

Avaliação de Desempenho de Redes Baseadas em RSMA e Assistidas por STAR-RIS sob Canais Correlacionados

Eduardo Gonçalves Gomes e Edgar Eduardo Benitez Olivo

Resumo— Neste trabalho, o desempenho em termos da probabilidade de *outage* para uma rede sem fio constituída por uma estação rádio-base (BS) que pretende se comunicar com dois usuários por meio do protocolo RSMA (*Rate Splitting Multiple Access*) é investigado. Assume-se que a comunicação por meio do enlace direto entre a BS e os usuários está indisponível devido à presença de obstáculos. Assim, uma superfície inteligente reconfigurável com capacidade de reflexão e transmissão simultânea (STAR-RIS) é usada para auxiliar na comunicação entre a BS e os usuários, que estão localizados em ambos os lados da STAR-RIS. A STAR-RIS opera de acordo com o protocolo *mode switching*, em que parte dos elementos é usada apenas para transmissão e outra parte para reflexão. Assume-se que os canais estão sujeitos a desvanecimento do tipo Rice. Importante destacar que, devido ao espaçamento reduzido entre os elementos da STAR-RIS, neste estudo avalia-se o impacto da correlação dos canais sobre o desempenho do sistema; para tanto, o modelo considerado para geração de canais correlacionados é apresentado. O desempenho do sistema é avaliado por meio de simulações exaustivas de Monte Carlo em função de vários parâmetros-chave, como o número de elementos da STAR-RIS, o fator de correlação em função do espaçamento entre elementos e o fator de alocação de potência para as mensagens dos usuários no esquema RSMA.

Palavras-Chave— canais correlacionados, desempenho de *outage*, RSMA, STAR-RIS.

Abstract— In this work, the outage performance for a wireless network composed of a base station (BS) that intends to communicate with two users using the RSMA protocol is investigated. The communication through the direct link between the BS and the users is assumed to be unavailable due to the presence of obstacles. Thus, a simultaneous transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface (STAR-RIS) is used to assist the communication between the BS and users, who are located on both sides of the STAR-RIS. STAR-RIS operates according to the mode switching protocol, by which part of the elements is used only for transmission and another part for reflection. Channels are assumed to be subject to Rice fading. Importantly, due to the reduced spacing between the STAR-RIS elements, this study evaluates the impact of channel correlation on the system performance; for which, the model considered for generating correlated channels is presented. The system performance is assessed through extensive Monte Carlo simulations as a function of several key parameters, such as the number of STAR-RIS elements, the correlation factor as a function of the element spacing, and the power allocation factor for user messages in the RSMA scheme.

Keywords— correlated channels, outage performance, RSMA, STAR-RIS.

Eduardo Gonçalves Gomes e Edgar Eduardo Benitez Olivo, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, Campus de São João da Boa Vista, São João da Boa Vista-SP, Brasil, e-mails: eduardo.g.gomes@unesp.br, edgar.olivo@unesp.br. Este trabalho foi parcialmente financiado pela FAPESP, Proc. N° 2019/19935-6, e pela FINEP, Proc. 0527/18.

I. INTRODUÇÃO

Devido ao avanço tecnológico, à demanda por altas taxas de dados e à necessidade de suporte a um número massivo de dispositivos conectados e novos serviços, tais como veículos aéreos não tripulados (UAVs, *Unmanned Aerial Vehicles*), Internet das coisas (IoT, *Internet of Things*), comunicações de veículos para qualquer coisa (V2X, *Vehicles-to-Everything*), Indústria 4.0, entre outras, as futuras redes de sexta geração (6G) e as redes além de quinta geração (B5G, *Beyond 5G*) devem ser projetadas, baseadas em novas tecnologias, para atender essa demanda [1], [2].

Algumas tecnologias trouxeram um grande avanço e facilitaram a implementação das redes 5G, como MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) massivo, redes ultradensas (UDN, *Ultra-Dense Network*), comunicações na faixa das ondas milimétricas (mmWave, *Millimeter Wave*), entre outras. No entanto, a alta complexidade e o custo de hardware, bem como o aumento do consumo de energia, são questões cruciais diretamente relacionadas a essas tecnologias e que ainda são problemas em aberto [3].

