1 e U2. O sinal  $x_R$  pode ser escrito como  $x_R = \sum_{i=1}^2 \sqrt{P_R b_i} \tilde{x}_i$ , em que  $b_i$  é o coeficiente de alocação de potência no *relay*, com  $\sum_{i=1}^2 b_i = 1$ ,  $P_R$  é a potência transmitida por R e  $\tilde{x}_i$  é a mensagem detectada e encaminhada de U1 e U2.

O sinal recebido por Ui pela  $n$ -ésima antena receptora é descrito por:

$$y_i^n = h_i^n \sqrt{\frac{P_R}{d_i^\tau}} (\sqrt{b_i} \tilde{x}_i + b_j \tilde{x}_j) + \eta_i^n, \quad (4)$$

em que  $\eta_i^n \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$  é o ruído AWGN e  $h_i^n$  é o coeficiente do canal R-Ui para a  $n$ -ésima antena. U1 trata a mensagem  $\tilde{x}_2$  como ruído para adquirir a mensagem  $\tilde{x}_1$  de (4). Dessa forma, a SINR recebida em U1 é dada por:

$$\gamma_1^n = \frac{|h_1^n|^2 b_1 \rho_R}{|h_1^n|^2 b_2 \rho_R + d_1^\tau}, \quad (5)$$

em que  $\rho_R = \frac{P_R}{N_0}$ .

U2 implementa SIC para detectar  $\tilde{x}_1$  considerando sua própria mensagem como ruído. A SINR pode ser escrita como:

$$\gamma_{2 \rightarrow 1} = \frac{|h_2^n|^2 \beta_1 \rho_R}{|h_2^n|^2 \beta_2 \rho_R + d_2^\tau}. \quad (6)$$

Considerando SIC perfeito, U2 extrai a mensagem detectada do sinal remanescente e finalmente detecta sua própria mensagem com a seguinte SNR:

$$\gamma_2^n = \frac{|h_2^n|^2 \beta_2 \rho_R}{d_2^\tau}. \quad (7)$$

Finalmente, os usuários combinam os sinais das  $N$  antenas, empregando SC para excluir os efeitos dos *links* mais fracos, de tal forma que a SINR e a SNR alcançáveis pelos dois usuários são expressas, respectivamente, como  $\gamma_1 = \max_{1 \leq n \leq N} \{\gamma_1^n\}$  e  $\gamma_2 = \max_{1 \leq n \leq N} \{\gamma_2^n\}$ .

Dessa forma, a taxa atingível para as mensagens dedicadas para os usuários U1 e U2 podem ser determinadas como:

$$R_i = \frac{1}{2} \log_2(1 + \min(\gamma_{Ri}, \gamma_i)), i = 1, 2. \quad (8)$$

### III. PROBABILIDADE DE OUTAGE

O desempenho da rede cooperativa NOMA em estudo será investigado em termos da probabilidade de *outage*. Para este fim, expressões exatas e em forma fechada serão obtidas. Além disso, uma análise assintótica será realizada com o intuito de determinar a ordem de diversidade para cada usuário.

A probabilidade de *outage* de cada usuário pode ser definida como a probabilidade de ocorrência de um evento de interrupção quando a taxa alcançada para cada usuário é menor que a taxa mínima de desempenho aceitável. Dessa forma, a probabilidade de *outage* para U1 e U2 pode ser expressa como:

$$P_{\text{out}}^i = \Pr \{R_i < R_{th}\}, i = 1, 2, \quad (9)$$

em que  $\Pr\{\cdot\}$  denota probabilidade e  $R_{th}$  representa o limiar da taxa de desempenho mínima aceitável.

Como os coeficientes de canal seguem uma distribuição de Rayleigh, a função densidade de probabilidade (PDF, do inglês *Probability Density Function*) de  $z_j = |h_j|^2$  ( $j \in \{SR, 1, 2\}$ ) é dada por  $f_{z_j}(z) = 1/\bar{z}_j e^{-z/\bar{z}_j}$ , onde  $\bar{z}_j = E[z_j]$ , com  $E[\cdot]$  simbolizando média estatística.

