

EDUARDO GONÇALVES GOMES

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE REDES BASEADAS  
EM RSMA E STAR-RIS SOB CANAIS  
CORRELACIONADOS E SIC IMPERFEITO**

São João da Boa Vista - SP  
2024


EDUARDO GONÇALVES GOMES

**ESTUDO DO DESEMPENHO DE REDES BASEADAS  
EM RSMA E STAR-RIS SOB CANAIS  
CORRELACIONADOS E SIC IMPERFEITO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - PGEE - ICTS/SJBV, câmpus de São João da Boa Vista, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo  
Orientador

São João da Boa Vista  
2024



G633e

Gomes, Eduardo Gonçalves

Estudo do Desempenho de Redes Baseadas em RSMA e STAR-RIS  
Sob Canais Correlacionados E SIC Imperfeito / Eduardo Gonçalves  
Gomes. -- São João da Boa Vista, 2024

48 p. : il., tabs.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Estadual  
Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista  
Orientador: Edgar Eduardo Benitez Olivo

1. Telecomunicações. 2. Sistemas de comunicação sem fio. 3.  
Desempenho Avaliação. 4. Propagação. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da Universidade  
Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista. Dados fornecidos  
pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

Este trabalho contribui para a área de comunicações e redes sem fio ao investigar a probabilidade de *outage* em um sistema que utiliza RSMA (*Rate Splitting Multiple Access*) e superfícies inteligentes reconfiguráveis com capacidade de reflexão e transmissão simultânea (STAR-RISs, *Simultaneously Transmitting And Reflecting RIS*) para superar a ausência de enlace direto entre estação base e usuário, considerando desvanecimento Rice e correlação de canais. Propõe uma expressão analítica aproximada para cancelamento sucessivo de interferência (SIC, *Successive Interference Cancellation*) imperfeito e realiza simulações de Monte Carlo, avaliando o impacto do 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. Os resultados fornecem contribuições valiosas para o desenvolvimento de redes mais eficientes e resilientes, abrindo espaço para futuras pesquisas na integração de STAR-RIS com protocolos de múltiplo acesso.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

This work contributes to the field of wireless communications and networks by investigating the outage probability in a system that uses RSMA (Rate Splitting Multiple Access) and reconfigurable intelligent surfaces with simultaneous reflection and transmission capabilities (STAR-RISs, *Simultaneously Transmitting And Reflecting RIS*) to overcome the absence of a direct link between the base station and users, considering Rice fading and channel correlation. It proposes an approximate analytical expression for imperfect successive interference cancellation (SIC) and performs Monte Carlo simulations, evaluating the impact of the number of STAR-RIS elements, the correlation factor based on element spacing, and the power allocation factor for user messages in the RSMA scheme. The findings provide valuable contributions to the development of more efficient and resilient networks, paving the way for future research on integrating STAR-RIS with multiple access protocols.



**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Estudo do desempenho de redes baseadas em RSMA e STAR-RIS sob canais correlacionados e SIC imperfeito

**AUTOR: EDUARDO GONÇALVES GOMES**

**ORIENTADOR: EDGAR EDUARDO BENITEZ OLIVO**

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Elétrica, área: Sistemas Eletrônicos pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. EDGAR EDUARDO BENITEZ OLIVO (Participação Virtual)  
Coordenadoria de Curso de Engenharia Eletronica e de Telecomunicacoes / Faculdade de Engenharia de Sao Joao da Boa Vista UNESP

Prof. Dr. CARLOS RAFAEL NOGUEIRA DA SILVA (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Elétrica / Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM)

Prof. Dr. JOSÉ DAVID VEGA SÁNCHEZ (Participação Virtual)  
Departamento de Electrónica, Telecomunicaciones y Redes de la Información / Escuela Politécnica Nacional (EPN)

São João da Boa Vista, 02 de agosto de 2024



Verônica Liberali Messias  
Supervisora Técnica de Seção  
Seção Técnica de Graduação e Pós-Graduação

Assinado de forma digital  
por Veronica Liberali  
Messias:36823715839  
Dados: 2024.08.05  
09:00:52 -03'00'

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus, sempre presente na minha vida me dando forças e auxiliando para superar obstáculos e sempre me deixar no caminho certo. Agradeço aos meus pais, Carlos e Lúcia, a minha irmã Sofia por sempre me apoiarem em todos os momentos da minha vida.

Agradeço também à minha namorada, Milene, por sempre me dar forças para conseguir caminhar, principalmente nesses últimos momentos, em que foi necessário muito esforço, dedicação e paciência.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo, por todo conhecimento e puxões de orelha necessários em alguns momentos.

Também gostaria de agradecer aos membros da banca, Prof. Dr. Carlos Rafael Nogueira da Silva e o Prof. Dr. José David Vega Sánchez, pela disposição e tempo dedicados para a leitura deste trabalho. Agradeço previamente os comentários e sugestões sobre este trabalho.

## 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-RISs, *Simultaneously Transmitting And Reflecting 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 usado apenas para transmissão e outra parte para reflexão. Assume-se ainda que os canais estão sujeitos a um desvanecimento do tipo Rice. Importante destacar que, devido ao espaçamento reduzido entre os elementos da STAR-RIS, considera-se o impacto da correlação dos canais sobre o desempenho do sistema; para tanto, o modelo considerado para geração de canais correlacionados é apresentado. Além disso, para um cenário com cancelamento sucessivo de interferência (SIC, *Successive Interference Cancellation*) imperfeito e canais descorrelacionados, uma expressão analítica aproximada é proposta. 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; SIC; STAR-RIS.

## ABSTRACT

In this work, the outage performance for a wireless network constituted by 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. The 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, the impact of channel correlation on the system performance is evaluated; for which, the model considered for generating correlated channels is presented. In addition, for a scenario with imperfect successive interference cancellation (SIC) and uncorrelated STAR-RIS elements, an approximate analytical expression is proposed. 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; SIC; STAR-RIS.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Modelo básico de um sistema assistido por RIS . . . . .	28
Figura 2	Modelo básico de um sistema assistido por STAR-RIS . . . . .	29
Figura 3	Modos de operação da STAR-RIS . . . . .	31
Figura 4	Exemplo do esquema RSMA . . . . .	32
Figura 5	Modelo do Sistema . . . . .	34
Figura 6	Probabilidade de <i>outage</i> vs. potência transmitida para vários valores de espaçamento entre os elementos da STAR-RIS, $d_h$ e $d_v$ . . . . .	40
Figura 7	Probabilidade de <i>outage</i> vs. potência transmitida, variando-se o número de elementos alocados para reflexão e transmissão, $N_r$ e $N_t$ . . . . .	41
Figura 8	Probabilidade de <i>outage</i> 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 $N_t$ . . . . .	42
Figura 9	Probabilidade de <i>outage</i> vs. potência transmitida, variando-se o número de elementos alocados para o usuário refletido, $N_r$ . . . . .	43
Figura 10	Probabilidade de <i>outage</i> vs. potência transmitida, variando-se o fator de erro do SIC imperfeito, $\epsilon$ . . . . .	44
Figura 11	Probabilidade de <i>outage</i> vs. fator de alocação de potência da parte comum das mensagens dos usuários, variando-se o limiar de <i>outage</i> , $\gamma_{th}$ . . . . .	45

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do sistema. . . . .	39
---	----

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5G	Quinta geração
6G	Sexta geração
BS	Estação Rádio-Base ( <i>Base Station</i> )
B5G	Futuro do 5G ( <i>Beyond 5G</i> )
CSI	Informação de Estado de Canal ( <i>Channel State Information</i> )
eMBB	Banda Larga Móvel melhorada ( <i>enhanced Mobile Broadband</i> )
ES	Divisão de Energia ( <i>Energy Splitting</i> )
FDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência ( <i>Frequency Division Multiple Access</i> )
ITU	União Internacional de Telecomunicações ( <i>International Telecommunication Union</i> )
IoT	Internet das coisas ( <i>Internet of Things</i> )
LoS	Linha de Visada ( <i>Line-of-Sight</i> )
MIMO	Múltiplas entradas e Múltiplas Saídas ( <i>Multiple-Input Multiple-Output</i> )
mMTC	Comunicação massiva do Tipo Máquina ( <i>massive Machine Type Communication</i> )
mmWave	Ondas milimétricas ( <i>Millimeter Wave</i> )
MS	Comutação de Modo ( <i>Mode Switching</i> )
NOMA	Acesso Múltiplo Não Ortogonal ( <i>Non-Orthogonal Multiple Access</i> )
OFDMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência Ortogonal ( <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> )
PL	Perda de Percurso ( <i>Pathloss</i> )
RIS	Superfície Inteligente Reconfigurável ( <i>Reconfigurable Intelligent Surface</i> )

RSMA	Acesso Múltiplo por Divisão de Taxa ( <i>Rate-Splitting Multiple Access</i> )
STAR-RIS	RIS com transmissão e reflexão simultânea ( <i>Simultaneously Transmitting And Reflecting RIS</i> )
SIC	Cancelamento Sucessivo de Interferência ( <i>Successive Interference Cancellation</i> )
SINR	Relação Sinal-Interferência-Mais-Ruido ( <i>Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio</i> )
TS	Comutação de Tempo ( <i>Time Switching</i> )
UDN	Rede ultra densa ( <i>Ultra-Dense Network</i> )
URLLC	Comunicação Ultra Confiável e de Baixa Latência ( <i>Ultra-Reliable and Low-Latency Communication</i> )
UVA	Veículo Aéreo Não Tripulados ( <i>Unmanned Aerial Vehicle</i> )
V2X	Veículo para Tudo ( <i>Vehicle-to-Everything</i> )

## LISTA DE SÍMBOLOS

$N$	Número de elementos
$N_r$	Número de elementos para reflexão
$N_t$	Número de elementos para transmissão
$U_r$	Usuário do lado refletido
$U_t$	Usuário do lado transmitido
$N_h$	Número de elementos na horizontal
$N_v$	Número de elementos na vertical
$y_l$	Sinal recebido
$g_l^H$	Coefficiente complexo de canal entre STAR-RIS e Usuário
$\Psi_l$	Matriz diagonal com amplitude e fase de cada elemento
$h$	Coefficiente complexo de canal entre BS e STAR-RIS
$s$	Sinal transmitido
$\alpha_c$	Potência alocada para a parte comum
$\alpha_{p,r}$	Potência alocada para a parte privada do usuário refletido
$\alpha_{p,t}$	Potência alocada para a parte privada do usuário transmitido
$P$	Potência de transmissão
$s_c$	Parte comum da mensagem
$s_r$	Parte privada do usuário refletido
$s_t$	Parte privada do usuário transmitido
$\eta_n$	Coefficiente de transmissão de cada elemento
$\theta_l$	Fase de cada elemento
$R_h$	Matriz de covariância de $h$
$R_g$	Matriz de covariância de $g_l$

$R$	Matriz de correlação espacial
$V_m$	Vetor de coordenadas do $m$ -ésimo elemento
$V_n$	Vetor de coordenadas do $n$ -ésimo elemento
$d_h$	Espaçamento horizontal entre os elementos
$d_v$	Espaçamento vertical entre os elementos
$K_h$	Parâmetro de forma do canal h
$K_{gl}$	Parâmetro de forma do canal $g_l$
$\Omega_h$	Parâmetro de espalhamento do canal h
$\Omega_{gl}$	Parâmetro de espalhamento do canal $g_l$
$\gamma_{l,c}$	SINR da parte comum
$\gamma_{l,p}$	SINR da parte privada
$\gamma$	SNR transmitida
$\gamma_{th}$	Limiar de <i>outage</i> alvo
$\epsilon$	Erro associado ao SIC imperfeito
$F_{\gamma_{l,c}}$	CDF da parte comum
$F_{\gamma_{l,p}}$	CDF da parte privada
$F_{\gamma_{l,c}, \gamma_{l,p}}$	CDF conjunta
$\Delta_{c,i}$	Constante que compõe a SINR da parte comum
$\Delta_{l,i}$	Constante que compõe a SINR da parte privada
$X_{\phi l}$	Módulo do ganho fim-a-fim
$f_{X_{\phi l}}(x)$	PDF de $X_{\phi l}$
$\Xi_{\phi}$	Variável auxiliar
$E_{\phi l}$	Média de $X_{\phi l}$
$V_{\phi l}$	Variância de $X_{\phi l}$
$F_{\phi l}$	CDF de $X_{\phi l}$ ,
TR	Modo transmissão-reflexão

## TRABALHOS PUBLICADOS PELO AUTOR

- E. G. Gomes e E. E. B. Olivo, "Avaliação de Desempenho de Redes Baseadas em RSMA e Assistidas por STAR-RIS sob Canais Correlacionados", XLI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais (SBrT'23), São José dos Campos, SP, Brasil, Out. 2023.
- E. G. Gomes e E. E. B. Olivo, "Avaliação de desempenho de sistemas de comunicação sem fio assistidos por STAR-RIS e baseados em RSMA", XLII Congresso Nacional de Matemática Aplicada e Computacional (CNMAC 2023) Bonito, MS, Brasil, Set. 2023.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	TRABALHOS RELACIONADOS	18
1.3	OBJETIVOS	21
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo Geral</b>	<b>21</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>21</b>
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	22
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>23</b>
2.1	PERDA DE PERCURSO	23
2.2	MODELO SIMPLIFICADO DE PERDA DE PERCURSO	24
2.3	SOMBREAMENTO	25
2.4	DESVANECIMENTO DE PEQUENA ESCALA	25
<b>2.4.1</b>	<b>Desvanecimento do tipo Rayleigh</b>	<b>26</b>
<b>2.4.2</b>	<b>Desvanecimento do Tipo Rice</b>	<b>26</b>
2.5	RIS	27
2.6	STAR-RIS	28
<b>2.6.1</b>	<b>Modos de operação STAR-RIS</b>	<b>29</b>
2.7	RSMA	30
2.8	MÉTRICAS DE DESEMPENHO	31
<b>2.8.1</b>	<b>Probabilidade de Outage</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>MODELO DO SISTEMA</b>	<b>33</b>
3.1	GERAÇÃO DE COEFICIENTES DE CANAL CORRELACIONADOS	35
<b>4</b>	<b>PROBABILIDADE DE <i>OUTAGE</i></b>	<b>36</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS FINAIS E DISCUSSÃO</b>	<b>39</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>46</b>
6.1	CONCLUSÕES	46
6.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	47
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>48</b>

## 1 INTRODUÇÃO

No primeiro capítulo, forneceremos uma visão abrangente do cenário atual das comunicações sem fio, abordando diversas tecnologias e também delineando perspectivas para a próxima geração de redes sem fio, conhecida como 6G. Este capítulo será subdividido nas seguintes seções: a Seção 1.1 abordará a motivação por trás deste trabalho, a Seção 1.2 apresentará pesquisas correlatas sobre o tema, a Seção 1.3 explicará os objetivos deste trabalho, e por fim, a Seção 1.4 apresenta a organização do presente trabalho.