Para contornar esses problemas, as superfícies inteligentes reconfiguráveis (RIS, *Reconfigurable Intelligent Surfaces*) têm sido propostas como uma técnica disruptiva de camada física nas redes 6G [4]. Uma RIS é uma superfície plana retangular, composta por muitos elementos refletivos de baixo custo que recentemente atraiu significativa atenção devido à sua capacidade de redirecionamento do sinal incidente de forma independente, controlando sua fase e amplitude e ampliando o alcance de transmissão ou criando pontos de cancelamento de interferência. No entanto, a maioria das contribuições existentes atualmente considera o caso em que as RISs apenas são capazes de refletir o sinal incidente (referido como RISs convencionais) [4].

Para contornar essa limitação das RISs convencionais, o conceito de RIS com capacidade de transmissão e reflexão simultâneas (STAR-RISs, *Simultaneously Transmitting And Reflecting RIS*) foi proposto recentemente [5]. Com a STAR-RIS, o sinal incidente é dividido em duas partes. A primeira parte é o sinal refletido para o mesmo lado do sinal incidente. A segunda parte é o sinal transmitido para o lado oposto do sinal incidente. Uma STAR-RIS permite manipular os sinais transmitidos e refletidos através dos coeficientes de reflexão e transmissão dos elementos, gerando assim, um ambiente altamente flexível para a propagação dos sinais de informação [5].

O desempenho dos sistemas de comunicação sem fio com a tecnologia RIS depende do projeto e da geometria das superfícies. A correlação espacial entre os canais correspondentes é influenciada pelo posicionamento dos elementos da RIS em uma geometria retangular. A correlação espacial depende da distância euclidiana entre os elementos. Em [6] mostrou-se que o desempenho do sistema, em termos da probabilidade de *outage*, em canais espacialmente correlacionados é melhorado com o aumento do espaçamento entre os elementos e com o aumento do número de elementos na RIS.

Além dos estudos de técnicas referentes a camada física, técnicas de múltiplo acesso têm ganhado bastante relevância nas pesquisas para as redes B5G e 6G. Dentre essas técnicas, o acesso múltiplo por divisão de taxa (RSMA, *Rate-Splitting Multiple Access*) e o acesso múltiplo não ortogonal (NOMA, *Non-Orthogonal Multiple Access*), vêm sendo consideradas devido à capacidade de atender vários usuários simultaneamente [7]. Tecnologias como RIS e STAR-RIS estão sendo estudadas conjuntamente com RSMA e NOMA para melhorar o desempenho dos sistemas de comunicação sem fio [8]. Este trabalho é focado na técnica RSMA.

No protocolo RSMA, a mensagem é dividida no transmissor em duas partes: uma parte comum entre todos os usuários e uma parte privada para cada usuário. A técnica de cancelamento sucessivo de interferência (SIC, *Successive Interference Cancellation*) é usada para decodificar a informação no receptor do usuário. Dessa forma, na decodificação, a interferência de outros usuários é tratada parcialmente como ruído. Assim, o RSMA possibilita melhorar o desempenho em termos do *throughput* do sistema, comparado aos protocolos de acesso múltiplo, como NOMA, acesso múltiplo por divisão de espaço (SDMA, *Space-Division Multiple Access*), acesso múltiplo por divisão de frequência (FDMA, *Frequency Division Multiple Access*) e o acesso múltiplo por divisão de frequência ortogonal (OFDMA, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) [7].

O presente estudo tem como objetivo avaliar o desempenho de um sistema de comunicação sem fio assistido por STAR-RIS e baseado em RSMA. O desempenho do sistema é avaliado por meio de simulações exaustivas de Monte Carlo em função de vários parâmetros-chave do sistema, como o número de elementos da STAR-RIS, o fator de correlação em função do espaçamento entre elementos e o fator de alocação de potência para as mensagens dos usuários no esquema RSMA.

A. Trabalhos Relacionados

Em [9] foram apresentados três protocolos de operação para STAR-RISs: *Energy Splitting* (ES), *Mode Switching* (MS) e *Time Switching* (TS). Cada protocolo é formulado como um problema de otimização conjunta de beamforming ativo e passivo para minimizar o consumo de energia da estação rádio-base (BS) no *downlink*, auxiliada por STAR-RIS para transmissões *unicast* e *multicast*.

Uma análise comparativa do desempenho entre RIS convencionais e as STAR-RIS, em termos de probabilidade de *outage* foi realizada em [5]. Os modelos de canal propostos foram

verificados por simulações numéricas, que mostraram que as STAR-RIS podem estender a cobertura e alcançar uma ordem de diversidade mais elevada em ambos os lados da superfície, em comparação com as RIS convencionais.