Para U1, (9) pode ser reescrita alternativamente como:

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^1 &= \Pr \{ \min(\gamma_{R1}, \gamma_1) < u \} = 1 - \Pr \{ \gamma_{R1} > u \} \Pr \{ \gamma_1 > u \} \\ &= 1 - \Pr \{ \max_{1 \leq m \leq M} \{ \gamma_{R1}^m \} > u \} \Pr \{ \max_{1 \leq n \leq N} \{ \gamma_1^n \} > u \}, \end{aligned} \quad (10)$$

em que  $u = 2^{2R_{th}} - 1$ . Representando a função de distribuição acumulada (CDF, do inglês *Cumulative Distribution Function*) de uma variável aleatória arbitrária  $X$  como  $F_X(\cdot)$ , segue que:

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^1 &= 1 - (1 - (\Pr \{ \gamma_{R1}^m \leq u \})^M) (1 - (\Pr \{ \gamma_1^n \leq u \})^N) \\ &= (F_{\gamma_{R1}^m}(u))^M + (F_{\gamma_1^n}(u))^N - (F_{\gamma_{R1}^m}(u))^M * (F_{\gamma_1^n}(u))^N, \end{aligned} \quad (11)$$

em que:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{R1}^m}(u) &= \Pr \left\{ \frac{|h_{SR}^m|^2 a_1 \rho_S}{|h_{SR}^m|^2 a_2 \rho_S + d_{SR}^\tau} \leq u \right\} \\ &= F_{|h_{SR}^m|^2} \left( \frac{u d_{SR}^\tau}{\rho_S v} \right) = 1 - e^{-\frac{u d_{SR}^\tau}{\rho_S v \beta_{SR}^m}}, \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} F_{\gamma_1^n}(u) &= \Pr \left\{ \frac{|h_1^n|^2 b_1 \rho_R}{|h_1^n|^2 b_2 \rho_R + d_1^\tau} \leq u \right\} \\ &= F_{|h_1^n|^2} \left( \frac{u d_1^\tau}{\rho_R w} \right) = 1 - e^{-\frac{u d_1^\tau}{\rho_R w \beta_1}}, \end{aligned} \quad (13)$$

onde  $v = a_1 - u a_2$  e  $w = b_1 - u b_2$ .

Substituindo (12) e (13) em (11), a probabilidade de *outage* para U1 é obtida.

Similarmente, para U2, (9) pode ser reescrita alternativamente como:

$$\begin{aligned} P_{\text{out}}^2 &= \Pr \{ \min(\gamma_{R2}, \gamma_2) < u \} \\ &= (F_{\gamma_{R2}^m}(u))^M + (F_{\gamma_2^n}(u))^N - (F_{\gamma_{R2}^m}(u))^M * (F_{\gamma_2^n}(u))^N, \end{aligned} \quad (14)$$

em que:

$$\begin{aligned} F_{\gamma_2^n}(u) &= \Pr \left\{ \frac{|h_2^n|^2 b_2 \rho_R}{d_2^\tau} \leq u \right\} \\ &= F_{|h_2^n|^2} \left( \frac{u d_2^\tau}{b_2 \rho_R} \right) = 1 - e^{-\frac{u d_2^\tau}{b_2 \rho_R \beta_2^m}}, \end{aligned} \quad (15)$$

e

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{R2}^m}(u) &= \Pr \left\{ \frac{|h_{SR}^m|^2 a_2 \rho_S}{d_{SR}^\tau} \leq u \right\} \\ &= F_{|h_{SR}^m|^2} \left( \frac{u d_{SR}^\tau}{a_2 \rho_S} \right) = 1 - e^{-\frac{u d_{SR}^\tau}{a_2 \rho_S \beta_{SR}^m}}. \end{aligned} \quad (16)$$

Fazendo a substituição de (15) e (16) em (14) a probabilidade de *outage* para U2 é obtida.

