

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA

ANA LUÍSA FERNANDES DE SOUZA

**Estudo sobre Redes Sem Fio Assistidas por Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis com
Reflexão e Transmissão Simultâneas**

São João da Boa Vista
2023

Ana Luísa Fernandes de Souza

Estudo sobre Redes Sem Fio Assistidas por Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis com Reflexão e Transmissão Simultâneas

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações do Campus de São João da Boa Vista, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo

São João da Boa Vista

2023

S729e Souza, Ana Luísa Fernandes de
Estudo sobre Redes Sem Fio Assistidas por Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis com Reflexão e Transmissão Simultâneas / Ana Luísa Fernandes de Souza. -- São João da Boa Vista, 2023
47 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, São João da Boa Vista
Orientador: Edgar Eduardo Benitez Olivo

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

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

Essa ficha não pode ser modificada.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ESTUDO SOBRE REDES SEM FIO ASSISTIDAS POR SUPERFÍCIES
INTELIGENTES RECONFIGURÁVEIS COM REFLEXÃO E TRANSMISSÃO
SIMULTÂNEAS**

Aluno: Ana Luísa Fernandes de Souza
Orientador: Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo

Banca Examinadora:

- Edgar Eduardo Benitez Olivo (Orientador)
- Cintya Wink de Oliveira Benedito (Examinadora)
- Marlon Rodrigues Garcia (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno (Processo nº 200/2023)
--

São João da Boa Vista, 07 de dezembro de 2023

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo presente da vida e por me proporcionar exatamente o que eu preciso no momento certo, embora eu nem sempre tenha tido facilidade para compreender isto.

Aos meus pais, Sérgio e Maria Regina, e ao meu irmão, João Ricardo, por me incentivarem os estudos e proporcionarem o melhor cenário possível para que eu pudesse concluí-los agora.

Ao meu namorado, Henrique, por ser um grande colo durante boa parte destes anos e por toda paciência, incentivo e momentos felizes.

A todos os meus amigos, em especial à Carla e à Nathália, minhas primeiras e melhores amigas da faculdade. Agradeço também à turma de amigos dos almoços na Unesp, responsáveis por fazerem os intervalos entre aulas ser leve e divertido mesmo em momentos de (muito) estresse.

Por fim, ao meu professor orientador, Edgar, pelo (também muito) tempo dedicado em me orientar tanto neste trabalho de conclusão de curso quanto nos estágios que realizei.

Este trabalho contou com o apoio da seguinte entidade:

Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), Processo nº 0527/18

“Onde falta justiça, o tempo inevitavelmente age. E se você permanecer fiel ao que é justo, o longo prazo sempre te dará o que é merecido.”
(Thiago Nigro)

RESUMO

Neste trabalho, é avaliado o desempenho de uma rede sem fio assistida por uma Superfície Inteligente Reconfigurável com Transmissão e Reflexão Simultâneas (STAR-RIS), uma tecnologia sucessora das RISs convencionais, ou seja, das RISs somente refletivas, que objetiva atender aos requisitos da próxima geração de redes móveis. Assume-se um cenário de dois usuários, um na região de transmissão e outro na região de reflexão, além de uma comunicação *unicast* e o protocolo Divisão de Energia. Os canais são do tipo Rice, caracterizados por considerarem uma componente de linha de visada, visto que estas superfícies vêm sendo estudadas como uma solução para cenários de propagação de ondas milimétricas, onde a atenuação é maior. Alguns parâmetros do sistema são variados a fim de avaliar seu efeito no desempenho da rede, a partir das métricas probabilidade de *outage* e capacidade ergódica, resultantes da implementação do método de Monte Carlo. São considerados três esquemas de alocação de potência na estação rádio base para as informações dos usuários: uma alocação fixa e duas em função das distâncias entre a STAR-RIS e os usuários. Analogamente, também são considerados três esquemas de divisão de energia para os coeficientes de transmissão e de reflexão da superfície: uma divisão fixa e duas em função das distâncias. Os resultados numéricos permitem concluir que, para baixa SNR, o sistema apresenta maior capacidade quando a alocação de potência do usuário de transmissão (ou de reflexão) é proporcional a distância entre a superfície e o usuário de reflexão (ou de transmissão), apesar de apresentar probabilidade de *outage* pior quando comparado com uma alocação fixa. Para alta SNR, o sistema apresenta um comportamento de saturação em termos de capacidade ergódica agregada, que, para ambos os esquemas de alocação de potência em função das distâncias, tende para um valor igual e maior quando comparado ao esquema de alocação fixa. Além disso, constata-se que, quanto maior o número de elementos da STAR-RIS, melhor é o seu desempenho. Por fim, conclui-se que o sistema assistido por STAR-RIS apresenta melhor desempenho quando comparado a um esquema de referência equivalente, baseado em RISs convencionais.