Em [7] foram apresentados os fundamentos e desafios do RSMA para aplicações em redes B5G e 6G, abordando os critérios de projeto e os esquemas básicos de transmissão para o *downlink* e *uplink* no RSMA. O artigo também aponta que um dos principais desafios do RSMA é investigar modelos alternativos para o SIC, para reduzir a complexidade do receptor no *downlink* e elaborar métodos de baixa complexidade para determinar a alocação de potência para as mensagens comum e privada, como também a alocação de energia para reduzir o *overhead* de sinalização no *uplink*. Além disso, é ressaltado que a carga de sinalização é aumentada em ambos os lados devido à necessidade do usuário estar ciente da divisão e combinação de mensagens no transmissor, para decodificar a mensagem com sucesso e remover o fluxo comum usando SIC no receptor.

Os estudos em [8] e [10] analisaram a integração das técnicas RSMA e RIS convencional. Particularmente em [8], foram destacadas diversas vantagens, incluindo o aumento da eficiência espectral e da área de cobertura, bem como a flexibilidade no controle de feixe. O RSMA é uma técnica que permite o gerenciamento inteligente de interferências em diferentes cenários de implantação de usuários, enquanto a RIS estende a cobertura de comunicação e aprimora a flexibilidade do controle de feixe. A integração dessas técnicas também torna o sistema mais robusto às imperfeições da informação do estado de canal e à mobilidade dos usuários. A combinação de RSMA com RIS pode ainda ajudar a reduzir a complexidade de hardware e computacional do RSMA, além de obter desempenho melhor do que esquemas de múltiplas camadas como NOMA ou SDMA com RIS totalmente conectado.

Recentemente, em [11], apresentou-se o uso combinado de RSMA e STAR-RIS para comunicação onde o usuário está na borda de célula. São considerados os modos de operação MS e ES da STAR-RIS. Os resultados indicam que para o modo MS, um desempenho satisfatório pode ser obtido para ambos os usuários quando os elementos que refletem e transmitem são aproximadamente iguais em número. Para o modo ES, é possível ajustar o valor do coeficiente de reflexão para alcançar a mesma probabilidade de *outage* nos usuários transmitidos e refletidos, mesmo que estejam a diferentes distâncias da STAR-RIS. Nesse contexto, este trabalho visa contribuir no estudo de redes sem fio que explorem o uso de STAR-RIS e RSMA.

II. MODELO DO SISTEMA

Considere uma rede sem fio composta por uma BS com uma única antena, uma STAR-RIS com N elementos, que opera de acordo com o protocolo *mode switching*, sendo N_r elementos para reflexão e N_t elementos para retransmissão, e dois usuários U_r e U_t , que não possuem linha de visada com a BS, estão localizados em ambos lados da STAR-RIS e possuem uma única antena, conforme ilustrado na Fig. 1. O usuário U_r é situado no lado onde o sinal é refletido, enquanto

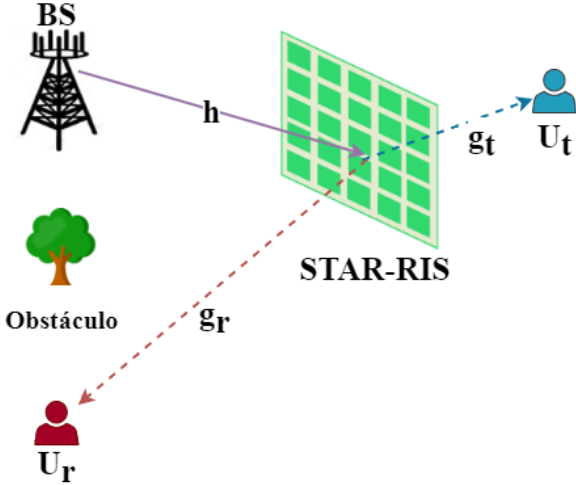


Fig. 1. Modelo do sistema de comunicação consistindo de uma estação rádio-base (BS), que pretende se comunicar com dois usuários (U_r e U_t) por meio do protocolo RSMA, sendo assistida por uma STAR-RIS que opera no protocolo *mode switching*.