### 1.1 MOTIVAÇÃO

Devido à evolução tecnológica e às aplicações orientadas para a tecnologia, houve um aumento repentino na demanda por taxas de dados mais elevadas, suporte a um número massivo de dispositivos conectados à rede e novos serviços de multimídia. Consequentemente, as redes atuais de quinta geração (5G) e as futuras redes de sexta geração (6G) devem ser projetadas para atender a essa demanda, a fim de habilitar novas tecnologias.

Tecnologias e aplicações como veículos aéreos não tripulados (*UVAs, Unmanned Aerial Vehicles*), indústria 4.0, Internet das coisas (IoT, *Internet of Things*) e veículos para tudo (V2X, *Vehicles-to-Everything*), entre outras, exigirão de duas a três vezes mais eficiência espectral do que o disponível nas tecnologias atuais. Portanto, é necessário estudar novas técnicas e tecnologias para o futuro do 5G ((B5G), *Beyond 5G*) e para o 6G [1].

De acordo com a União Internacional de Telecomunicações (ITU, *International Telecommunication Union*), as redes B5G e 6G já implementadas ou que serão implementadas devem ser baseadas em três serviços fundamentais: Banda Larga Móvel melhorada (eMBB, *enhanced Mobile Broad band*), Comunicação massiva do Tipo Máquina (mMTC, *massive Machine Type Communication*) e Comunicação Ultra Confiável e de Baixa Latência (URLLC, *Ultra-Reliable and Low-Latency Communication*). O eMBB deve proporcionar maiores taxas de transmissão de dados; o mMTC deve proporcionar à rede a capacidade e o suporte para um número massivo de dispositivos conectados em uma área limitada; e o URLLC deve gerenciar e garantir que a comunicação na rede seja realizada com baixa latência e com baixíssima perda de pacotes [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 utilizando a faixa de frequência das ondas milimétricas (mmWave, *Millimeter Wave*), entre outras. No entanto, a alta complexidade

e o custo do hardware, bem como o aumento do consumo de energia, são questões cruciais diretamente ligadas a essas tecnologias e que ainda estão em foco nas pesquisas [3].

Para contornar esses problemas, as superfícies inteligentes reconfiguráveis (RIS, *Reconfigurable Intelligent Surfaces*) têm sido consideradas como uma técnica revolucionária de camada física nas redes 6G. RIS é uma tecnologia composta por muitos elementos refletivos de baixo custo que recentemente atraiu significativa atenção devido à sua capacidade na manipulação de ondas eletromagnéticas [4].

Com a tecnologia RIS, é possível realizar a reconfiguração do cenário de comunicação sem fio usando vários elementos refletivos passivos integrados a superfícies planas, capazes de melhorar o desempenho das redes sem fio. Essas superfícies são capazes de refletir o sinal de forma independente, controlando a fase e amplitude do sinal. Isso permite redirecionar o sinal proveniente de uma fonte, ampliando o alcance de transmissão ou até mesmo criando pontos de cancelamento de interferência, melhorando consideravelmente o desempenho do sistema. No entanto, a maioria das contribuições existentes atualmente considera o caso em que as RISs só são capazes de refletir o sinal incidente (referido como RISs convencionais) [4].

Para contornar a limitação das RISs convencionais, o conceito de RIS com transmissão e reflexão simultânea (STAR-RISs, *Simultaneously Transmitting And Reflecting RIS*) foi introduzido. 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 assistidos por RIS depende significativamente do projeto e da geometria das superfícies. Em particular, o posicionamento próximo dos elementos RIS em uma geometria retangular leva a uma correlação espacial entre os canais correspondentes. Em ambientes de espalhamento isotrópico, os canais RIS não permanecem independentes, como amplamente assumido na literatura disponível, devido à correlação espacial. A força dessa correlação espacial entre os canais depende principalmente da distância euclidiana entre os elementos. Recentemente, sistemas assistidos por RIS com correlação espacial foram analisados, onde as variações na relação sinal-ruído (SNR, *Signal-to-Noise Ratio*) sobre canais espacialmente correlacionados foram investigadas. Os resultados mostraram variações menores de SNR são alcançadas com o aumento do número de elementos da RIS, e aumentando a distância entre os elementos, reduzindo assim a correlação entre eles [6].

As técnicas de acesso múltiplo têm ganhado bastante relevância para permitir que

os sistemas de comunicação B5G e 6G atendam às expectativas. Algumas soluções estão sendo exploradas em diferentes camadas e também por meio de abordagens entre camadas, como o acesso múltiplo não ortogonal (NOMA, *Non-Orthogonal Multiple Access*) e o acesso múltiplo por divisão de taxa (RSMA, *Rate-Splitting Multiple Access*). Essas técnicas são consideradas devido à capacidade de atender a vários usuários simultaneamente. Para questões de camada física, tecnologias como RIS e STAR-RIS estão sendo pesquisadas conjuntamente com NOMA e RSMA para melhorar o desempenho dos sistemas de comunicação sem fio.

O protocolo RSMA surgiu como uma técnica para os B5G e 6G. Neste protocolo, a mensagem é dividida no transmissor em duas partes: uma parte comum entre todos os usuários e uma parte privada para cada usuário. O cancelamento de interferência sucessiva (SIC, *Successive Interference Cancellation*) é usado para decodificar a informação na extremidade do usuário receptor. Isso o torna capaz de fazer a conexão fim-a-fim no caso de decodificação totalmente interferência, como no NOMA, e o caso de tratá-lo todo como ruído, como tradicionalmente faz o acesso múltiplo por divisão de espaço (SDMA, *Space Division Multiple Access*) e MIMO. Essa flexibilidade do RSMA possibilita que ele alcance desempenhos melhores em termos de *throughput* do que tecnologias de múltiplo acesso anteriores como NOMA, SDMA, 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. Além disso, para um cenário com cancelamento sucessivo de interferência (SIC) imperfeito e canais descorrelacionados, uma expressão analítica aproximada é proposta. A Seção 1.2 apresenta alguns trabalhos relacionados ao tema, que serviram de base para este estudo.

## 1.2 TRABALHOS RELACIONADOS

O artigo [8] apresenta três protocolos práticos de operação para STAR-RISs: *Energy Splitting* (ES), *Mode Switching* (MS) e *Time Switching* (TS). O artigo também considera um sistema de comunicação *downlink* auxiliado por STAR-RIS para transmissão unicast e multicast, composto por uma estação rádio base (BS, *Base Station*) e dois usuários. Para cada protocolo operacional, os autores formulam um problema de otimização conjunta

do *beamforming* ativo e passivo, com o objetivo de minimizar o consumo de energia da BS. Observou-se que, em geral, os protocolos operacionais TS e ES são preferíveis para transmissão *unicast* e *multicast*, respectivamente, e que o consumo de energia é significativamente reduzido para ambos os cenários com os métodos propostos.

No estudo apresentado em [5], foi realizada uma análise comparativa entre a RIS convencional e a STAR-RIS, considerando a probabilidade de *outage* e a análise de campo próximo e distante para ambos os casos. O desempenho dos modelos de canal propostos pelos autores foi verificado por meio de simulações numéricas, que também evidenciaram as diferenças entre os ganhos de canal nas regiões de campo próximo e distante. Os resultados mostraram que a STAR-RIS podem estender a cobertura e alcançar uma ordem de diversidade mais alta em ambos os lados da superfície, em comparação com as RIS convencionais.

No artigo [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.

O artigo [9] aborda a utilização da diversidade de polarização para melhorar o desempenho de sistemas MIMO. A diversidade ajuda a mitigar o SIC imperfeito em esquemas RSMA. Esse estudo propõe estratégias que permitem a transmissão de múltiplos fluxos de dados independentes em duas polarizações, visando mitigar os efeitos adversos do SIC imperfeito. A modelagem considera diferentes valores para o fator de erro do SIC e analisa o impacto dessas imperfeições na qualidade do sinal recebido. A abordagem proposta demonstra ganhos significativos de desempenho em relação a sistemas MIMO convencionais, destacando a eficácia da utilização da diversidade de polarização para superar desafios associados ao SIC imperfeito.

Um estudo sobre o uso combinado de RSMA e RIS é apresentado em [10]. A integração dessas técnicas destacada diversas vantagens. Primeiramente, há um aumento na eficiência espectral, pois pesquisas anteriores demonstraram que a eficiência espectral do RSMA é sempre maior ou igual a outras técnicas de acesso múltiplo, independentemente das condições do canal. Além disso, o RSMA auxiliado por RIS, tem uma eficiência espectral ainda maior do que o SDMA/NOMA auxiliado por RIS. Isso também resulta em uma maior área de cobertura e flexibilidade no controle do feixe. O RSMA é uma técnica

de acesso múltiplo que constrói uma "ponte" flexível entre SDMA e NOMA, permitindo o gerenciamento de forma inteligente das interferências em diferentes cenários. A RIS pode ser implantada como outra "ponte" entre o transmissor e o receptor, permitindo a extensão da cobertura de comunicação e aprimorando a flexibilidade do controle de feixe, juntamente com o projeto de *beamforming*.

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.

O artigo [11] apresenta a utilização conjunta de RSMA e STAR-RIS considerando o modelo de desvanecimento do tipo Rice. A configuração considerada é uma BS transmitindo informações para usuários na borda da célula, que são auxiliados pela STAR-RIS. Dois usuários, um na frente e outro atrás da RIS, são atendidos por reflexão e transmissão. Os modos de operação ES e MS foram escolhidos para a análise da STAR-RIS, e a correlação espacial entre os elementos da STAR-RIS também foi considerada. Através da probabilidade de *outage*, foram avaliados os efeitos dos parâmetros como o coeficiente de reflexão, espaçamento entre os elementos e distância entre a STAR-RIS e os usuários. Os resultados indicaram 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 e dispostos de maneira alternada. 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 do RIS. Além disso, foi realizada uma comparação entre RSMA e NOMA, demonstrando que o RSMA tem uma probabilidade de *outage* menor que o NOMA.

Em [12], estuda-se o uso da STAR-RIS para auxiliar a comunicação de múltiplos dispositivos distribuídos de acordo com um processo de Poisson, os quais acessam o canal por meio do protocolo RSMA. O estudo analisa a probabilidade de *outage* do sistema, considerando diferentes modos de operação da STAR-RIS e parâmetros do sistema tais como: o fator de divisão de potência para o esquema RSMA, o número de elementos da STAR-RIS, as distâncias entre a STAR-RIS e os dispositivos. A expressão para a probabilidade de *outage* é fornecida em forma fechada em termos da função Meijer-G. Os resultados indicam que o aumento do número de elementos da STAR-RIS e o aumento da densidade de dispositivos pode melhorar o desempenho da comunicação

no sistema.

No trabalho em [13] foi apresentado a ASTARS (Active Simultaneously Transmitting/ Reflecting Surface). A ASTARS é uma STAR-RIS que opera no modo ativo, permitindo que os elementos da superfície transmitam e reflitam sinais simultaneamente de forma ativa. Nesse trabalho, a ASTARS é utilizada em um sistema comunicação sem fio por meio do esquema de RSMA. Nesse cenário, a ASTARS opera no modo ES, onde todos elementos transmitem e refletem. Este cenário considera que os usuários do lado refletido possuem linha visada com a BS, já os usuários do lado transmitido não possuem linha de visada. Além disso, é considerado o efeito do SIC imperfeito, considerando um modelo Gaussiano para este efeito. A ASTARS demonstra melhorias na eficiência energética, probabilidade *outage* e capacidade do sistema, destacando a importância do modo ES na ASTARS para otimizar o desempenho das redes de comunicação sem fio.