PALAVRAS-CHAVE: Capacidade Ergódica. Probabilidade de *outage*. Redes sem Fio. Superfície Inteligente Reconfigurável com Transmissão e Reflexão Simultâneas (STAR-RIS).

ABSTRACT

In this work, the performance of a wireless network assisted by a Simultaneously Transmitting and Reflecting Reconfigurable Intelligent Surface (STAR-RIS) is evaluated, a successor technology of conventional RISs, i.e., reflective-only RISs, which aims to meet the requirements of next generation of mobile networks. A scenario of two users is assumed, one in the transmission region and the other in the reflection region, in addition to unicast communication and the Energy Splitting protocol. The channels are assumed to be Rician, characterized by the presence of a line-of-sight component, as these surfaces have been studied as a solution for millimeter wave propagation scenarios, where attenuation is higher. Some system parameters are varied in order to evaluate their effect on the network performance, based on the outage probability and ergodic capacity metrics, resulting from the implementation of the Monte Carlo method. Three power allocation schemes at the base station for user information are considered: one fixed allocation and two based on the distances between STAR-RIS and users. Similarly, three energy division schemes for the surface transmission and reflection coefficients are also considered: one fixed division and two depending on the distances. The numerical results allow us to conclude that, for low SNR, the system presents higher capacity when the power allocation of the transmission (or reflection) user is proportional to the distance between the surface and the reflection (or transmission) user, despite presenting a worse probability of outage when compared to a fixed allocation. For high SNR, the system presents a saturation behavior in terms of aggregate ergodic capacity, which, for both power allocation schemes depending on the distances, tends towards an equal and higher value when compared to the fixed allocation scheme. Furthermore, it is shown that the higher the number of STAR-RIS elements, the better its performance. Finally, it is concluded that the system assisted by STAR-RIS presents better performance when compared to an equivalent reference scheme, based on conventional RISs.

KEYWORDS: Ergodic Capacity. Outage Probability. Simultaneously Transmitting and Reflecting Reconfigurable Intelligent Surface (STAR-RIS). Wireless Networks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