que o usuário U_t é posicionado no lado oposto da STAR-RIS, onde o sinal é retransmitido. A STAR-RIS é modelada como uma matriz uniforme e planar, com $N = N_h \times N_v$ elementos, em que N_h é o número de elementos na direção horizontal e N_v na direção vertical. O sinal recebido pelos usuários pode ser expresso por

$$y_l = \mathbf{g}_l^H \Psi_l \mathbf{h} s + n_l, \forall l \in \{r, t\}, \quad (1)$$

em que $s = \sqrt{\alpha_c} P s_c + \sqrt{\alpha_r} P s_r + \sqrt{\alpha_t} P s_t$ é o sinal transmitido pela BS de acordo com o protocolo RSMA, sendo s_c a parte comum da mensagem, s_t e s_r as partes privadas das mensagens de cada usuário, P a potência transmitida, e α_c e $\alpha_l, \forall l \in \{r, t\}$, os fatores de alocação de potência para a parte comum e as partes privadas das mensagens dos usuários, respectivamente, de forma que $\alpha_c + \alpha_r + \alpha_t = 1$. Além disso, $\mathbf{h} = [h_1, h_2, \dots, h_N]^T \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ é o vetor de coeficientes de canal entre a BS e a STAR-RIS; $\mathbf{g}_l = [g_{l1}, g_{l2}, \dots, g_{lN}]^T \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ é o vetor de coeficientes de canal entre a STAR-RIS e o usuário U_l ; $\Psi_l = \text{diag}[\sqrt{\eta_{l1}} e^{j\theta_{l1}}, \sqrt{\eta_{l2}} e^{j\theta_{l2}}, \dots, \sqrt{\eta_{lN}} e^{j\theta_{lN}}] \in \mathbb{C}^{N \times N}$ é uma matriz diagonal, cujas entradas não nulas representam a amplitude $\sqrt{\eta_{ln}}$ e fase θ_{ln} , inseridos pelo n -ésimo elemento da STAR-RIS $\forall n \in \{1, \dots, N\}$. Além disso, $\eta_r + \eta_t = 1, \forall \eta_r, \eta_t \in \{0, 1\}$; e n_l é o ruído aditivo gaussiano e branco (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*) no receptor do usuário U_l .

Considere ainda que, devido ao espaçamento reduzido entre os elementos contidos em uma STAR-RIS, as entradas do vetor de canal $\mathbf{h} \sim \mathcal{CN}(c_h, \mathbf{R}_h)$, assim como aquelas do vetor de canal $\mathbf{g}_l \sim \mathcal{CN}(c_{g_l}, \mathbf{R}_{g_l})$ são variáveis aleatórias espacialmente correlacionadas, em que $\mathbf{R}_h \in \mathbb{R}^{N \times N}$ e $\mathbf{R}_{g_l} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ são as matrizes de covariância de \mathbf{h} e \mathbf{g}_l , respectivamente, dadas por [10]

$$\mathbf{R}_h = E[\mathbf{h}\mathbf{h}^H] = 2\sigma_{h_i}^2 \mathbf{R}, \quad (2)$$

$$\mathbf{R}_{g_l} = E[\mathbf{g}_l \mathbf{g}_l^H] = 2\sigma_{g_{li}}^2 \mathbf{R}, \quad (3)$$

sendo $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ a matriz de correlação espacial, cujo

(m, n) -ésimo elemento é dado por

$$\mathbf{R}_{(m,n)} = \rho_{(m,n)} = \text{sinc}\left(\frac{2\|\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_n\|}{\lambda}\right), \quad (4)$$

$\forall m, n \in \{1, \dots, N\}$. Em (4), λ é o comprimento de onda, \mathbf{v}_m e \mathbf{v}_n são os vetores de coordenadas de posição do m -ésimo e n -ésimo elemento da STAR-RIS, respectivamente, dispostos em um arranjo retangular, sendo dados por [6]

$$\mathbf{v}_m = \left[0, \text{mod}(m-1, N_h)d_h, \left\lfloor \frac{(m-1)}{N_h} \right\rfloor d_v\right]^T, \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_n = \left[0, \text{mod}(n-1, N_h)d_h, \left\lfloor \frac{(n-1)}{N_h} \right\rfloor d_v\right]^T \quad (6)$$

em que d_h e d_v são os espaçamentos horizontal e vertical entre elementos adjacentes da STAR-RIS. Além disso, note que $h_n \sim \mathcal{CN}(c_h, \sigma_{h_n}^2)$ e $g_{ln} \sim \mathcal{CN}(c_{g_l}, \sigma_{g_{ln}}^2), \forall n \in \{1, \dots, N\}$ e $\forall l \in \{r, t\}$, são variáveis aleatórias do tipo Rice, sendo os parâmetros de forma dados por $K_h = \frac{c_h^2}{2\sigma_{h_n}^2}$ e $K_{g_l} = \frac{c_{g_l}^2}{2\sigma_{g_{ln}}^2}$, e os parâmetros de espalhamento dados por $\Omega_h = c_h^2 + 2\sigma_{h_n}^2$ e $\Omega_{g_l} = c_{g_l}^2 + 2\sigma_{g_{ln}}^2$, respectivamente¹.