A próxima seção apresenta os objetivos gerais e específicos deste trabalho.

### 1.3 OBJETIVOS

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Neste trabalho, objetiva-se 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 fator de correlação em função do espaçamento entre elementos da STAR-RIS, o fator de alocação de potência para as mensagens dos usuários no esquema RSMA e o número de elementos da STAR-RIS. Além disso, para um cenário com cancelamento sucessivo de interferência (SIC) imperfeito e canais descorrelacionados, uma expressão analítica aproximada é proposta.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Propor um sistema assistido por STAR-RIS e baseado em RSMA;
- Determinar a relação sinal-interferência-mais-ruído (SINR, *Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio*) fim-a-fim do sistema por meio de análise de sinais;
- Avaliar o desempenho do sistema em termos da probabilidade de *outage*, por meio de rotinas de simulação e do método de Monte Carlo;
- Investigar os efeitos da correlação, do fator de alocação de potência e do número de elementos na probabilidade de *outage* do sistema.
- Propor um modelo de aproximação para um cenário com SIC imperfeito e canais descorrelacionados.

- Confrontar a aproximação proposta com as simulações e avaliar a confiabilidade da aproximação.

Na seção seguinte, a organização deste trabalho é apresentada.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Os capítulos seguintes deste trabalho são organizados da seguinte maneira:

- O **Capítulo 2** apresenta os fundamentos teóricos necessários para a compreensão deste trabalho.
- O **Capítulo 3** apresenta o modelo do sistema que foi considerado neste trabalho.
- O **Capítulo 4** apresenta a SINR e probabilidade de *outage* do sistema, bem como a aproximação proposta.
- No **Capítulo 5**, os resultados numéricos são apresentados, a fim de avaliar o impacto dos parâmetros do sistema.
- As conclusões deste trabalho e as sugestões de trabalhos futuros são apresentadas no **Capítulo 6**.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção serão apresentados os conceitos e fundamentos teóricos relacionados ao tema proposto para este trabalho. Mais especificamente, nas Seções 2.1 a 2.4 será apresentada uma revisão de conceitos sobre propagação de sinais em canais sem fio. As subseções 2.4.1 e 2.4.2 apresentam alguns modelos de desvanecimento de pequena escala. A Seção 2.5 apresenta os conceitos básicos da tecnologia RIS, já a Seção 2.6 apresenta o conceito da STAR-RIS. Na Seção 2.7 é apresentado os conceitos fundamentais da técnica RSMA e por fim, a Seção 2.8 apresenta as métricas de desempenho que serão utilizadas neste trabalho.

O principal desafio em uma rede de comunicação sem fio reside em alcançar um alto nível de confiabilidade na comunicação e atender às crescentes demandas por taxa de dados. Isso se deve à suscetibilidade do canal a diversos fatores, como ruído, interferência e obstáculos variáveis ao longo do tempo de maneira aleatória. Esses obstáculos podem ser categorizados em dois grupos: os efeitos de propagação em grande escala, que incluem a perda do sinal devido à distância e ao sombreamento, e o fenômeno de desvanecimento de multipercurso, que descreve os efeitos em pequena escala.

### 2.1 PERDA DE PERCURSO

A perda de percurso (PL, *pathloss*) é causada pela dissipação da potência irradiada pelo transmissor através do percurso percorrido pelo sinal entre o transmissor e receptor, como também pelos efeitos de propagação do canal. Os efeitos de perda de percurso normalmente ocorrem em distâncias bem maiores que o comprimento de onda  $\lambda$  [14].

A perda de percurso é a razão entre a potência transmitida e a potência recebida, para um determinado caminho de propagação, dependendo da distância de propagação do sinal. A propagação no espaço livre é o modelo mais simples de perda de percurso. Esta propagação é representada por um sinal que viaja entre dois pontos sem sofrer nenhum tipo de bloqueio durante o percurso. Esse modelo de canal é comumente chamado de canal LoS (*Line of Sight*), devido ao fato de que para este modelo, existe somente uma componente LoS entre transmissor e receptor. Então para este modelo podemos dizer que a PL(dB) é dada por [14]

$$P_L(dB) = 10 \log \frac{P_t}{P_r} = -10 \log \frac{G_l \lambda^2}{(4\pi d)^2}, \quad (2.1)$$

em que  $P_t$  é a potência transmitida,  $P_r$  é a potência recebida,  $G_l$  é o produto dos ganhos das antenas do transmissor e do receptor na direção LoS,  $\lambda = c/f$  é o comprimento de

onda, sendo  $c$  a velocidade da luz,  $f$  a frequência de operação do sistema, e  $d$  a distância entre transmissor e receptor.

Dessa forma é possível observar que a perda de percurso é inversamente proporcional ao quadrado das distâncias entre transmissor e receptor. Além disso, nota-se que a perda de percurso é diretamente proporcional ao comprimento de onda, de forma que, com o aumento da frequência a perda de percurso aumenta, isso significa que, ao aumentarmos a frequência de operação a potência recebida irá diminuir. Porém o modelo de propagação no espaço livre, não representa de maneira apropriada a maioria dos cenários. Por conta disso diversos modelos foram desenvolvidos, em que cada modelo se adéqua melhor a certos cenários.

## 2.2 MODELO SIMPLIFICADO DE PERDA DE PERCURSO

Por ser muito complexa a propagação do sinal, torna-se difícil encontrar um modelo único capaz de modelar com precisão as variações sofridas pelo sinal durante o trajeto. Alguns modelos mais precisos de perda de percurso são obtidos através de modelos analíticos extremamente complexos ou medições empíricas onde se tem informações massivas sobre o ambiente de propagação.

Porém é possível definir um modelo simplificado que se aproxima de forma coerente a vários modelos complexos. O modelo simplificado de perda de percurso, que será apresentado a seguir, é um modelo comumente usado em projetos de sistemas que é baseado em função da distância percorrida pelo sinal. O modelo simplificado de perda de percurso é dado por [14]

$$P_r = P_t K_0 \left[ \frac{d_0}{d} \right]^\alpha, \quad (2.2)$$

em que  $K_0$  é uma constante adimensional que depende das características das antenas do sistema e do ganho médio do canal,  $d_0$  é a distância de referência para o campo distante da antena e  $\alpha$  é o expoente de perda de percurso. Os valores para tais constantes tem seu valor aproximado para representar um modelo analítico ou empírico. Devido aos efeitos de espalhamento na antena, este modelo só é valido para transmissões onde  $d > d_0$ . A distância  $d_0$  assume normalmente valores de 1-10 metros em ambientes *indoors* e 10-100 metros para ambientes *outdoors*. O expoente de perda de percurso  $\alpha$  varia de acordo com o ambiente analisado, de acordo com [14, Tabela 2.2], em ambientes urbanos com macro células podemos ter o valor de  $\alpha$  variando de 3,7 até 6,5. Já microcélulas podemos ter valores de  $\alpha$  variando entre 2,5 até 3,5.

### 2.3 SOMBREAMENTO

Todo sinal que é transmitido através de um canal sem fio experimenta variações aleatórias devido a vários fatores, e um deles é o bloqueio físico do sinal. O sombreamento é outro efeito considerado de grande escala, tal efeito ocorre devido ao fato de objetos e obstáculos estarem no caminho pelo qual o sinal percorre, e isso faz com que, o sinal sofra alterações, mudanças de fase e atenuações. Tais variações aleatórias também podem ser causadas por alterações em superfícies refletoras e objetos diversos presentes no percurso do sinal. E por conta disso faz-se necessário modelar tais efeitos. Contudo, para esta modelagem é preciso levar em consideração as características dos objetos bloqueantes, como seu tamanho, capacidades dielétricas, localização, como também as mudanças causadas pelas superfícies refletoras e objetos de dispersão. Porém tais objetos geram variações aleatórias no sinal, e dessa forma é necessário a utilização de modelos estatísticos para a caracterização de tais efeitos.

O modelo mais comum para a atenuação é o modelo de sombreamento log-normal, tal modelo foi confirmado empiricamente para modelar com precisão a variação na potência recebida em alguns ambientes de propagação. Dessa forma podemos definir o modelo de sombreamento log-normal em razão da potência transmitida e recebida  $\psi = \frac{P_t}{P_r}$ , assume-se uma distribuição log-normal dada por [14]

$$p(\psi) = \frac{\zeta}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\psi_{dB}}\psi} \exp \left[ -\frac{(10 \log_{10} \psi - \mu_{\psi_{dB}})^2}{2\sigma_{\psi_{dB}}^2} \right], \quad (2.3)$$

em que  $\zeta = 10/\ln 10$ ,  $\mu_{\psi_{dB}}$  é a média de  $\psi_{dB} = 10 \log_{10} \psi$ , dado em dB, e  $\sigma_{\psi_{dB}}$  é o desvio padrão de  $\psi_{dB}$ .

### 2.4 DESVANECIMENTO DE PEQUENA ESCALA

O desvanecimento de pequena escala é um efeito causado pelas rápidas flutuações nas características dos sinais transmitidos em uma curta distância ou pequeno período de tempo. As variações causam alterações de fase e/ou amplitude, atenuação, reforço ou distorção do sinal dependendo dos parâmetros de desvanecimento. Para sistemas de comunicação sem fio, o desvanecimento é causado devido a propagação do sinal por multipercursos, onde o sinal é replicado diversas vezes por reflexões, difrações, espalhamento espectral ou até mesmo atenuações sofridas ao longa da propagação. E ao chegar no receptor tais replicas são combinadas, de forma destrutiva ou construtiva, podendo assim gerar uma recepção de boa ou má qualidade [15]. Uma característica de um canal multipercurso é o atraso de tempo no sinal recebido, este atraso é caracterizado pelo atraso entre a chegada do primeiro componente de sinal e o último componente do sinal recebido. Outra característica do sinal multipercurso é a variação no tempo, isso ocorre

pelo fato de o transmissor ou receptor estarem em movimento, dando assim, origem aos múltiplos percursos. O desvanecimento pode ser caracterizado estatisticamente por várias distribuições, como por exemplo a distribuição do tipo Rayleigh, Rice, Nakagami- $m$ , Fluctating-Two-Ray, dentre outras. A seguir será apresentado o desvanecimento do tipo Rayleigh e Rice, ilustrando o seu coeficiente complexo de canal e suas funções de probabilidade [16].

#### 2.4.1 Desvanecimento do tipo Rayleigh

O coeficiente complexo de canal do tipo Rayleigh é dado por

$$h = X + jY, \quad (2.4)$$

em que  $X$  e  $Y$  são variáveis aleatórias (VAs) gaussianas independentes e identicamente distribuídas com média zero e variância  $\frac{\Omega}{2}$ , ou seja,  $X \sim \mathcal{N}(0, \frac{\Omega}{2})$  e  $Y \sim \mathcal{N}(0, \frac{\Omega}{2})$ , sendo  $\Omega = E[|h|^2]$  é o ganho médio de canal.

A função densidade de probabilidade (PDF, *Probability Density Function*) e a função distribuição acumulada (CDF, *Cumulative Distribution Function*) de uma VA com distribuição do tipo Rayleigh em função do coeficiente de canal são, respectivamente, dadas por [16]

$$f_{|h|}(x) = \frac{2x}{\Omega} \exp\left(-\frac{x^2}{\Omega}\right), \quad (2.5)$$

$$F_{|h|}(x) = 1 - \exp\left(-\frac{x^2}{\Omega}\right). \quad (2.6)$$

#### 2.4.2 Desvanecimento do Tipo Rice

Para o desvanecimento do tipo Rice há uma diferença no coeficiente complexo de canal em relação àquele utilizado para o modelo de canal do tipo Rayleigh dado em (2.4). Assim para o caso Rice, tem-se que

$$h = c + X + jY. \quad (2.7)$$

Nota-se que é o termo  $c$  é introduzido, que caracteriza a componente de linha de visada entre transmissor e receptor, sendo que a potência da componente da linha de visada é dada por  $c^2$ .

A PDF de uma VA com distribuição do tipo Rice é dado por [17]

$$f_{|h|}(x) = \frac{2(1+K)\exp(-K)x}{\Omega} \exp\left(-\frac{(1+K)x^2}{\Omega}\right) I_0\left(2x\sqrt{\frac{K(K+1)}{\Omega}}\right), \quad (2.8)$$

em que  $K$  é o fator de Rice, definido como a razão entre a potência da componente especular (ou de linha de visada,  $c^2$ ) e a potência média da componente difusa (sem

linha de visada,  $2\sigma^2$ ), e  $I_0(\cdot)$  é a função Bessel modificada de primeira espécie e ordem zero. Nota-se que, diferentemente do caso Rayleigh que depende somente do parâmetro  $\Omega$ , a distribuição de Rice depende de dois parâmetros  $K$  e  $\Omega$ , sendo que  $K = c^2/2\sigma^2$  e  $\Omega = c^2 + 2\sigma^2$ . Dessa forma é possível modelar diversos cenários com e sem linha de visada (sendo, para este último caso,  $K = 0$  e  $c = 0$ ). Para  $K = 0$  e  $c = 0$ , a distribuição do tipo Rice resulta na distribuição de Rayleigh, sendo assim um caso particular da distribuição de Rice.