#### IV. PROBABILIDADE DE OUTAGE ASSINTÓTICA

Com base nos resultados precedentes, realizar-se-á agora uma análise de *outage* assintótica para U1 e U2 com o intuito de avaliar o comportamento da  $P_{\text{out}}^1$  e  $P_{\text{out}}^2$ , respectivamente, para regimes de alta SNR.

Assim como em trabalhos anteriores, definimos a SNR de transmissão como  $\rho = \rho_S = \rho_R$ . Usando o fato de que  $e^{-a/x} \approx 1 - a/x$  quando  $x \rightarrow \infty$ , temos que:

$$F_{\gamma_{R1}^{\rho \rightarrow \infty}}(u) = 1 - \left( 1 - \frac{u d_{SR}^\tau}{\rho v \beta_{SR}^m} \right) = \frac{u d_{SR}^\tau}{\rho v \beta_{SR}^m}, \quad (17)$$

$$F_{\gamma_1^{\rho \rightarrow \infty}}(u) = 1 - \left( 1 - \frac{u d_1^\tau}{\rho w \beta_1^m} \right) = \frac{u d_1^\tau}{\rho w \beta_1^m}. \quad (18)$$

Sabendo que  $P_{\text{out}}^1 = (F_{\gamma_{R1}^m}(u))^M + (F_{\gamma_1^n}(u))^N - (F_{\gamma_{R1}^m}(u))^M * (F_{\gamma_1^n}(u))^N$  e dado que  $(F_{\gamma_{R1}^m}(u))^M * (F_{\gamma_1^n}(u))^N \ll (F_{\gamma_{R1}^m}(u))^M + (F_{\gamma_1^n}(u))^N$  quando  $\rho \rightarrow \infty$ , uma expressão assintótica para a probabilidade de *outage* pode ser determinada como:

$$P_{\text{out}, \rho \rightarrow \infty}^1 = \begin{cases} (F_{\gamma_{R1}^m}(u))^M, & \text{se } M < N, \\ (F_{\gamma_{R1}^m}(u))^M + (F_{\gamma_1^n}(u))^N, & \text{se } M = N, \\ (F_{\gamma_1^n}(u))^N, & \text{se } M > N. \end{cases} \quad (19)$$

Similarmente, para U2 tem-se:

$$F_{\gamma_{R2}^{\rho \rightarrow \infty}}(u) = 1 - \left( 1 - \frac{u d_{SR}^\tau}{a_2 \rho \beta_{SR}^m} \right) = \frac{u d_{SR}^\tau}{a_2 \rho \beta_{SR}^m}, \quad (20)$$

$$F_{\gamma_2^{\rho \rightarrow \infty}}(u) = 1 - \left( 1 - \frac{u d_2^\tau}{b_2 \rho \beta_2^m} \right) = \frac{u d_2^\tau}{b_2 \rho \beta_2^m}, \quad (21)$$

$$P_{\text{out}, \rho \rightarrow \infty}^2 = \begin{cases} (F_{\gamma_{R2}^m}(u))^M, & \text{se } M < N, \\ (F_{\gamma_{R2}^m}(u))^M + (F_{\gamma_2^n}(u))^N, & \text{se } M = N, \\ (F_{\gamma_2^n}(u))^N, & \text{se } M > N. \end{cases} \quad (22)$$

A ordem de diversidade é definida matematicamente como  $d = -\lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \log P_{\text{out}, \text{asym}}(\text{SNR}) / \log \text{SNR}$ , e representa a inclinação das curvas de desempenho em regimes de altas SNRs. Dessa forma, de (19) e (22), pode-se concluir que a ordem de diversidade para ambos os usuários é dada por  $d = \min(M, N)$ , ou seja, pelo valor mínimo do número de antenas.