A. Geração de coeficientes de canal correlacionados

Seja $\tilde{\mathbf{h}} = [\tilde{h}_1, \tilde{h}_2, \dots, \tilde{h}_N]^T \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ um vetor de coeficientes complexos de canal descorrelacionados. O vetor de coeficientes complexos de canal correlacionados pode ser obtido como

$$\mathbf{h} = \sqrt{\Omega} \mathbf{C} \tilde{\mathbf{h}}, \quad (7)$$

em que Ω é o ganho médio de canal e \mathbf{C} é obtida a partir da decomposição por raiz quadrada da matriz $\Lambda = \sqrt{\mathbf{R}}$, tal que

$$\Lambda = \mathbf{C} \mathbf{C}^T. \quad (8)$$

III. PROBABILIDADE DE OUTAGE

O desempenho do sistema será avaliado em termos da probabilidade de *outage*. A probabilidade de *outage* é definida como a probabilidade da SINR recebida estar abaixo de um determinado limiar γ_{th} .

Com a utilização da técnica RSMA, a relação sinal-interferência-mais-ruído (SINR, *Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio*) é dividida em duas partes, uma parte comum aos usuários e uma parte privada para cada usuário, sendo dadas por [11]

$$\gamma_{l,c} = \frac{\alpha_c |\mathbf{g}_l^H \Psi_l \mathbf{h}|^2}{|\mathbf{g}_l^H \Psi_l \mathbf{h}|^2 \left(\alpha_i^l + \alpha_i^i\right) + 1/\gamma}, \quad (9)$$

$$\gamma_{l,p} = \frac{\alpha_l |\mathbf{g}_l^H \Psi_l \mathbf{h}|^2}{|\mathbf{g}_l^H \Psi_l \mathbf{h}|^2 \left(\alpha_i^l\right) + 1/\gamma}, \quad (10)$$

em que $l = t$, se $\hat{l} = r$ ou $l = r$, se $\hat{l} = t$; e $\gamma = P/N_0$ é a SINR transmitida, sendo $N_0 = -174 + 10 \log_{10}(B)$ dBm a potência do ruído, com B denotando a largura de banda do canal. O processo de decodificação no usuário envolve,

¹ $\mathcal{CN}(a, b)$ denota uma variável aleatória complexa circularmente simétrica com média a e variância b .

inicialmente, a decodificação da mensagem comum, seguida da decodificação da mensagem privada correspondente, após a remoção do termo da mensagem comum. Como resultado, as mensagens privadas dos usuários são interpretadas como termos de interferência durante a decodificação da mensagem comum, enquanto as mensagens privadas de todos os outros usuários são interpretadas como interferência durante a decodificação da mensagem privada correspondente.

Utilizando a técnica RSMA, a probabilidade de *outage* é definida como a probabilidade da SINR recebida da parte comum e/ou privada estarem abaixo de um determinado limiar γ_{th} . Dessa forma, tem-se que

$$P_{out}(\gamma_{l,c}, \gamma_{l,p}) = 1 - P_r(\gamma_{l,c} < \gamma_{th}, \gamma_{l,p} < \gamma_{th}). \quad (11)$$

IV. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção, o desempenho do sistema proposto em termos da probabilidade de *outage* é avaliado utilizando o software Matlab, por meio de simulações de Monte Carlo. A Tabela I apresenta os parâmetros utilizados nas simulações, sendo que para cada simulação foram realizadas 10^6 iterações.

TABELA I
PARÂMETROS DO SISTEMA.