2.1	PDF de uma distribuição Rayleigh	24
2.2	PDF de uma distribuição Rice	25
3.1	Modelo do Sistema	30
4.1	Relação Sinal-Interferência-Mais-Ruído em função da potência total disponível para diferentes fatores de alocação de potência para o usuário de transmissão (α_t) e amplitudes do coeficiente de transmissão (β_t)	35
4.2	Probabilidade de <i>outage</i> em função da potência total disponível para diferentes fatores de alocação de potência para o usuário de transmissão (α_t) e amplitudes do coeficiente de transmissão (β_t)	35
4.3	Capacidade ergódica agregada em função da potência total disponível para diferentes fatores de alocação de potência para o usuário de transmissão (α_t) e amplitudes do coeficiente de transmissão (β_t)	36
4.4	Desempenho da STAR-RIS em função do fator de alocação de potência para o usuário de transmissão (α_t), para $\beta_t = 0,5$ e $P = 0$ dBm	39
4.5	Desempenho da STAR-RIS em função da amplitude do coeficiente de transmissão (β_t), para $\alpha_t = 0,5$ e $P = 0$ dBm	40
4.6	Desempenho da STAR-RIS em função da potência total disponível para $\alpha_t = \beta_t = 0,5$ e $M = 16, 32, 64, 128$ e 256	40
4.7	Desempenho da STAR-RIS em função do número de elementos para $\alpha_t = \beta_t = 0,5$ e $P = 0$ dBm	41
4.8	Relação Sinal-Interferência-Mais-Ruído em função da potência total disponível para a STAR-RIS e o esquema de referência considerando diferentes fatores de alocação de potência	42
4.9	Probabilidade de <i>outage</i> em função da potência total disponível para a STAR-RIS e o esquema de referência considerando diferentes fatores de alocação de potência	43
4.10	Capacidade ergódica agregada em função da potência total disponível para a STAR-RIS e o esquema de referência, considerando diferentes fatores de alocação de potência	43
4.11	Desempenho da STAR-RIS e do esquema de referência em função do número de elementos para $\alpha_t = \alpha_1 = 0,5$ e $P = 0$ dBm	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Parâmetros do Sistema	33
Tabela 4.2 – Combinações de pares (α_t, β_t)	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

4G	Quarta geração de redes móveis
5G	Quinta geração de redes móveis
5G NSA	<i>5G Non-Standalone</i>
5G SA	<i>5G Standalone</i>
6G	Sexta geração de redes móveis
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
AWGN	Ruído Gaussiano Aditivo Branco (<i>Additive White Gaussian Noise</i>)
CDF	Função de Distribuição Cumulativa (<i>Cumulative Distribution Function</i>)
CLT	Teorema Central do Limite (<i>Central Limit Theorem</i>)
D2D	dispositivo-para-dispositivo (<i>device-to-device</i>)
DPRC	Comunicação por Radar de Dupla Função (<i>Dual Function Radar-Communication</i>)
DSS	Compartilhamento Dinâmico de Espectro (<i>Dynamic Spectrum Sharing</i>)
eMBB	Banda Larga Móvel melhorada (<i>enhanced Mobile Broadband</i>)
ERB	Estação Rádio-Base
ES	Divisão de Energia (<i>Energy Splitting</i>)
EPA	Alocação Igual de Potência (<i>Equal Power Allocation</i>)
FET	Transistor de Efeito de Campo (<i>Field Effect Transistor</i>)
IMT-2020	<i>International Mobile Telecommunications - 2020</i>
IoT	Internet das Coisas (<i>Internet of Things</i>)
ITU	União Internacional de Telecomunicações (<i>International Telecommunication Union</i>)
LoS	Linha de Visada (<i>Line of Sight</i>)
MIMO	Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>)
MEMS	Sistema Microeletromecânico (<i>Micro-Electromechanical System</i>)
MS	Comutação de Modo (<i>Mode Switching</i>)
mMTC	Comunicação Massiva do Tipo Máquina (<i>Massive Machine Type Communication</i>)