#### V. RESULTADOS NUMÉRICOS E DISCUSSÕES

Nesta seção, resultados numéricos serão apresentados com o intuito de investigar o desempenho de *outage* do sistema considerado. Simulações de Monte Carlo foram realizadas utilizando o *software* de simulação computacional MATLAB® e uma perfeita concordância entre os resultados numéricos e simulados será observada, o que valida a análise apresentada. Sem perda de generalidade, assume-se uma topologia linear em que a distância entre S e R é dada por  $d_{SR} = 0.5$ , e denota-se  $d_1$  e  $d_2$  como a distância entre R e U1, e R e U2, respectivamente. Além disso, considera-se os coeficientes de alocação de potência em S e R iguais, ou seja,  $a_1 = b_1 = a_2 = b_2$ . Considerou-se também o expoente de perda de percurso  $\tau = 3$  e assumiu-se que as SINRs para os usuários U1 e U2 são as mesmas, isto é,  $u = 3$  dB.

Figura 2 plota a probabilidade de *outage versus* SNR de transmissão a fim de avaliar o comportamento dos coeficientes de alocação de potência no desempenho sistêmico dos dois usuários. Como parâmetros, considerou-se  $M = N = 3$ ,  $d_1 = 1.5$  e  $d_2 = 0.5$ . Utilizou-se os seguintes coeficientes de alocação de potência:  $\{a_1, a_2\} = \{0.7, 0.3\}, \{0.8, 0.2\}, \{0.9, 0.1\}$ , respeitando a restrição  $\sum_{i=1}^2 a_i = 1$ . Observe uma menor probabilidade de *outage* de U2 em relação à U1, o que ocorre devido às melhores condições de canal de U2 bem como a estratégia alocação de potência fixa utilizada nesse trabalho. Observa-se também que o incremento da potência alocada para o usuário com as piores condições de canal e o decremento da potência do usuário com melhores condições de canal provoca uma aproximação das curvas dos dois usuários. Além disso, o comportamento das curvas assintóticas estão coerentes com a teoria, tangenciando as curvas analíticas nas regiões de alta SNR. Por fim, uma perfeita concordância entre os resultados analíticos e as simulações é atestada.

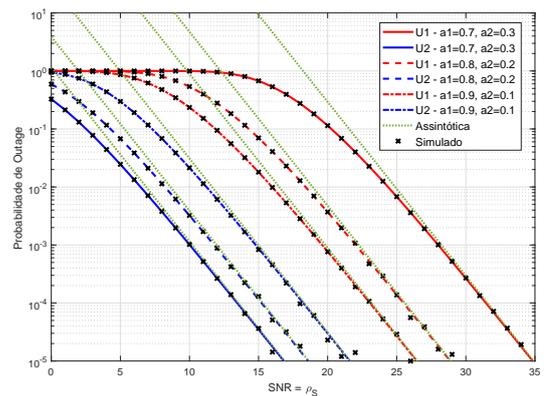


Fig. 2. Probabilidade de *outage* vs SNR para  $M = 3$  e  $N = 3$ ,  $d_{SR} = 0.5$ ,  $d_1 = 1.5$  e  $d_2 = 0.5$ .

Figura 3 plota a probabilidade de *outage versus* SNR do sistema para diferentes configurações de antenas transmissoras e receptoras. Considerou-se  $d_1 = 1.5$ ,  $d_2 = 0.5$ ,  $a_1 = b_1 = 0.8$  e  $a_2 = b_2 = 0.2$ . Observe que o aumento do número de antenas melhora o desempenho para os dois usuários, fato que corrobora a superioridade do uso de esquema de seleção

de antenas. Além disso, é possível aferir que a ordem de diversidade de cada curva obedece os critérios demonstrados ao longo da análise.