Parâmetros	Valor
Frequência de Operação	$f = 3$ GHz
Largura de Banda	$B = 1$ MHz
Expoente de perda de percurso BS-RIS	$\alpha_h = 2,5$
Expoente de perda de percurso RIS- U_r	$\alpha_{g_r} = 2,5$
Expoente de perda de percurso RIS- U_t	$\alpha_{g_t} = 2,5$
Limiar Alvo	$\gamma_{th} = -10$ dB
Distância entre BS-RIS	$d_{h_l} = 100$ m
Distância entre RIS- U_r	$d_{g_r} = 15$ m
Distância entre RIS- U_t	$d_{g_t} = 15$ m
Fator de alocação de potência comum	$\alpha_c = 0,2$
Fator de alocação de potência privada U_r	$\alpha_r = 0,4$
Fator de alocação de potência privada U_t	$\alpha_t = 0,4$
Número de elementos na horizontal	$N_h = 10$
Número de elementos na vertical	$N_v = 10$
Número de elementos total	$N = N_h \times N_v = 100$

A Fig. 2 ilustra o desempenho para ambos usuários, U_r e U_t , em termos da probabilidade de *outage* vs. potência transmitida, variando os espaçamentos vertical e horizontal entre os elementos adjacentes, d_h e d_v , respectivamente. Observa-se que, à medida que o espaçamento aumenta, a probabilidade de *outage* diminui. Isso se deve ao fato que, ao aumentar o espaçamento entre os elementos, a correlação entre eles diminui, melhorando, assim, o desempenho do sistema. Além disso, observa-se que, para espaçamentos $d_h = d_v = \lambda/2$ e $d_h = d_v = \lambda$, as curvas se sobrepõem, devido a que para espaçamentos de $\lambda/2$ ou maiores, a correlação entre os elementos considera-se desprezível. Consequentemente, para $d_h = d_v = \lambda$, o desempenho não apresenta melhora em relação ao caso $d_h = d_v = \lambda/2$.

A Fig. 3 apresenta a probabilidade de *outage* vs. potência transmitida, variando o número de elementos alocados para transmissão e reflexão de acordo com os casos $(N_r, N_t) = (50, 50); (75, 25); (25, 75)$. Observe que, para o caso $N_r = N_t$, obtém-se o mesmo desempenho para ambos os usuários,

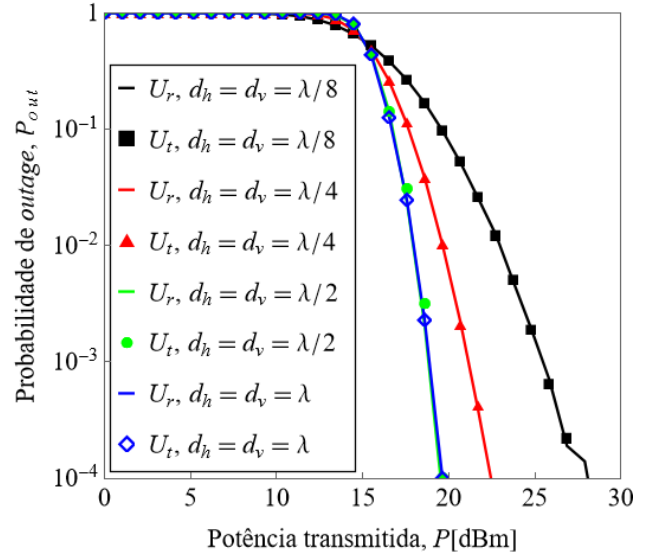


Fig. 2. Probabilidade de *outage* vs. potência transmitida para vários valores de espaçamento entre os elementos da STAR-RIS, d_h e d_v .

U_r e U_t . Porém, quando há um desbalanceamento entre o número de elementos alocados para reflexão e transmissão, a menor probabilidade de *outage* é obtida no usuário, para o qual foi alocado o maior número de elementos. Por exemplo, quando U_r possui mais elementos alocados, ou seja, $N_r = 75$, a probabilidade de *outage* correspondente é menor, quando comparado ao desempenho de U_t , com $N_t = 25$. Dessa forma, quanto maior for o número de elementos alocados a um usuário, melhor será o seu desempenho em termos da probabilidade de *outage*.

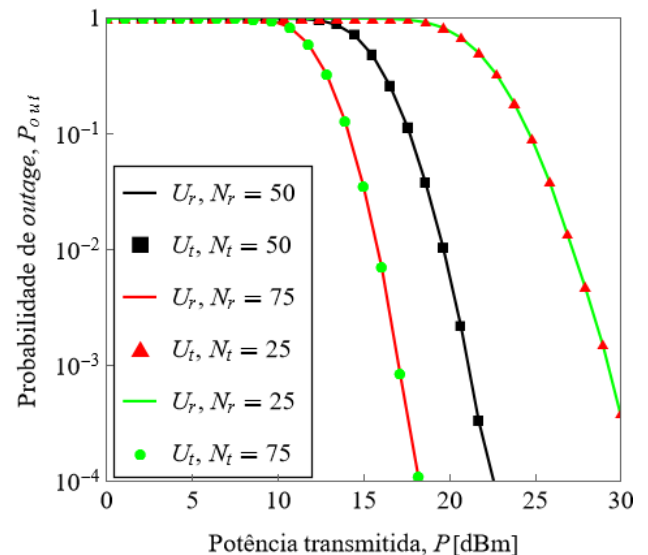


Fig. 3. Probabilidade de *outage* vs. potência transmitida, variando-se o número de elementos alocados para reflexão e transmissão, N_r e N_t .