Já a CDF de uma VA com distribuição do tipo Rice é dada por [17]

$$F_{|h|}(x) = 1 - Q_1\left(\frac{c}{\sigma}, \frac{x}{\sigma}\right), \quad (2.9)$$

em que  $Q_1(\cdot, \cdot)$  é a função Q de Marcum de primeira ordem.

## 2.5 RIS

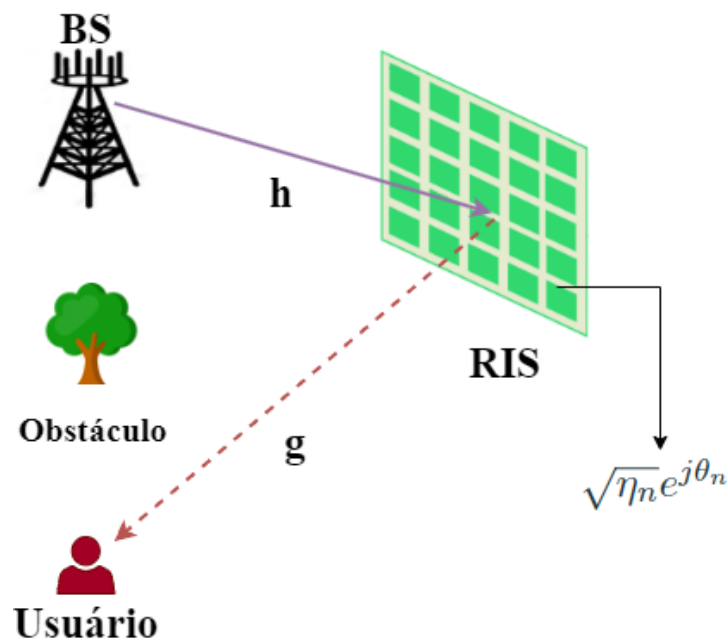
As superfícies inteligentes reconfiguráveis (RIS) são uma tecnologia proposta para a nova geração de redes sem fio o 6G. Tal tecnologia é vista como habilitadora pois, com o auxílio e implementação da mesma, será possível alcançar taxas de dados mais elevadas, suporte a um número massivo de dispositivos e uma alta confiabilidade na comunicação sem fio, sendo tais requisitos necessários nas redes 6G. Uma RIS é composta de uma superfície plana que contém um grande número de elementos refletivos passivos de baixo custo [4]. Tal superfície possui  $N$  elementos refletivos onde cada um, independentemente, é capaz de induzir uma mudança de fase e/ou amplitude no sinal incidente. Dessa forma, diferentemente das técnicas e tecnologias utilizadas atualmente, uma RIS permite reconfigurar o cenário de propagação no qual está inserida por meio de reflexões inteligentes e controláveis. Existe uma gama de aplicações possíveis para a RIS, como por exemplo: fornecer uma linha de visada virtual para um canal onde o receptor está em uma zona sem cobertura de sinal por meio de LoS (*dead zone*), ou até mesmo aumentar a confiabilidade de um sistema com enlace LoS presente, dentre outras aplicações já citadas.

A parte de hardware da RIS é baseada no conceito de metassuperfície, feita de metamateriais que são configuráveis de forma digital [18]. A metassuperfície é, de forma resumida, um arranjo constituído por um grande número dos chamados meta-átomos com espessura elétrica na ordem do sub comprimento de onda da frequência de operação de interesse [19]. É necessário projetar os elementos de forma adequada, considerando no projeto alguns fatores como por exemplo o tamanho, forma geométrica, orientação, arranjo, dentre outras características, e a partir desse projeto é possível modificar a resposta (amplitude de reflexão e deslocamento de fase) de cada elemento refletivo da RIS. Vale ressaltar que para aplicações em redes sem fio, o coeficiente de reflexão de cada elemento da RIS deve ser variável para poder atender as demandas e as

variações dinâmicas decorrente da movimentação do usuário, sendo assim necessária uma configuração em tempo real. Tal reconfiguração pode ser alcançada utilizando diodos PIN, transistores FETs ou interruptores do sistema microeletromecânico [4].

O modelo de comunicação de uma rede que usa RIS é feito por um sistema de duplo salto, onde temos um enlace transmissor-RIS e outro RIS-receptor, sendo que o primeiro salto representa o enlace Transmissor-RIS, já o segundo salto representa o enlace entre o RIS-Receptor. Cada elemento da RIS irá receber sinais provenientes de múltiplos caminhos sobrepostos, e depois disso, retransmite o sinal combinado ajustando a fase e/ou amplitude. A Figura 1 apresenta um sistema assistido por RIS.

Figura 1 – Modelo básico de um sistema assistido por RIS



Fonte: Produção do próprio autor.

## 2.6 STAR-RIS

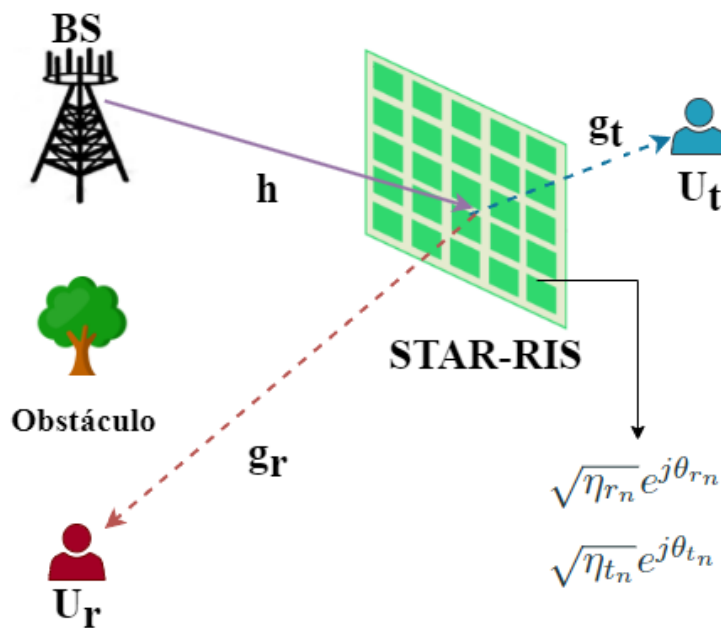
Nesta seção será apresentado algumas limitações da RIS e como a STAR-RIS é utilizada para contorná-las.

A comunicação assistida por RIS é capaz de melhorar o desempenho das redes sem fio através do redirecionamento do sinal de forma independente, controlando sua fase e amplitude, ampliando o alcance de transmissão ou criando pontos de cancelamento de interferência. Porém, a RIS é capaz somente de refletir o sinal incidente.

Para contornar essa limitação das RISs convencionais, o conceito de RIS com capacidade de transmissão e reflexão simultâneas (STAR-RIS) foi proposto recentemente [5].

Na STAR-RIS, ocorre a subdivisão do sinal incidente em duas componentes. A primeira delas corresponde ao sinal refletido na mesma direção do sinal incidente, enquanto a segunda se refere ao sinal transmitido na direção oposta à do sinal incidente. Através do controle dos coeficientes de reflexão e transmissão dos elementos, a STAR-RIS possibilita a manipulação eficaz dos sinais transmitidos e refletidos. Isso resulta na criação de um ambiente altamente adaptável e versátil para a propagação dos sinais de informação, o que reveste essa tecnologia de grande importância para diversas aplicações científicas e tecnológicas [5]. A Figura 2 apresenta um sistema com dois usuários assistido pela STAR-RIS.

Figura 2 – Modelo básico de um sistema assistido por STAR-RIS



Fonte: Produção do próprio autor.

A STAR-RIS possui três modos de operação, esses modos serão apresentados na subseção seguinte.

### 2.6.1 Modos de operação STAR-RIS

Nesta subseção os três modos de operação da STAR-RIS são apresentados, sendo eles *Energy Splitting*, *Mode Switching* e *Time Switching*.

- a) *Energy Splitting (ES)*: Todos os elementos da STAR-RIS operam no modo transmissão-reflexão (TR), onde a energia do sinal que incide sobre cada elemento é dividida para os sinais transmitidos e refletidos, com coeficientes de reflexão e transmissão dados por  $\eta_r$  e  $\eta_t$ , onde  $\eta_r, \eta_t \in [0, 1]$ . No modo ES, há um notável potencial de flexibilidade no projeto dos sistemas de comunicação, uma vez que

os coeficientes de transmissão e reflexão de cada elemento podem ser otimizados. No entanto, é importante observar que essa flexibilidade vem acompanhada de desafios, como o considerável número de variáveis de projeto envolvidas, o que, por sua vez, resulta em uma sobrecarga substancial na troca de informações de configuração entre a BS e a STAR-RIS.

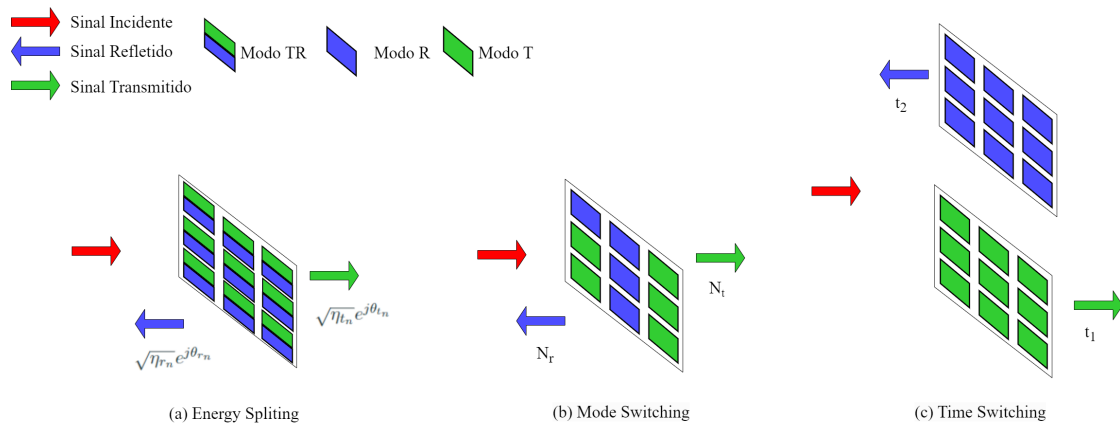
- b) *Mode Switching (MS)*: Todos os componentes da STAR-RIS são categorizados em dois conjuntos distintos. Especificamente, um grupo inclui os elementos  $N_t$ , que operam no modo de transmissão, enquanto o outro conjunto é composto pelos elementos  $N_r$ , que operam no modo reflexão, de tal modo que a soma de  $N_t$  e  $N_r$  é igual a  $N$ . Dessa forma,  $\eta_r, \eta_t \in \{0, 1\}$ . Podemos notar que o modo MS é visto como uma instância específica do ES, onde os coeficientes de transmissão e reflexão são restritos a valores binários. Devido a essa restrição, o MS geralmente não consegue atingir o mesmo nível de otimização de feixe, e em ganho de potência em relação ao modo ES. Isso ocorre porque, no MS, apenas um subconjunto dos elementos é selecionado para transmissão e reflexão, respectivamente. No entanto, o MS ainda é atraente na prática, já que a implementação de um protocolo operacional do tipo "ligado-desligado" é significativamente mais simples em comparação com o protocolo ES.
- c) *Time Switching (TS)*: Ao contrário dos sistemas ES e MS, o TS introduz uma abordagem única que aproveita o domínio do tempo, alternando periodicamente todos os elementos entre os modos de transmissão (T) e reflexão (R) em intervalos de tempo distintos. Onde  $\eta_r, \eta_t \in \{0, 1\}$ . Em contraste com os protocolos ES e MS, o protocolo TS apresenta uma abordagem que se concentra na exploração do domínio temporal. Os coeficientes de transmissão e reflexão para o modo TS, ao contrário dos protocolos ES e MS, não estão acoplados, tornando a otimização mais fácil. No entanto, a alternância periódica dos elementos em TS impõe demandas rigorosas de sincronização temporal, o que, por sua vez, implica uma maior complexidade na implementação de hardware.

A Figura 3 apresenta os modos de operação da STAR-RIS.

## 2.7 RSMA

As técnicas de acesso múltiplo estão adquirindo crescente importância para atender às expectativas dos sistemas de comunicação 5G e 6G. Diversas soluções estão sendo exploradas em diferentes camadas, bem como em abordagens intercadas, como o NOMA e o RSMA. Essas técnicas são consideradas devido à sua capacidade de atender a múltiplos usuários simultaneamente.

Figura 3 – Modos de operação da STAR-RIS



Fonte: Produção do próprio autor.

O protocolo RSMA, desenvolvido para sistemas B5G e 6G, apresenta uma abordagem na qual a mensagem de transmissão é dividida em duas partes distintas no transmissor: uma parcela comum, compartilhada por todos os usuários, e uma parcela privada destinada a cada usuário. O SIC é empregado na etapa receptora para decodificar as informações. O RSMA adota uma estratégia de decodificação parcial da interferência, tratando-a parcialmente como ruído. Essa característica permite que o RSMA realize a comunicação de ponta a ponta, combinando o enfoque de decodificação completa da interferência, como no NOMA, e o tratamento total dos sinais de outros usuários como ruído, como é típico no SDMA e MIMO [7].