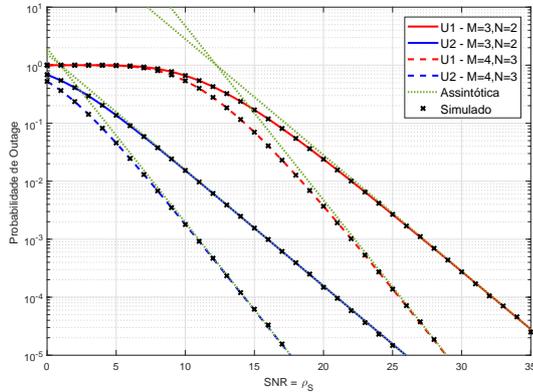


Fig. 3. Probabilidade de *outage* vs SNR para  $a_1 = b_1 = 0.8$  e  $a_2 = b_2 = 0.2$ ,  $d_{sr} = 0.5$ ,  $d_1 = 1.5$  e  $d_2 = 0.5$ .

Figura 4 investiga o efeito da posição de U1 na probabilidade de *outage* do sistema. Fixou-se  $M = 3$ ,  $N = 3$  e os coeficientes de alocação de potência em  $a_1 = b_1 = 0.8$  e  $a_2 = b_2 = 0.2$ . Além disso, o usuário 2 foi posicionado a uma distância  $d_2 = 0.5$  de R, e variou-se a distância do usuário 1 com relação a R em  $d_1 = 0.5$ ,  $d_1 = 1.0$  e  $d_1 = 1.5$ . Quando os dois usuários estão à mesma distância, isto é,  $d_1 = d_2 = 0.5$  de R, U1 tem o desempenho melhor do que U2 pois uma maior potência está sendo alocada para ele. A medida que U1 se afasta de R o seu desempenho piora em relação a U2, mesmo que possua uma maior alocação de potência, devido às condições ruins de canal.

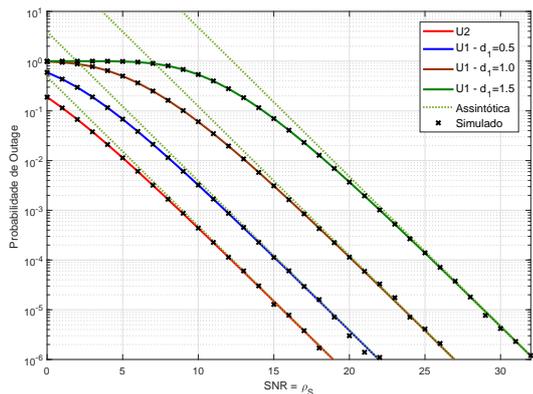


Fig. 4. Probabilidade de *outage* vs SNR para  $M = 3$  e  $N = 3$ ,  $a_1 = b_1 = 0.8$  e  $a_2 = b_2 = 0.2$ .

## VI. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste artigo, investigou-se um sistema MIMO-NOMA cooperativo com um esquema de seleção de antenas e retransmissão de sinal utilizando o protocolo DF. A probabilidade de *outage* para dois usuários foi estudada onde expressões em forma fechada foram obtidas, e a partir das mesmas

uma análise assintótica foi realizada, obtendo explicitamente o ganho de diversidade de cada usuário. O impacto do número de antenas, coeficientes de alocação de potência e posicionamento dos nós no desempenho sistêmico foram examinados. Resultados de simulação foram fornecidos para validar os resultados analíticos. Como trabalhos futuros, um esquema de alocação de potência dinâmica pode ser proposto bem como o estudo de outras técnicas de transmissão e recepção por múltiplas antenas (diferentes esquemas MIMO). O cenário considerado pode também ser generalizado para o caso de múltiplos usuários, onde técnicas de agrupamento de usuários podem ser propostas com o objetivo de diminuir a complexidade do NOMA.