mmWave	Ondas milimétricas (<i>Millimeter Wave</i>)
modo R	modo de reflexão total
modo T	modo de transmissão total
modo T&R	modo de transmissão e reflexão simultâneas
NOMA	Acesso Múltiplo Não Ortogonal (<i>Non-Orthogonal Multiple Access</i>)
OMA	Acesso Múltiplo Ortogonal (<i>Orthogonal Multiple Access</i>)
PDF	Função Densidade de Probabilidade (<i>Probability Density Function</i>)
QoS	Qualidade de Serviço (<i>Quality of Service</i>)
RIS	Superfície Inteligente Reconfigurável (<i>Reconfigurable Intelligent Surface</i>)
RF	Radiofrequência
SINR	Relação Sinal-Interferência-Mais-Ruído (<i>Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio</i>)
SRE	Ambiente de Rádio Inteligente (<i>Smart Radio Environment</i>)
SNR	Relação Sinal-Ruído (<i>Signal-to-Noise Ratio</i>)
STAR-RIS	RIS com Transmissão e Reflexão Simultâneas (<i>Simultaneously Transmitting and Reflecting RIS</i>)
SWIPT	Transferência de Informação e Energia Sem Fio Simultânea (<i>Simultaneous Wireless Information and Power Transfer</i>)
TS	Comutação de Tempo (<i>Time Switching</i>)
UDN	Rede Ultradensa (<i>Ultra-Dense Network</i>)
URLLC	Comunicação Ultra Confiável e de Baixa Latência (<i>Ultra-Reliable and Low-Latency Communication</i>)
UES	Divisão de Energia Uniforme (<i>Uniform Energy Splitting</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Constante do coeficiente complexo de um canal com desvanecimento Rice
B	Largura de banda dos canais
$\mathbb{C}^{a \times b}$	Espaço de matrizes complexas de tamanho $a \times b$
$\mathcal{CN}(\mu, \sigma^2)$	Distribuição gaussiana complexa circularmente simétrica de média μ e variância σ^2
C	Capacidade ergódica
C_{agregada}	Capacidade agregada instantânea entre os usuários $U_k, k \in \{t, r\}$
C_k	Capacidade instantânea do usuário $U_k, k \in \{t, r\}$
c	Velocidade da luz no vácuo
d	Distância entre o transmissor e o receptor em um cenário com perda de percurso
d_0	Distância de referência
d_g	Distância entre a ERB e a STAR-RIS
d_i	Distância entre a ERB e a RIS $i, i \in \{1, 2\}$, para o esquema de referência
d_k	Distância entre a STAR-RIS e o usuário $U_k, k \in \{t, r\}$
$d_{\max}$	Distância máxima entre a ERB e os usuários
$d_{\min}$	Distância mínima entre a ERB e os usuários
$E[x]$	Valor esperado ou esperança da variável aleatória x
$F_x(x)$	Função de Distribuição Cumulativa da variável aleatória x
$f_x(x)$	Função Densidade de Probabilidade da variável aleatória x
$f_{x,y}(x, y)$	Função Densidade de Probabilidade Conjunta das variáveis aleatórias x e y
f	Frequência de operação do sistema
$\mathbf{g}$	Canal entre a ERB e a STAR-RIS
G_l	Produto dos ganhos das antenas
h	Coeficiente complexo de canal
$ h $	Coeficiente de canal

$ h ^2$	Ganho de canal
K	Fator de Rice
K_0	Constante do modelo simplificado de perda de percurso
M	Número de elementos da STAR-RIS com capacidade de transmissão e de reflexão simultâneas
$\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$	Distribuição gaussiana de média μ e variância σ^2
n_k	Variável aleatória que representa o ruído AWGN no usuário k , $k \in \{t, r\}$
P	Potência total disponível na ERB
P_L	Perda de percurso
P_{out}	Probabilidade de <i>outage</i>
$P_{\text{out}, k}$	Probabilidade de <i>outage</i> instantânea do usuário U_k , $k \in \{t, r\}$
P_r	Potência recebida
P_t	Potência transmitida
r_m	Sinal refletido pelo m -ésimo elemento da STAR-RIS
s_m	Sinal incidente no m -ésimo elemento da STAR-RIS
t_m	Sinal transmitido pelo m -ésimo elemento da STAR-RIS
U_t	Usuário de transmissão
U_r	Usuário de reflexão
$\mathcal{U}(a, b)$	Distribuição uniforme no intervalo entre a e b
$\mathbf{v}_k^H$	Canal entre a STAR-RIS e o usuário U_k , $k \in \{t, r\}$
$\mathbf{x}^H$	Conjugado transposto (ou hermitiana) do vetor $\mathbf{x}$
x_k	Símbolo de informação da ERB para o usuário U_k , $k \in \{t, r\}$
y_k	Sinal recebido pelo usuário U_k , $k \in \{t, r\}$, considerando o protocolo ES e comunicação <i>unicast</i>
α_i	Fator de alocação de potência do usuário da RIS i , $i \in \{1, 2\}$, para o esquema de referência
α_k	Fator de alocação de potência do usuário U_k , $k \in \{t, r\}$
$\sqrt{\beta_m^r}$	Amplitude do coeficiente de reflexão do m -ésimo elemento da STAR-RIS