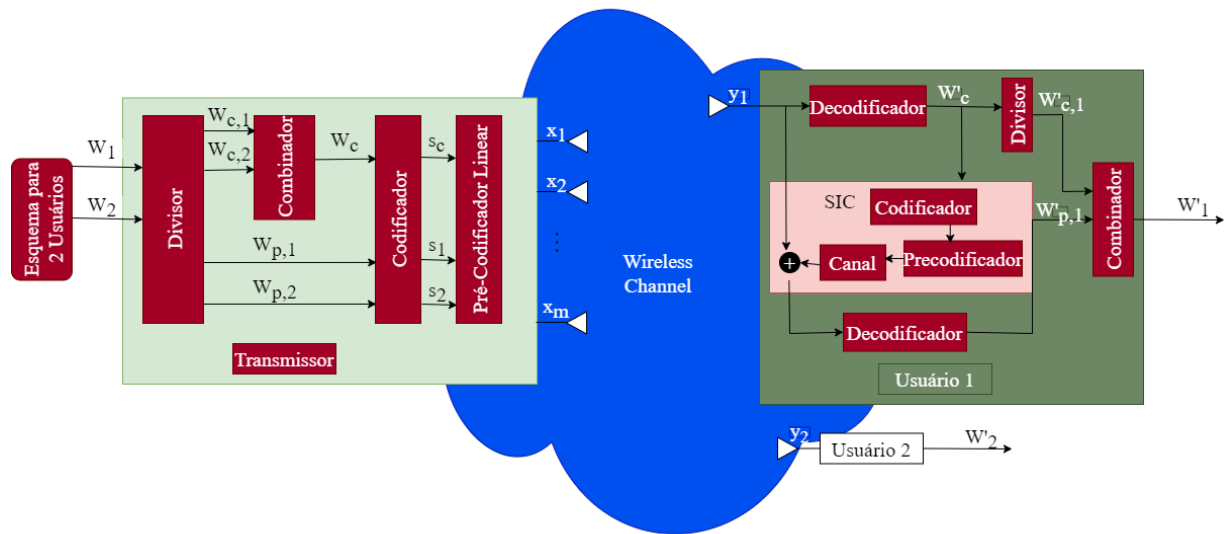
Essa versatilidade do RSMA proporciona desempenho superior em termos de *throughput* em comparação com tecnologias de acesso múltiplo anteriores, tais como NOMA, SDMA, FDMA, e OFDMA [7].

A Figura 4 apresenta uma arquitetura de RSMA, onde, no transmissor, a mensagem é dividida na parte comum e privada para cada usuário, depois disso codificada e enviada. No receptor de cada usuário é feito um processo do SIC para recuperar a parte comum da mensagem, após isso é feito outro SIC para recuperar sua parte privada, após isso a parte comum e sua parte privada são combinadas recuperando totalmente a sua mensagem.

## 2.8 MÉTRICAS DE DESEMPENHO

Devido às variações que o sinal sofre durante sua transmissão, decorrentes dos efeitos de grande e pequena escala, é necessário avaliar a confiabilidade do sistema de comunicação sem fio, visando verificar se tal sistema consegue alcançar uma alta confiabilidade sem gerar grandes erros na recepção. Nesta seção será apresentada a métrica de desempenho utilizada para avaliar o cenário assistido por STAR-RIS e baseado em RSMA a ser apresentado no Capítulo 3. Uma visão geral da probabilidade de *outage*

Figura 4 – Exemplo do esquema RSMA



Fonte: Adaptada de [20].

é apresentada nesta seção. Tal métrica de desempenho, avaliada por meio de simulações baseadas no método de Monte Carlo, permite caracterizar o efeito de cada parâmetro do sistema.

O método de Monte Carlo consiste na realização de iterações massivas de amostragens aleatórias do estado do canal, para a obtenção de resultados numéricos que convergem para um resultado muito próximo ao comportamento real.

### 2.8.1 Probabilidade de Outage

A probabilidade de *outage* é uma das métricas mais importantes para avaliação da confiabilidade de sistema de comunicação sem fio. Ela é definida como a probabilidade da SNR fim-a-fim instantânea recebida,  $\gamma$ , estar abaixo de um limiar  $\gamma_{th}$  que está relacionado com a qualidade do serviço do sistema, podendo assim determinar a confiabilidade da rede, de forma que [14]

$$P_{out} = \Pr(\gamma < \gamma_{th}), \quad (2.10)$$

em que  $\gamma = \Gamma|h|^2$  é a relação sinal-ruído (SNR) recebida, sendo  $\Gamma$  a SNR transmitida,  $|h|^2$  o ganho instantâneo de canal e  $\gamma_{th}$  um limiar alvo.

### 3 MODELO DO SISTEMA

Neste capítulo será apresentado o modelo do sistema assistido por STAR-RIS e baseado em RSMA que será avaliado neste trabalho por meio da probabilidade de *outage*. 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 Figura 5. O usuário  $U_r$  é situado no lado onde o sinal é refletido, enquanto 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

$$y_l = \mathbf{g}_l^H \mathbf{\Psi}_l \mathbf{h} s + n_l, \forall l \in \{r, t\}, \quad (3.1)$$

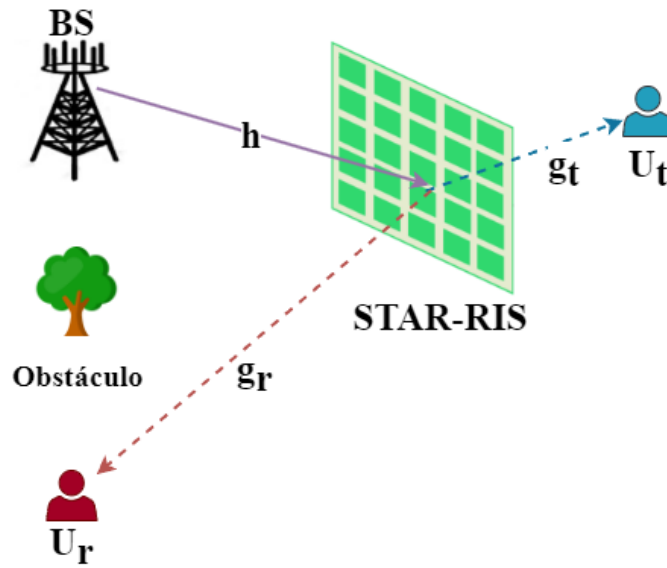
em que  $s = \underbrace{\sqrt{\alpha_c P} s_c}_{\text{parte comum}} + \underbrace{\sqrt{\alpha_{p,r} P} s_r + \sqrt{\alpha_{p,t} P} s_t}_{\text{parte privada}}$  é o sinal transmitido pela BS de acordo com o protocolo RSMA, sendo  $s_c$  a parte comum da mensagem,  $s_t$  e  $s_r$  as partes privadas das mensagens de cada usuário,  $P$  a potência transmitida e  $\alpha_c$  e  $\alpha_{p,l}$ ,  $\forall l \in \{r, t\}$ , os fatores de alocação de potência para a parte comum e as partes privadas das mensagens dos usuários, respectivamente, de forma que  $\alpha_c + \alpha_{p,r} + \alpha_{p,t} = 1$ . 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;  $\mathbf{g}_l = [g_{l_1}, g_{l_2}, \dots, g_{l_N}]^T \in \mathbb{C}^{N \times 1}$  é o vetor de coeficientes de canal entre a STAR-RIS e o usuário  $U_l$ ;  $\mathbf{\Psi}_l = \text{diag}[\sqrt{\eta_{l_1}} e^{j\theta_{l_1}}, \sqrt{\eta_{l_2}} e^{j\theta_{l_2}}, \dots, \sqrt{\eta_{l_N}} e^{j\theta_{l_N}}] \in \mathbb{C}^{N \times N}$  é uma matriz diagonal, cujas entradas não nulas representam a amplitude  $\sqrt{\eta_{l_n}}$  e fase  $\theta_{l_n}$ , 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 [21]

$$\mathbf{R}_h = E[\mathbf{h}\mathbf{h}^H] = 2\sigma_{h_i}^2 \mathbf{R}, \quad (3.2)$$

$$\mathbf{R}_{g_l} = E[\mathbf{g}_l \mathbf{g}_l^H] = 2\sigma_{g_{l_i}}^2 \mathbf{R}, \quad (3.3)$$

Figura 5 – Modelo do Sistema



Fonte: Produção do próprio autor.

sendo  $\mathbf{R} \in \mathbb{R}^{N \times N}$  a matriz de correlação espacial, cujo  $(m, n)$ -ésimo elemento é dado por

$$\mathbf{R}_{(m,n)} = \rho_{(m,n)} = \text{sinc} \left( \frac{2\|\mathbf{v}_m - \mathbf{v}_n\|}{\lambda} \right), \quad (3.4)$$

$\forall m, n \in \{1, \dots, N\}$ . Em (3.4),  $\lambda$  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]

$$\mathbf{v}_m = \left[ 0, \text{mod}(m-1, N_h)d_h, \left\lfloor \frac{(m-1)}{N_h} \right\rfloor d_v \right]^T, \quad (3.5)$$

$$\mathbf{v}_n = \left[ 0, \text{mod}(n-1, N_h)d_h, \left\lfloor \frac{(n-1)}{N_h} \right\rfloor d_v \right]^T \quad (3.6)$$

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  $\Omega_{g_l} = c_{g_l}^2 + 2\sigma_{g_{ln}}^2$ , respectivamente<sup>1</sup>.

Com a utilização da técnica RSMA, SINR é dividida em duas partes, uma parte comum aos usuários e uma parte privada para cada usuário, onde a SINR da parte comum é dada por [11]

$$\gamma_{c,l} = \frac{\alpha_c |\mathbf{g}_l^H \Psi_l \mathbf{h}|^2}{\gamma |\mathbf{g}_l^H \Psi_l \mathbf{h}|^2 (\alpha_{p,l} + \alpha_{p,\bar{l}}) + 1}. \quad (3.7)$$

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

Para recuperar a parte privada, é executado o cancelamento sucessivo de interferência (SIC). E a partir de (3.1), o sinal recebido da parte privada, com o fator de erro associado ao SIC é dado por [22]

$$y_{p,l} = \underbrace{\mathbf{g}_l^H \boldsymbol{\Psi}_l \mathbf{h} \sqrt{\alpha_{p,l} P s_{p,l}}}_{\text{sinal de interesse}} + \underbrace{\mathbf{g}_l^H \boldsymbol{\Psi}_l \mathbf{h} \sqrt{\alpha_{p,\bar{l}} P s_{p,\bar{l}}} + \sqrt{\epsilon} \mathbf{g}_l^H \boldsymbol{\Psi}_l \mathbf{h} \sqrt{\alpha_c P s_c}}_{\text{sinal de interferência}} + \underbrace{n_l}_{\text{ruído}}, \forall l \in \{r, t\}. \quad (3.8)$$

A partir de (3.8) a SINR da parte privada para o usuário  $l$  é dado por [11]

$$\gamma_{p,l} = \frac{\alpha_{p,l} |\mathbf{g}_l^H \boldsymbol{\Psi}_l \mathbf{h}|^2}{\gamma |\mathbf{g}_l^H \boldsymbol{\Psi}_l \mathbf{h}|^2 (\alpha_{p,\bar{l}} + \alpha_c \sqrt{\epsilon}) + 1}, \quad (3.9)$$

em que  $l = t$ , se  $\bar{l} = r$  ou  $l = r$ , se  $\bar{l} = t$ ; e  $\gamma = P/N_0$  é a SNR transmitida, sendo  $N_0 = -174 + 10 \log_{10}(B)$  dBm a potência do ruído, com  $B$  denotando a largura de banda do canal, o termo  $\alpha_c \sqrt{\epsilon}$  representa o cenário de SIC imperfeito, em que  $0 \leq \epsilon \leq 1$  é o fator de erro associado ao SIC imperfeito, sendo que para  $\epsilon = 0$  temos o cenário de SIC perfeito. O processo de decodificação no usuário envolve, 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.

### 3.1 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

$$\mathbf{h} = \sqrt{\Omega} \mathbf{C} \tilde{\mathbf{h}}, \quad (3.10)$$

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

$$\boldsymbol{\Lambda} = \mathbf{C} \mathbf{C}^T. \quad (3.11)$$

#### 4 PROBABILIDADE DE OUTAGE

Neste capítulo a probabilidade de *outage* é apresentada. Além disso, uma aproximação para a probabilidade de *outage* utilizando a função Gamma é proposta. 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  $\gamma_{th}$ .