A Fig. 4 apresenta a probabilidade de *outage* vs. fator de alocação de potência da parte comum das mensagens dos usuários, α_c , considerando $d_h = d_v = \lambda/4$, $P = 20$ dBm e valores iguais para os fatores de alocação de potência das partes privadas de U_r e U_t , tal que $\alpha_r = \alpha_t = \frac{1-\alpha_c}{2}$. Além

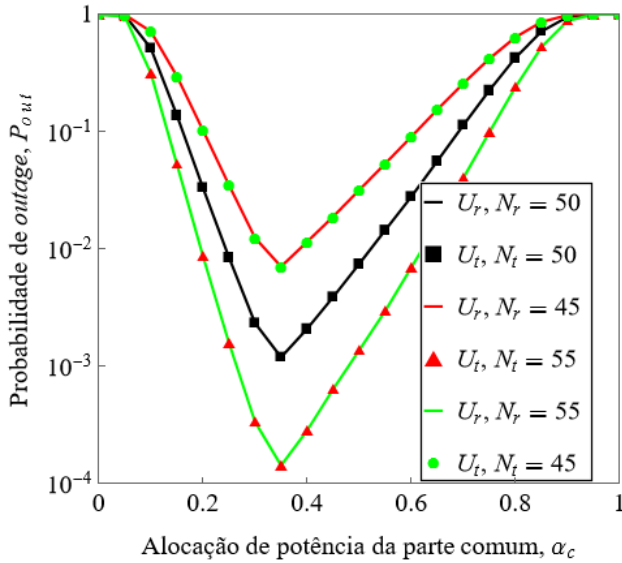


Fig. 4. Probabilidade de *outage* vs. fator de alocação de potência da parte comum das mensagens dos usuários, variando-se o número de elementos alocados para reflexão e transmissão, N_r e N_t .

disso, variou-se o número de elementos N_r e N_t . Note que, para $\alpha_c < 0,2$ e $\alpha_c > 0,8$, a probabilidade de *outage* de ambos os usuários é deteriorada, tendendo a 1 conforme α_c se aproxima de 0 ou 1, respectivamente. Isso ocorre pois nestes casos há um desbalanceamento significativo entre os fatores de potência da partes comum e privadas. Note ainda que, conforme $\alpha_c \rightarrow 0,33$, obtém-se uma probabilidade de *outage* menor para ambos os usuários, tendo, neste caso, fatores de alocação de potência balanceados para as partes comum e privadas, ou seja, $\alpha_c = \alpha_r = \alpha_t \approx 0,33$, similarmente ao obtido em [12]. Além disso, note que quanto maior o número de elementos alocados a um usuário, melhor é o seu desempenho, como mencionado anteriormente. Portanto, observa-se que o usuário com mais elementos alocados e $\alpha_c \approx 0,33$, apresenta o melhor desempenho em termos da probabilidade de *outage*.

V. CONCLUSÕES

Neste trabalho, o desempenho de uma rede baseada em STAR-RIS e RSMA, com canais sujeitos a desvanecimento do tipo Rice, foi avaliado em termos da probabilidade de *outage* dos usuários na região de reflexão e transmissão. O impacto da correlação no desempenho do sistema foi investigado, variando-se o espaçamento entre os elementos da STAR-RIS. Observou-se que, à medida que o espaçamento dos elementos da STAR-RIS diminui, o que resulta em um aumento da correlação entre elementos, a probabilidade de *outage* dos usuários aumenta, conforme esperado. Já para $d_h = d_v = \lambda/2$ e $d_h = d_v = \lambda$, as curvas se sobrepõem, devido a que para espaçamentos de $\lambda/2$ ou maiores, a correlação entre os elementos considera-se desprezível. Além disso, avaliou-se o impacto do número de elementos alocados para reflexão e transmissão na STAR-RIS. No protocolo *mode switching*, em que parte dos elementos são alocados para transmissão e outra para reflexão, observou-se que, quanto maior o número de

elementos alocados a um usuário, a probabilidade de *outage* correspondente diminui. Considerou ainda o impacto do fator de alocação de potência para a parte comum das mensagens, α_c , e para as partes privadas, dadas por $\alpha_r = \alpha_t = (1 - \alpha_c)/2$. Observou-se que, para $\alpha_c < 0,2$ e $\alpha_c > 0,8$, o desempenho dos usuários é degradado. Além disso, para valores de $\alpha_c \approx 0,33$, em que existe uma condição de balanceamento entre os fatores de alocação de potência das partes comum e privadas, obtém-se o melhor desempenho em termos da probabilidade de *outage*.