$\sqrt{\beta_m^t}$	Amplitude do coeficiente de transmissão do m -ésimo elemento da STAR-RIS
$\sqrt{\beta^t}, \beta^t$	Amplitude do coeficiente de transmissão de todos os elementos da STAR-RIS em um cenário UES
$\sqrt{\beta^r}, \beta^r$	Amplitude do coeficiente de reflexão de todos os elementos da STAR-RIS em um cenário UES
γ	SNR transmitida
γ_{e2e}	SNR fim-a-fim instantânea recebida
γ_k	SINR do usuário $U_k, k \in \{t, r\}$
γ_{th}	SNR limiar
η	Expoente de perda de percurso
η_g	Expoente de perda de percurso do canal entre a ERB e a STAR-RIS
η_k	Expoente de perda de percurso do canal entre a STAR-RIS e o usuário $U_k, k \in \{t, r\}$
Θ_r	Matriz de coeficientes de reflexão
Θ_t	Matriz de coeficientes de transmissão
θ_t	Vetor de ajustes de fase dos coeficientes de transmissão
θ_r	Vetor de ajustes de fase dos coeficientes de transmissão
θ_m^r	Ajuste de fase do coeficiente de reflexão do m -ésimo elemento da STAR-RIS
θ_m^t	Ajuste de fase do coeficiente de transmissão do m -ésimo elemento da STAR-RIS
λ	Comprimento de onda
σ^2	Variância
σ_n^2	Variância do ruído AWGN
Ω	Ganho médio de canal

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	MOTIVAÇÃO	16
1.2	TRABALHOS RELACIONADOS	18
1.3	OBJETIVOS	19
1.4	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	20
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	21
2.1	EFEITOS DE PROPAGAÇÃO	21
2.1.1	Efeitos de propagação de larga escala	21
2.1.1.1	Perda de percurso	21
2.1.1.2	Modelo simplificado de perda de percurso	22
2.1.1.3	Sombreamento	22
2.1.2	Efeitos de propagação de pequena escala	23
2.1.2.1	Desvanecimento do tipo Rayleigh	24
2.1.2.2	Desvanecimento do tipo Rice	25
2.2	SUPERFÍCIE INTELIGENTE RECONFIGURÁVEL (RIS)	26
2.3	RIS COM TRANSMISSÃO E REFLEXÃO SIMULTÂNEAS (STAR-RIS)	27
2.3.1	Protocolos	27
2.3.1.1	Energy Splitting	27
2.3.1.2	Mode Switching	27
2.3.1.3	Time Switching	28
2.4	MÉTRICAS DE DESEMPENHO	28
2.4.1	Probabilidade de <i>Outage</i>	28
2.4.2	Capacidade Ergódica	29
3	MODELO DO SISTEMA	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1	ANÁLISE DO DESEMPENHO DA STAR-RIS	34
4.2	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A STAR-RIS E O ESQUEMA DE REFERÊNCIA	41
5	CONCLUSÃO	45
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

O primeiro capítulo deste trabalho apresenta o atual contexto das redes móveis e os principais desafios encontrados até o momento. Com isso, introduz uma solução inovadora proposta para a próxima geração de redes móveis, solução esta que é tema deste trabalho. Mais especificamente, a Seção 1.1 traz a motivação para este estudo, enquanto a Seção 1.2 apresenta trabalhos relacionados ao tema. Já as Seções 1.3 e 1.4 definem o objetivo e a estrutura deste trabalho, respectivamente.