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  $\gamma_{th}$ . Para calcular a probabilidade de *outage*, será utilizado o complemento do evento de sucesso. O evento de sucesso é caracterizado como SINR recebida da parte comum e privada estarem acima de um determinado limiar  $\gamma_{th}$ . Dessa forma, a probabilidade de *outage* calculada pelo complemento da probabilidade de sucesso é dada por

$$\begin{aligned} P_{out}(\gamma_{l,c}, \gamma_{l,p}) &= 1 - \Pr(\gamma_{l,c} > \gamma_{th}, \gamma_{l,p} > \gamma_{th}). \\ &= F_{\gamma_{l,c}}(\gamma_{th}) + F_{\gamma_{l,p}}(\gamma_{th}) - F_{\gamma_{l,c}, \gamma_{l,p}}(\gamma_{th}, \gamma_{th}). \end{aligned} \quad (4.1)$$

A partir de (3.7) e (3.9), nota-se que as SINRs são da forma  $\frac{\Delta_{z,1}X_\phi}{\Delta_{z,2}X_\phi + \Delta_{z,3}}$ , em que  $z \in \{c, r, t\}$ . Dessa forma, para as CDFs da parte comum e da parte privada, tem-se que, respectivamente

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{l,c}}(\gamma_{th}) &= \Pr(\gamma_{l,c} \leq \gamma_{th}) = \Pr\left(\frac{\Delta_{c,1}X_\phi}{\Delta_{c,2}X_\phi + \Delta_{c,3}} \leq \gamma_{th}\right) \\ &= \Pr\left(X_\phi \leq \frac{\gamma_{th}}{\Delta_{c,1} - \gamma_{th}\Delta_{c,2}}\right) \\ &= F_{X_\phi}\left(\frac{\gamma_{th}}{\Delta_{c,1} - \gamma_{th}\Delta_{c,2}}\right), \end{aligned} \quad (4.2)$$

$$\begin{aligned} F_{\gamma_{l,p}}(\gamma_{th}) &= \Pr(\gamma_{l,p} \leq \gamma_{th}) = \Pr\left(\frac{\Delta_{l,1}X_\phi}{\Delta_{l,2}X_\phi + \Delta_{l,3}} \leq \gamma_{th}\right) \\ &= \Pr\left(X_\phi \leq \frac{\gamma_{th}}{\Delta_{l,1} - \gamma_{th}\Delta_{l,2}}\right) \\ &= F_{X_\phi}\left(\frac{\gamma_{th}}{\Delta_{l,1} - \gamma_{th}\Delta_{l,2}}\right), \end{aligned} \quad (4.3)$$

em que  $\Delta_{c,1} = \alpha_c\gamma$ ,  $\Delta_{c,2} = (\alpha_{p,t} + \alpha_{p,r})\gamma$ ,  $\Delta_{c,3} = 1$ ,  $\Delta_{l,1} = \alpha_{p,l}\gamma$ ,  $\Delta_{l,2} = (\alpha_{p,\bar{l}} + \alpha_c + \varepsilon)\gamma$  e  $\Delta_{l,3} = 1$ . Já para a CDF conjunta, tem-se que

$$\begin{aligned}
F_{\gamma_{l,c}, \gamma_{l,p}}(\gamma_{th}) &= \Pr(\gamma_{l,c} \leq \gamma_{th}, \gamma_{l,p} \leq \gamma_{th}) \\
&= \Pr\left(X_\phi \leq \min\left\{\frac{\gamma_{th}}{\Delta_{c,1} - \gamma_{th}\Delta_{c,2}}, \frac{\gamma_{th}}{\Delta_{l,1} - \gamma_{th}\Delta_{l,2}}\right\}\right) \\
&= F_{X_\phi}\left(\min\left\{\frac{\gamma_{th}}{\Delta_{c,1} - \gamma_{th}\Delta_{c,2}}, \frac{\gamma_{th}}{\Delta_{l,1} - \gamma_{th}\Delta_{l,2}}\right\}\right). \tag{4.4}
\end{aligned}$$

Considere que  $X_{\phi_l} = |\mathbf{g}_l^H \Psi_l \mathbf{h}|^2 = |\sum_{n=1}^N \sqrt{\eta_{l,n}} \mathbf{g}_{l,n} \mathbf{h}|^2$ , em que  $N$  representa o número de elementos da STAR-RIS. Dessa forma, a PDF de  $X_{\phi_l}$  é dada por ([23] apud [13])

$$f_{X_\phi}(x) = 4 \sum_{a=0}^{\infty} \sum_{b=0}^{\infty} \frac{(\kappa + 1)^{a+b+2} x^{a+b+1} \kappa^{a+b+2}}{(a!)^2 (b!)^2 e^{2\kappa} \Xi_\phi^{a+b}} K_{a-b}[2x(\kappa + 1)\Xi_\phi^{-1}], \tag{4.5}$$

em que  $\Xi_\phi = \omega \sqrt{\eta_l} \left(d_{gl}^{-\alpha_{gl}/2}\right) \left(d_h^{-\alpha_{gh}/2}\right)$  e  $K_a(\cdot)$  representa a função de Bessel modificada de segunda ordem. A média e a variância de  $X_{\phi_l}$  são dadas respectivamente, por [13]

$$E_{\phi_l} = \frac{\Xi_\phi \pi e^{-\kappa}}{4(\kappa + 1)} \left[ (1 + \kappa) I_0\left(\frac{\kappa}{2}\right) + \kappa I_1\left(\frac{\kappa}{2}\right) \right]^2, \tag{4.6}$$

$$V_{\phi_l} = \Xi_\phi^2 \left\{ 1 - \frac{\pi^2 e^{-2\kappa}}{16(\kappa + 1)^2 \left[ (1 + \kappa) I_0\left(\frac{\kappa}{2}\right) + \kappa I_1\left(\frac{\kappa}{2}\right) \right]^4} \right\}. \tag{4.7}$$

A CDF de  $X_{\phi_l}$  pode ser aproximada por uma função distribuição Gamma, da seguinte forma

$$F_{X_\phi}(x) = \frac{1}{\Gamma(\Omega_\phi)} \gamma\left(\Omega_\phi, \frac{\sqrt{x}}{\lambda_\phi}\right), \tag{4.8}$$

em que  $\Omega_\phi = NE_\phi^2 V_\phi^{-1}$ ,  $\lambda_\phi = V_\phi E_\phi^{-1}$ ,  $\Gamma(\cdot)$  representa a função gamma e  $\gamma(u, x)$  representa a função gamma incompleta inferior.

Substituindo as equações em (4.1), tem-se que uma aproximação para a probabilidade de *outage* pode ser dada por

$$\begin{aligned}
P_{out}(\gamma_{l,c}, \gamma_{l,p}) &= F_{X_\phi} \left( \frac{\gamma_{th}}{\Delta_{c,1} - \gamma_{th}\Delta_{c,2}} \right) + F_{X_\phi} \left( \frac{\gamma_{th}}{\Delta_{l,1} - \gamma_{th}\Delta_{l,2}} \right) \\
&\quad - F_{X_\phi} \left( \min \left\{ \frac{\gamma_{th}}{\Delta_{c,1} - \gamma_{th}\Delta_{c,2}}, \frac{\gamma_{th}}{\Delta_{l,1} - \gamma_{th}\Delta_{l,2}} \right\} \right) \\
&\approx \frac{1}{\Gamma(\Omega_\phi)} \gamma \left( \Omega_\phi, \frac{\sqrt{\left( \frac{\gamma_{th}}{\Delta_{c,1} - \gamma_{th}\Delta_{c,2}} \right)}}{\lambda_\phi} \right) + \frac{1}{\Gamma(\Omega_\phi)} \gamma \left( \Omega_\phi, \frac{\sqrt{\left( \frac{\gamma_{th}}{\Delta_{l,1} - \gamma_{th}\Delta_{l,2}} \right)}}{\lambda_\phi} \right) \\
&\quad - \frac{1}{\Gamma(\Omega_\phi)} \gamma \left( \Omega_\phi, \frac{\sqrt{\left( \min \left\{ \frac{\gamma_{th}}{\Delta_{c,1} - \gamma_{th}\Delta_{c,2}}, \frac{\gamma_{th}}{\Delta_{l,1} - \gamma_{th}\Delta_{l,2}} \right\} \right)}}{\lambda_\phi} \right). \tag{4.9}
\end{aligned}$$

Após a apresentação das SINRs, no próximo capítulo será realizado a análise dos parâmetros do sistema através da probabilidade de *outage*.

## 5 RESULTADOS FINAIS E DISCUSSÃO

Neste capítulo será apresentada a avaliação de desempenho do sistema retratado no Capítulo 3. 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 1 apresenta os parâmetros utilizados nas simulações, sendo que para cada simulação foram realizadas  $10^6$  iterações.

Tabela 1 – Parâmetros do sistema.

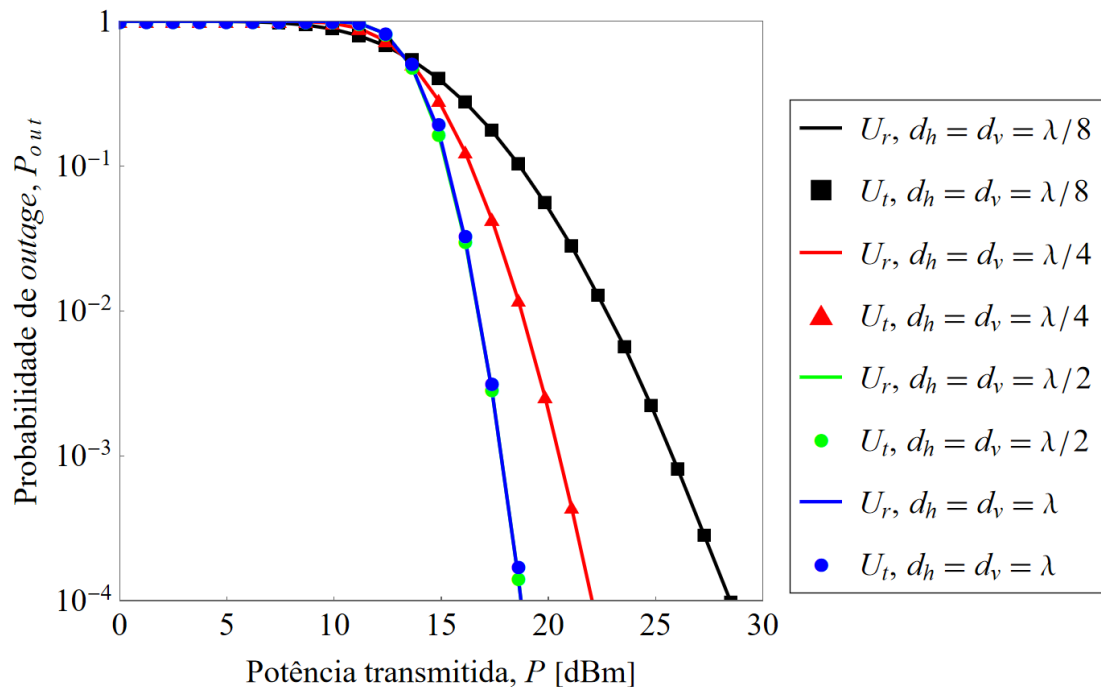
Parâmetros	Valor
Frequência de Operação	$f = 3.5$ GHz
Largura de Banda	$B = 1$ MHz
Fator de Rice	$K_h = K_{gt} = 10$
Expoente de perda de percurso BS-RIS	$\alpha_h = 2,5$
Expoente de perda de percurso RIS- $U_r$	$\alpha_{g_r} = 2,5$
Expoente de perda de percurso RIS- $U_t$	$\alpha_{g_t} = 2,5$
Limiar Alvo	$\gamma_{th} = -5$ dB
Distância entre BS-RIS	$d_{h_l} = 50$ 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	$\alpha_c = 0,5$
Fator de alocação de potência privada $U_r$	$\alpha_{p,r} = 0,25$
Fator de alocação de potência privada $U_t$	$\alpha_{p,t} = 0,25$
Número de elementos na horizontal	$N_h = 10$
Número de elementos na vertical	$N_v = 10$
Número de elementos total	$N = N_h \times N_v = 100$

Fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 6 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 ao fato 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 Figura 7 apresenta a probabilidade de *outage* vs. potência transmitida, variando

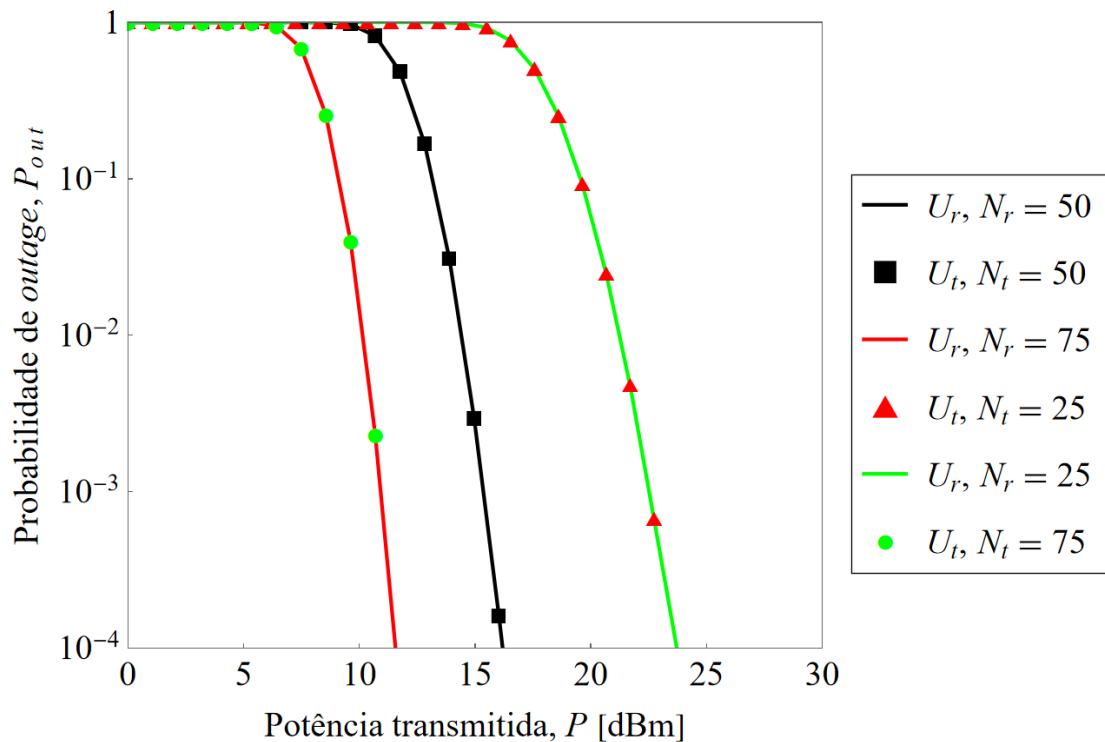
Figura 6 – Probabilidade de *outage* vs. potência transmitida para vários valores de espaçamento entre os elementos da STAR-RIS,  $d_h$  e  $d_v$ .