VI. TRABALHOS FUTUROS

Neste trabalho, o desempenho do sistema foi avaliado, considerando um cenário com dois usuários, um de cada lado da STAR-RIS, e uma antena na BS. Além disso, considerou-se o protocolo de operação MS na STAR-RIS. Extensões deste trabalho pretendem considerar um cenário com múltiplas antenas na BS. Poderão ser considerados também outros modos de operação da STAR-RIS, além da obtenção de expressões analíticas do desempenho do sistema.

REFERÊNCIAS

- [1] M. A. El Mossallamy, H. Zhang, L. Song, K. G. Seddik, Z. Han, and G. Y. Li, "Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Principles, challenges, and opportunities," *IEEE Trans. Cogn. Commun. Netw.*, vol. 6, no. 3, pp. 990-1002, Sept. 2020, doi: 10.1109/TCCN.2020.2992604.
- [2] M. Shafi et al., "5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 35, no. 6, pp. 1201-1221, June 2017, doi: 10.1109/JSAC.2017.2692307.
- [3] Q. Wu, G. Y. Li, W. Chen, D. W. K. Ng, and R. Schober, "An overview of sustainable green 5G networks," in *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 4, pp. 72-80, Aug. 2017, doi: 10.1109/MWC.2017.1600343.
- [4] Q. Wu and R. Zhang, "Towards smart and reconfigurable environment: intelligent reflecting surface aided wireless network," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 58, no. 1, pp. 106-112, January 2020, doi: 10.1109/MCOM.001.1900107.
- [5] J. Xu, Y. Liu, X. Mu, and O. A. Dobre, "STAR-RISs: Simultaneous transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surfaces," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 25, no. 9, pp. 3134-3138, Sept. 2021, doi: 10.1109/LCOMM.2021.3082214.
- [6] E. Björnson and L. Sanguinetti, "Rayleigh fading modeling and channel hardening for reconfigurable intelligent surfaces," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 10, no. 4, pp. 830-834, April 2021, doi: 10.1109/LWC.2020.3046107.
- [7] A. Mishra, Y. Mao, O. Dizdar, and B. Clerckx, "Rate-splitting multiple access for 6G—Part I: Principles, applications and future works," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 26, no. 10, pp. 2232-2236, Oct. 2022, doi: 10.1109/LCOMM.2022.3192012.
- [8] H. Li, Y. Mao, O. Dizdar, and B. Clerckx, "Rate-splitting multiple access for 6G—Part III: Interplay with reconfigurable intelligent surfaces," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 26, no. 10, pp. 2242-2246, Oct. 2022, doi: 10.1109/LCOMM.2022.3192041.
- [9] X. Mu, Y. Liu, L. Guo, J. Lin, and R. Schober, "Simultaneously transmitting and reflecting (STAR) RIS aided wireless communications," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 21, no. 5, pp. 3083-3098, May 2022, doi: 10.1109/TWC.2021.3118225.
- [10] T. Van Chien, A. K. Papazafeiropoulos, L. T. Tu, R. Chopra, S. Chatzinotas and B. Ottersten, "Outage probability analysis of IRS-assisted systems under spatially correlated channels," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 10, no. 8, pp. 1815-1819, Aug. 2021, doi: 10.1109/LWC.2021.3082409.
- [11] S. Dhok and P. K. Sharma, "Rate-splitting multiple access with STAR RIS over spatially-correlated channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 70, no. 10, pp. 6410-6424, Oct. 2022, doi: 10.1109/TCOMM.2022.3198121.
- [12] A. Bansal, K. Singh, B. Clerckx, C. -P. Li, and M. -S. Alouini, "Rate-splitting multiple access for intelligent reflecting surface aided multi-user communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 70, no. 9, pp. 9217-9229, Sept. 2021, doi: 10.1109/TVT.2021.3102212.