1.1 MOTIVAÇÃO

A quinta geração de redes móveis, popularmente conhecida como 5G, mas cuja nomenclatura correta é IMT-2020 (*International Mobile Telecommunications - 2020*) [1], vem sendo implementada mundialmente pouco a pouco. No Brasil, o 5G *Standalone* (SA), que é o 5G “puro”, isto é, com espectro e infraestrutura próprios, foi disponibilizado pela primeira vez em Brasília, em julho de 2022. No entanto, desde o segundo semestre de 2020, implementações mais simples já estão disponíveis no país: o 5G DSS (*Dynamic Spectrum Sharing*, do português Compartilhamento Dinâmico de Espectro), em que o espectro e a infraestrutura utilizados são compartilhados com gerações anteriores, e o 5G *Non-Standalone* (NSA), que utiliza o espectro destinado ao 5G mas compartilha o núcleo de rede com a quarta geração (4G) [2, 3, 4].

Segundo a Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel), em julho de 2023, o 5G SA já estava em operação em mais de 180 municípios brasileiros, incluindo todas as capitais. Nesta época, o número de estações licenciadas em capitais já era mais de cinco vezes maior que o previsto para este período, chegando a quase 9500 estações, o que representa uma densidade de 6,25 estações para cada 100 mil habitantes, enquanto a meta exigida pelo Edital 5G era de 1,25 [2, 3, 4].

Os requisitos técnicos e os cenários de uso que definem o que é considerado 5G foram apresentados em 2015, na Recomendação ITU-R M.2083-0 (09/2015) da União Internacional de Telecomunicações (ITU, *International Telecommunication Union*), agência associada a Organização das Nações Unidas [3]. Nele, são listados três cenários fundamentais: Banda Larga Móvel melhorada (eMBB, *enhanced Mobile Broadband*), responsável por maiores taxas de transmissão de dados; Comunicação massiva do Tipo Máquina (mMTC, *massive Machine Type Communication*), responsável por gerenciar e promover suporte a um número massivo de dispositivos em uma área limitada; e Comunicação Ultra Confiável e de Baixa Latência (URLLC, *Ultra-Reliable and Low-Latency Communication*) [1].

Esses cenários puderam ser alcançados graças a tecnologias habilitadoras como as Redes Ultradensas (UDN, *Ultra-Dense Network*), MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) massivo e as comunicações que usam a faixa de frequência das ondas milimétricas (*mmWave*, *Millimeter Wave*) [5, 6].

No entanto, essas tecnologias e cenários trazem novos desafios. A necessidade de taxas de dados cada vez maiores implica a utilização de faixas de frequências mais elevadas, como a das ondas milimétricas, as quais apresentam maior disponibilidade de banda. Porém, as ondas milimétricas têm capacidade de penetração limitada, característica que é ainda mais acentuada quando é necessário fornecer cobertura em cenários *indoor*. Como consequência, tem-se a diminuição do alcance, o que

resulta no aumento de estações rádio-base (ERBs) ou na necessidade de cadeias de radiofrequência (RF) mais caras e que consomem muita energia. Estes aspectos elevam o consumo de energia e o custo de hardware, além de agravar problemas como a interferência entre células/usuários [5, 6].

Dito isso e considerando as necessidades atuais e a longo prazo, a comunidade científica tem se dedicado ao estudo de soluções inovadoras, econômicas e com maior eficiência espectral e energética para a próxima geração de redes móveis, a sexta geração (6G), que deverá impor requisitos ainda mais rigorosos [5, 6].

As Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis (RISs, *Reconfigurable Intelligent Surfaces*) constituem uma destas soluções. Trata-se de uma superfície plana composta por elementos refletivos quase-passivos de baixo custo, que, de forma independente, são capazes de ajustar a amplitude e a fase do sinal incidente. Com isso, o sinal incidente na RIS pode ser controlado, de tal forma que o sinal refletido seja manipulado para alcançar diferentes propósitos, a depender da aplicação. Esta solução dá aos projetistas certo grau de controle sobre o canal de propagação, além de eliminar o uso de cadeias de RF e, portanto, diminuir o consumo de energia e de custos [5, 6].