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,  $U_r$  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*.

A Figura 8 apresenta a probabilidade de *outage* vs. fator de alocação de potência da parte comum das mensagens dos usuários,  $\alpha_c$ , 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  $\alpha_{p,r} = \alpha_{p,t} = \frac{1-\alpha_c}{2}$ . Além 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  $\alpha_c$  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  $\alpha_c \rightarrow 0,4$ , obtém-se uma probabilidade de *outage* menor para ambos os usuários, similarmente ao obtido em [24]. Além disso, note que quanto maior o número de elementos alocados a um usuário,

Figura 7 – Probabilidade de *outage* vs. potência transmitida, variando-se o número de elementos alocados para reflexão e transmissão,  $N_r$  e  $N_t$ .



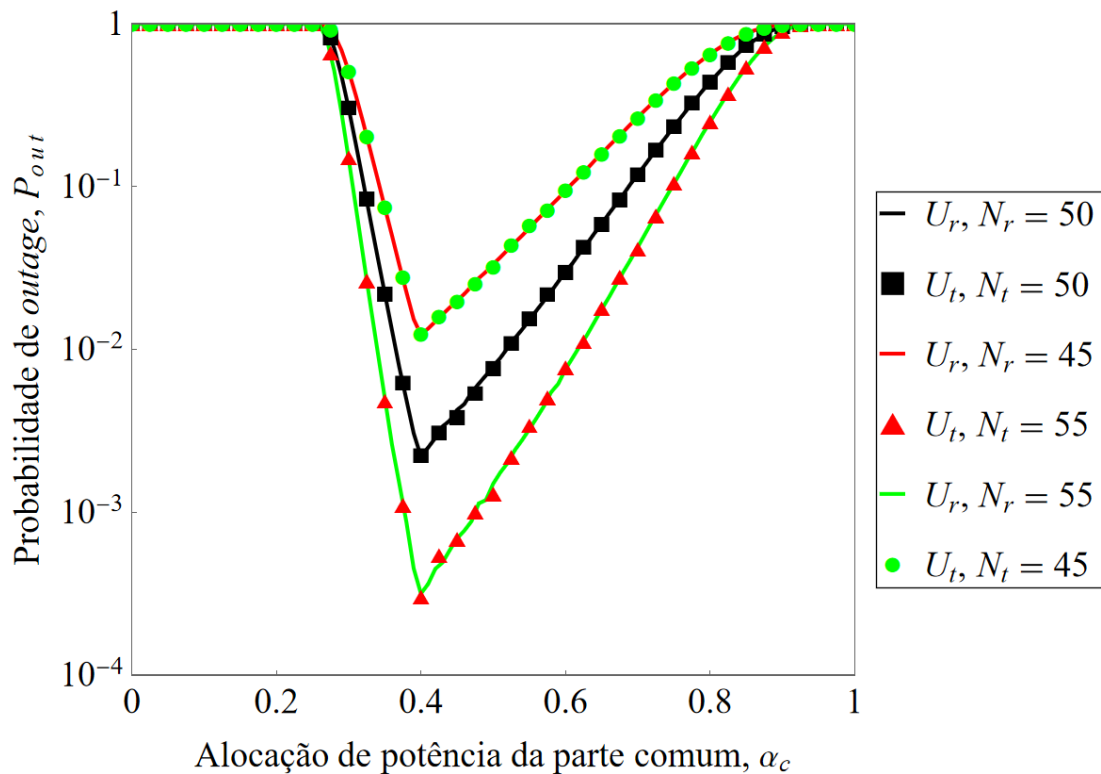
Fonte: Produção do próprio autor.

melhor é o seu desempenho, como mencionado anteriormente. Portanto, observa-se que o usuário com mais elementos alocados e  $\alpha_c \approx 0,4$ , apresenta o melhor desempenho em termos da probabilidade de *outage*.

Com o objetivo de avaliar a expressão da aproximação, considera-se o cenário onde os elementos da STAR-RIS estão descorrelacionados. Além disso, será avaliado o efeito do SIC imperfeito. Dessa forma, utilizando os parâmetros da Tabela 1 serão apresentados os resultados, confrontando a aproximação com as simulações. Como visto nas figuras anteriores, o desempenho de ambos usuários são equivalentes quando os parâmetros utilizados nas simulações (distância entre STAR-RIS e usuário, número de elementos alocados para reflexão e transmissão, expoente de perda de percurso e fator de alocação de potência privada) são os mesmos para ambos usuários. Dessa forma, para as Figs. 9, 10 e 11, é apresentada a curva de desempenho de um dos usuários, neste caso o usuário refletido,  $U_r$ .

A Figura 9 apresenta probabilidade de *outage* vs. potência transmitida, variando-se o número de elementos alocados para o usuário refletido,  $N_r = 8, 10, 16, 32, 64$  e 128. Observe que, para  $N_r = 8$  e 10, as curvas simuladas e aproximadas se sobrepõem, caracterizando uma boa aproximação. Já quando o número de elementos aumenta, pode-se observar que as curvas da aproximação e da simulação têm um pequeno distanciamento, fazendo com que o grau de acurácia da aproximação diminua, porém seguindo o mesmo

Figura 8 – 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  $N_t$ .

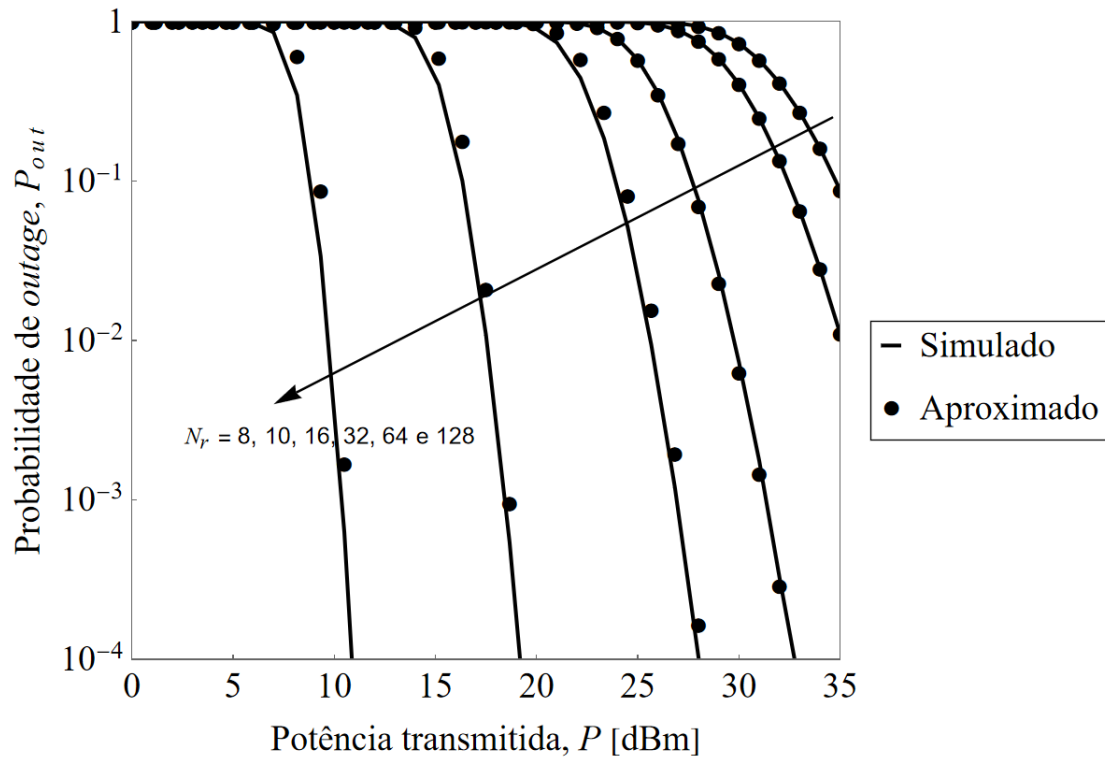


comportamento da curva da simulação. Dessa forma, para cenários com  $N_r = 16, 32, 64$  e  $128$ , tem-se uma boa aproximação, pois mesmo tendo uma acurácia menor, é possível caracterizar e avaliar o comportamento da curva de probabilidade de *outage*.

A Figura 10 apresenta a probabilidade de *outage* vs. potência transmitida, variando-se o fator de erro do SIC imperfeito,  $\epsilon$ , considerando  $N_r = 32$ . Observe que conforme  $\epsilon$  aumenta, o desempenho do sistema piora, já que o aumento de  $\epsilon$  representa o erro associado ao processo de SIC no receptor do usuário para o cancelamento da parte comum da mensagem. Note que, para  $\epsilon = 1$ , a curva apresenta o pior desempenho em termos de *outage*. Já para  $\epsilon = 0$ , tem-se o melhor desempenho, uma vez que  $\epsilon = 0$  representa o cenário onde não há erro introduzido no processo do SIC, ou seja,  $\epsilon = 0$  representa o SIC perfeito. Dessa forma, quanto maior for  $\epsilon$ , pior será a probabilidade de *outage*.

A Figura 11 apresenta a probabilidade de *outage* vs. fator de alocação de potência da parte comum das mensagens dos usuários, considerando  $P = 10$  dBm e  $N_r = 64$ . Além disso, variou-se o limiar de *outage*  $\gamma_{th} = -7$  dB,  $-8$  dB,  $-9$  dB e  $-10$  dB. Note que, similarmente a Figura 8, para valores  $\alpha_c < 0.25$  e  $\alpha_c > 0.9$ , a probabilidade de *outage* tende a 1, conforme  $\alpha_c$  se aproxima de 0 ou 1, respectivamente. Note ainda que,

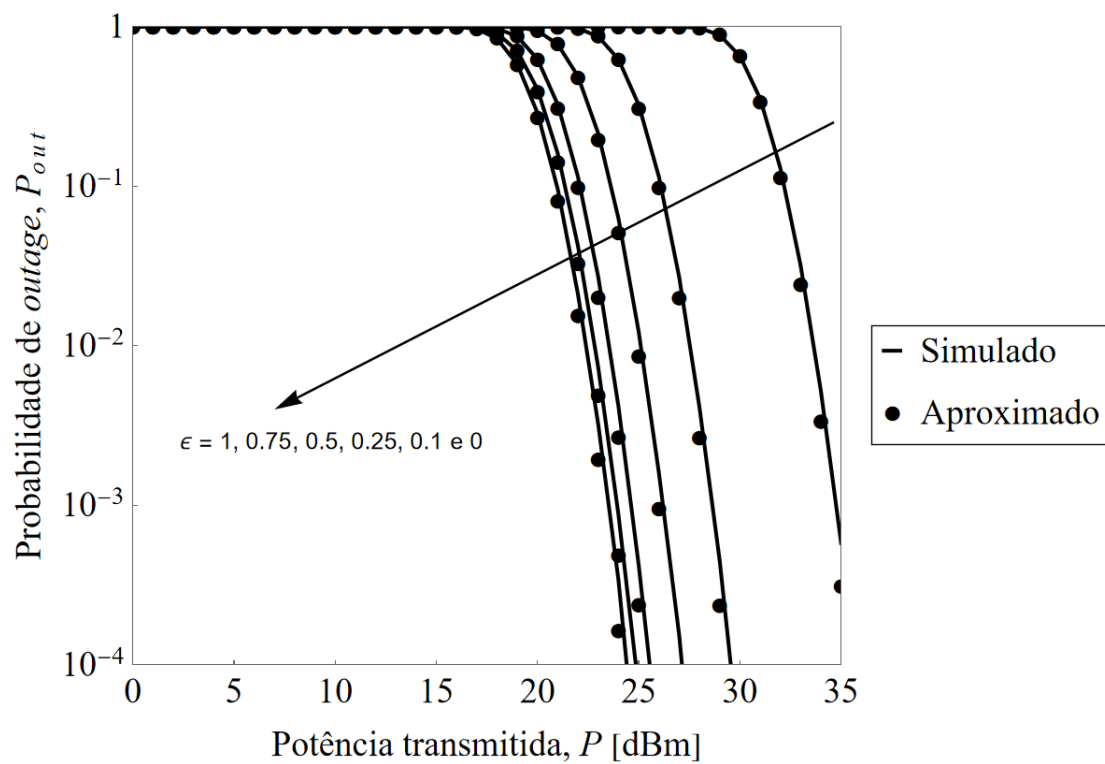
Figura 9 – Probabilidade de *outage* vs. potência transmitida, variando-se o número de elementos alocados para o usuário refletido,  $N_r$ .