## REFERÊNCIAS

- [1] Y. Saito, Y. Kishiyama, and A. Benjebbour, "Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access", *Proc. of IEEE 77th Veh. Technol. Conf. (VTC Spring)*, Dresden, Germany, pp. 1-5, Jun. 2013.
- [2] F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, "Five disruptive technology directions for 5G", *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no.2, pp. 74-80, Feb. 2014.
- [3] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan, and V. K. Bhargava, "A survey on non-orthogonal multiple access for 5G networks: research challenges and future trends", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no.10, pp. 2181-2195, Oct. 2017.
- [4] T. N. Do, D. B. da Costa, T. Q. Duong, and B. An, "Improving the performance of cell-edge users in MISO-NOMA systems using TAS and SWIPT-based cooperative transmissions", *IEEE Trans. Green Commun. Net.*, vol. 2, no. 1, pp. 49-62, Mar. 2018.
- [5] T. Shimojo, A. Umesh, D. Fujishima, and A. Minokuchi, "Special articles on 5G technologies toward 2020 deployment", *NTT DOCOMO Tech. J.*, vol. 17, no. 4, pp. 50-59, 2016.
- [6] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behavior", *IEEE Trans. Inf. Theo.*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [7] M. Aldababsa and O. Kucur, "Outage performance of NOMA with TAS/MRC in dual hop AF relaying networks", *Adv. in Wir. and Opt. Commun. (RTUWO)*, Riga, Latvia, Nov. 2017.
- [8] N. T. Do, D. B. da Costa, T. Q. Duong, and B. An, "Transmit antenna selection schemes for MISO-NOMA cooperative downlink transmissions with hybrid SWIPT protocol", *IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, Paris, France, May 2017.
- [9] Y. Zhang, J. Ge, and E. Serpedin, "Performance analysis of nonorthogonal multiple access for downlink networks with antenna selection over Nakagami- $m$  fading channels", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no.11, pp. 10590-10594, Nov. 2017.
- [10] Z. G. Ding, M. G. Peng, and H. V. Poor, "Cooperative non-orthogonal multiple access in 5G systems", *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no.8, pp. 1462-1465, Aug. 2015.
- [11] J. Men, J. Ge, C. Zhang, "Performance analysis of nonorthogonal multiple access for relaying networks over Nakagami- $m$  fading channels", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 2, Feb. 2017.
- [12] Y. Liu, Z. Ding, and M. Elkashlan, "Cooperative non-orthogonal multiple access with simultaneous wireless information and power transfer", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 34, no. 4, pp. 938-953, Apr. 2016.
- [13] Z. Ding, H. Dai, and H. V. Poor, "Relay selection for cooperative NOMA", *IEEE Commun. Lett.*, vol.5, no.4, pp. 416-419, Aug. 2016.
- [14] S. Lee, D. B. da Costa, Q. Vien, T. Q. Doung, and R. T. Sousa Jr, "Non-orthogonal multiple access schemes with partial relay selection", *IET Commun.*, vol. 11, no. 6, pp. 846-854, Mar. 2017.
- [15] X. H. Chen, A. Bejjebbour, A. X. Li, H. Jiang, and H. Kayama, "Consideration on successive interference canceller (SIC) receiver at cell-edge users for non-orthogonal multiple access (NOMA) with SU-MIMO", *IEEE Int. Symp. Pers. Indoor Mob. Radio Commun. (PIMRC)*, pp. 522-526, Sep. 2015.
- [16] W. Han, J. Ge, and J. Men, "Performance analysis for NOMA energy harvesting relaying networks with transmit antenna selection and maximal-ratio combining over Nakagami- $m$  fading", *IET Commun.*, vol. 10, no. 18, pp. 2687-2693, Dec. 2016.
- [17] Y. Zhang and J. Ge, "Performance analysis for non-orthogonal multiple access in energy harvesting relaying networks", *IET Commun.*, vol.11, no.11, pp. 1768-1774, Sep. 2017.