Entre as aplicações, pode-se destacar a extensão do alcance de transmissão para usuários em zonas sem cobertura (*dead zones*); geração de sinais de *jamming* (interferência intencionada) para prevenir a escuta e, portanto, aumentar a segurança da comunicação; comunicação massiva entre dispositivos (D2D, *device-to-device*), em que as superfícies atuam como um concentrador de reflexão do sinal para mitigar interferências; realização de Transferência de Informação e Energia Sem Fio Simultânea (SWIPT, *Simultaneous Wireless Information and Power Transfer*) para diversos dispositivos em uma rede de Internet das Coisas (IoT, *Internet of Things*), entre outras [6].

As RISs são previstas para serem instaladas em fachadas de prédios, *outdoors*, janelas e outras estruturas. No seu modo de operação convencional, elas só são capazes de refletir o sinal incidente e, por isso, tanto o transmissor quanto o receptor devem estar localizados no mesmo lado da superfície. No entanto, este cenário nem sempre acontece na prática, visto que, geralmente, pode haver usuários em ambos os lados de uma RIS. Para superar esta limitação, as RISs com Transmissão e Reflexão Simultâneas (STAR-RISs, *Simultaneously Transmitting and Reflecting RISs*) têm sido propostas [5].

Neste caso, o sinal incidente em um elemento de uma STAR-RIS é dividido em duas partes: uma delas é refletida para o mesmo lado da superfície e a outra é transmitida para o lado oposto [5]. Uma RIS instalada na fachada de um prédio, por exemplo, em seu modo de operação convencional, só é capaz de atender usuários que estão na parte externa da construção, ou seja, de frente para a superfície. Já no modo de operação STAR, é possível atender tanto usuários que estão fora do prédio quanto usuários que estão dentro, ou seja, situados atrás da RIS.

Existem vários protocolos de operação para as STAR-RISs. Um deles é o chamado Divisão de Energia (ES, *Energy Splitting*), no qual assume-se que todos os elementos operam tanto no modo de transmissão quanto no modo de reflexão, ou seja, a energia do sinal incidente em todo elemento da superfície é dividida em duas componentes, uma para o sinal transmitido e outra para o sinal refletido [5].

Este contexto traz a motivação para o estudo de redes sem fio assistidas por STAR-RISs, que será realizado neste trabalho de conclusão de curso. A Seção 1.2 apresenta alguns trabalhos relacionados

ao tema, importantes para a realização deste estudo.

1.2 TRABALHOS RELACIONADOS

Os trabalhos [5] e [6] foram os mais relevantes para a elaboração deste trabalho. Os autores de [6] apresentam uma visão geral da tecnologia RIS, incluindo suas aplicações em comunicações sem fio, vantagens sobre tecnologias já existentes, o modelo de sinal correspondente e a arquitetura de hardware. Além disso, são pontuados alguns dos desafios-chaves no projeto e na implementação dessas superfícies. Por último, tem-se alguns resultados numéricos a respeito da eficiência da tecnologia em função do número de elementos refletivos e da distância entre o usuário e a ERB. Esses resultados revelam que, quanto maior o número de elementos refletivos, menor é a potência transmitida; em contrapartida, conforme o receptor se distancia da RIS, o desempenho dessa tecnologia torna-se inferior ao de um enlace direto entre transmissor e receptor.

Os autores de [5], por sua vez, apresentam uma visão geral da tecnologia STAR-RIS e três protocolos práticos de operação: Divisão de Energia, Comutação de Modo (MS, *Mode Switching*) e Comutação de Tempo (TS, *Time Switching*). Os autores propõem um problema de minimização do consumo de potência para os três protocolos, baseado em um sistema de comunicação de downlink auxiliado por STAR-RIS para transmissão *unicast* e *multicast*, em que uma ERB com múltiplas antenas envia informações para dois usuários de antena única situados um em cada lado da superfície, ou seja, para os usuários de transmissão e de reflexão. Esse problema considera a otimização conjunta entre a formação de feixe ativo na ERB e a formação de feixe passivo para transmissão e reflexão na STAR-RIS. Os resultados revelam que os protocolos ES e TS são mais adequados para comunicação *multicast* e *unicast*, respectivamente. Além disso, o consumo de energia necessário para ambos os tipos de transmissão é significativamente reduzido quando utiliza-se uma STAR-RIS em vez de RISs convencionais.