Fonte: Produção do próprio autor.

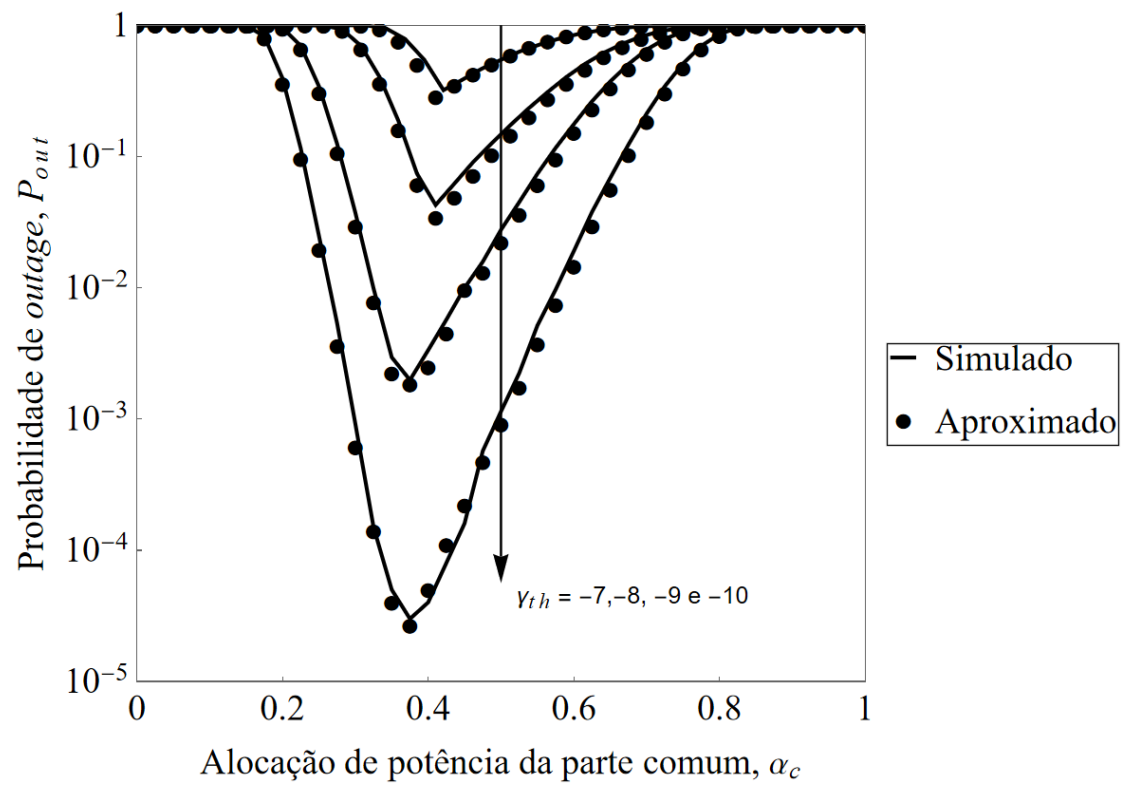
conforme  $\alpha_c \rightarrow 0,4$ , obtém-se a melhor probabilidade de *outage*, para  $\gamma_{th} = -7$  dB e  $-8$  dB. Porém, quando  $\gamma_{th} = -9$  dB e  $-10$  dB, a curva tem seu mínimo diminuído para  $\alpha_c \rightarrow 0,33$ . Ou seja, para estes valores de  $\gamma_{th}$ , a curva alcança a menor probabilidade de *outage* em um valor menor de  $\alpha_c$ . Além disso, note que, quanto menor for o valor de  $\gamma_{th}$ , melhor será o desempenho, já que para um mesmo valor de  $\alpha_c$ , a probabilidade de *outage* é menor quando  $\gamma_{th}$  é menor.

Figura 10 – Probabilidade de *outage* vs. potência transmitida, variando-se o fator de erro do SIC imperfeito,  $\epsilon$ .



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 11 – Probabilidade de *outage* vs. fator de alocação de potência da parte comum das mensagens dos usuários, variando-se o limiar de *outage*,  $\gamma_{th}$ .



Fonte: Produção do próprio autor.

## 6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

### 6.1 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,  $\alpha_c$ , e para as partes privadas, dadas por  $\alpha_{p,r} = \alpha_{p,t} = (1 - \alpha_c)/2$ . Observou-se que, para  $\alpha_c < 0,2$  e  $\alpha_c > 0,8$ , o desempenho dos usuários é degradado. Além disso, para valores de  $\alpha_c \approx 0,4$ , obtém-se o melhor desempenho em termos da probabilidade de *outage*. Além disso, quanto maior for o número de elementos alocados para transmissão ou reflexão, melhor será o desempenho do sistema.

Para a aproximação proposta, avaliou-se a acurácia da aproximação, o impacto do fator de erro  $\epsilon$  associado ao SIC imperfeito e o efeito da variação de  $\gamma_{th}$ . Observou-se que as curvas simuladas e aproximadas se sobrepõem, caracterizando uma boa aproximação para  $N_r = 8$  e  $10$ , já quando o número de elementos aumenta as curvas começam a ter um pequeno distanciamento. Fazendo com que o grau de acurácia da aproximação diminua. Porém, mesmo com o grau de acurácia diminuindo, as curvas seguem o mesmo comportamento da curva da simulação. Dessa forma a aproximação é capaz de caracterizar o comportamento da curva. Em relação ao efeito do SIC imperfeito, observe que conforme  $\epsilon$  aumenta o desempenho do sistema piora. Já que o aumento de  $\epsilon$ , representa o erro associado ao processo de SIC no receptor do usuário para retirada da parte comum da mensagem. Dessa forma, quanto maior for  $\epsilon$ , pior será a probabilidade de *outage*. Já para  $\epsilon = 0$ , tem-se o melhor desempenho, uma vez que  $\epsilon = 0$  é o cenário onde não há erro induzido pelo processo do SIC, ou seja,  $\epsilon = 0$  representa o SIC perfeito. Além disso, considerou-se o efeito da variação do limiar de *outage*  $\gamma_{th}$ . Para  $\gamma_{th} = -7$  dB,

-8 dB a melhor probabilidade de *outage* é atingida em  $\alpha_c \rightarrow 0,4$ . Porém, quando  $\gamma_{th} = -9$  dB e  $-10$  dB a curva tem seu mínimo diminuído para  $\alpha_c \rightarrow 0,33$ . Ou seja, para estes valores de  $\gamma_{th}$  a curva alcança a menor probabilidade de *outage* em um valor menor de  $\alpha_c$ . Além disso, note que, quanto menor for o valor de  $\gamma_{th}$ , melhor será o desempenho, já que para um mesmo valor de  $\alpha_c$ , a probabilidade de *outage* é menor quando  $\gamma_{th}$  é menor.

## 6.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Nesta seção são apresentadas algumas propostas para trabalhos futuros:

- Neste trabalho foi considerado que a STAR-RIS opera somente no modo MS. Para trabalhos futuros, sugere-se considerar outros modos de operação da STAR-RIS, a fim de caracterizar o comportamento da STAR-RIS em diferentes modos de operação, comparando o desempenho de vários modos de operação.
- Neste estudo, foi considerado que a BS e os usuários possuem apenas uma antena, sugere-se considerar um cenário em que a BS e os usuários possuem múltiplas antenas.
- Considerar outras funções de distribuição para aproximar o modelo do ganho de canal fim-a-fim. Sugere-se considerar funções capazes de caracterizar o efeito a correlação entre os elementos da STAR-RIS na expressão da aproximação. Sugere-se também incluir o efeito da correlação na caracterização analítica do desempenho do sistema.

## REFERÊNCIAS

- [1] M. A. ElMossallamy, H. Zhang, L. Song, K. G. Seddik, Z. Han, and G. Y. Li, “Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Principles, challenges, and opportunities,” *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 6, no. 3, pp. 990–1002, 2020.
- [2] M. Shafi, A. F. Molisch, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. De Silva, F. Tufvesson, A. Benjebbour, and G. Wunder, “5g: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1201–1221, 2017.
- [3] Q. Wu, G. Y. Li, W. Chen, D. W. K. Ng, and R. Schober, “An overview of sustainable green 5g networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 24, no. 4, pp. 72–80, 2017.
- [4] Q. Wu and R. Zhang, “Towards smart and reconfigurable environment: Intelligent reflecting surface aided wireless network,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 1, pp. 106–112, 2020.
- [5] J. Xu, Y. Liu, X. Mu, and O. A. Dobre, “Star-ris: Simultaneous transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surfaces,” *IEEE Communications Letters*, vol. 25, no. 9, pp. 3134–3138, 2021.
- [6] E. Björnson and L. Sanguinetti, “Rayleigh fading modeling and channel hardening for reconfigurable intelligent surfaces,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 4, pp. 830–834, 2021.
- [7] A. Mishra, Y. Mao, O. Dizdar, and B. Clerckx, “Rate-splitting multiple access for 6g—part i: Principles, applications and future works,” *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 10, pp. 2232–2236, 2022.
- [8] X. Mu, Y. Liu, L. Guo, J. Lin, and R. Schober, “Simultaneously transmitting and reflecting (star) ris aided wireless communications,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 21, no. 5, pp. 3083–3098, 2022.
- [9] A. S. de Sena, P. H. J. Nardelli, D. B. da Costa, P. Popovski, C. B. Papadias, and M. Debbah, “Dual-polarized massive mimo-rsma networks: Tackling imperfect sic,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 22, no. 5, pp. 3194–3215, 2023.

- [10] H. Li, Y. Mao, O. Dizdar, and B. Clerckx, “Rate-splitting multiple access for 6g—part iii: Interplay with reconfigurable intelligent surfaces,” *IEEE Communications Letters*, vol. 26, no. 10, pp. 2242–2246, 2022.
- [11] S. Dhok and P. K. Sharma, “Rate-splitting multiple access with star ris over spatially-correlated channels,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 70, no. 10, pp. 6410–6424, 2022.
- [12] Z. Mohamed, K. Albaden, and S. Aïssa, “Simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface aided rsma communications: Outage probability analysis,” in *2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, 2023, pp. 1–6.
- [13] J. Xie, X. Yue, Z. Han, X. Liu, and W. Xiang, “Active stars-assisted rate-splitting multiple-access networks,” *Electronics*, vol. 12, no. 18, p. 3815, 2023.
- [14] A. Goldsmith, *Wireless Communication*. Cambridge University Press, 2005.
- [15] D. T. e Pramod Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press, 2005.
- [16] M. K. S. e Mohamed-Slim Alouni, *Digital Communication Over Fading Channels*. 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2005.
- [17] H. Ding, J. Ge, D. B. da Costa, and Y. Guo, “Spectrally efficient diversity exploitation schemes for downlink cooperative cellular networks,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 1, pp. 386–393, 2012.
- [18] S. Abadal, T.-J. Cui, T. Low, and J. Georgiou, “Programmable metamaterials for software-defined electromagnetic control: Circuits, systems, and architectures,” *IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems*, vol. 10, no. 1, pp. 6–19, 2020.
- [19] C. Liaskos, S. Nie, A. Tsioliariidou, A. Pitsillides, S. Ioannidis, and I. Akyildiz, “A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 9, pp. 162–169, 2018.
- [20] Y. Mao, O. Dizdar, B. Clerckx, R. Schober, P. Popovski, and H. V. Poor, “Rate-splitting multiple access: Fundamentals, survey, and future research trends,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 24, no. 4, pp. 2073–2126, 2022.
- [21] T. Van Chien, A. K. Papazafeiropoulos, L. T. Tu, R. Chopra, S. Chatzinotas, and B. Ottersten, “Outage probability analysis of ris-assisted systems under spatially

- correlated channels,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 8, pp. 1815–1819, 2021.
- [22] S. Herfiah and Iskandar, “Effect of imperfect sic in non-orthogonal multiple access (noma) over rayleigh fading channels,” in *2021 7th International Conference on Wireless and Telematics (ICWT)*, 2021, pp. 1–4.
- [23] M. Simon, *Probability Distributions Involving Gaussian Random Variables*. New York, NY, USA: Springer, 2006.
- [24] 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 Transactions on Vehicular Technology*, vol. 70, no. 9, pp. 9217–9229, 2021.