Ainda sobre as STAR-RISs, o trabalho [7] é um dos primeiros encontrados na literatura que propõe um modelo de comunicação factível para esta nova tecnologia: baseado no princípio de equivalência de campo, cada elemento da superfície é caracterizado por coeficientes de transmissão e de reflexão, modelo adotado em muitos estudos posteriores. Os resultados numéricos desse estudo confirmam que uma STAR-RIS pode estender significativamente a cobertura da comunicação e atingir um ordem de diversidade total em ambos os lados da superfície, produzindo um ganho de desempenho superior em relação a uma RIS convencional. Até então, a maioria dos estudos se concentrava no protótipo de metassuperfícies que viabilizam a tecnologia e/ou nas propriedades físicas destas superfícies. Por exemplo, em 2020, a empresa de telefonia celular japonesa NTT DOCOMO INC. divulgou um protótipo de uma metassuperfície dinâmica transparente que viabiliza a implantação das STAR-RISs [8]. A depender da distância entre a metassuperfície e um substrato transparente feito de vidro, é possível atingir três cenários de propagação do sinal: reflexão completa, transmissão completa e reflexão e transmissão simultâneas.

As aplicações das RISs, algumas já citadas na Seção 1.1, são estendidas para as STAR-RISs em vários estudos encontrados na literatura. Por exemplo, a segurança proporcionada pelo uso de STAR-RISs é abordada pelos autores de [9] e [10]. Em [9], considera-se um cenário em que vários

bisbilhoteiros podem escutar os sinais transmitidos pela ERB para usuários legítimos localizados nas regiões de transmissão e de reflexão e, então, é proposto um esquema de transmissão de sigilo baseado em ruído artificial e assistido por uma STAR-RIS. Esse esquema é resolvido através de uma otimização conjunta das formações de feixes ativos e passivos, como feito em [5]. Já em [10], considera-se um sistema de Comunicação por Radar de Dupla Função (DPRC, *Dual Function Radar-Communication*) assistido por uma STAR-RIS e propõe-se um esquema para proteger simultaneamente a transmissão de informações confidenciais e a detecção de alvos. Para tal, os sinais públicos destinados a vários usuários não classificados são explorados para enganar os alvos de radar potencialmente maliciosos. Em ambos, é confirmada a eficácia da STAR-RIS em comparação a outros esquemas convencionais.

Já em [11] é explorada a aplicação das STAR-RISs em sistemas SWIPT. Nesse artigo, é considerado um sistema de comunicação SWIPT auxiliado por uma STAR-RIS, em que uma ERB atende múltiplos receptores de informação e receptores de energia presentes na região de cobertura. Então, investiga-se a alocação de recursos desse sistema, de modo a satisfazer determinadas restrições dos receptores de informação e de energia. Os resultados permitem concluir que o uso de STAR-RISs nesses sistemas reduz significativamente a potência de transmissão quando comparado a sistemas assistidos por RISs convencionais.

Por fim, em [12], é apresentada uma caracterização analítica da região de cobertura de sistemas de comunicação assistidos por STAR-RISs e baseados no protocolo ES, para os casos de Acesso Múltiplo Ortogonal (OMA, *Orthogonal Multiple Access*) e Acesso Múltiplo Não Ortogonal (NOMA, *Non-Orthogonal Multiple Access*). Os resultados confirmam que a utilização de STAR-RISs contribui para a extensão da região de cobertura de um sistema, como em [7], e que a utilização de NOMA proporciona um melhor desempenho em comparação com OMA. No entanto, o efeito do cancelamento de interferência sucessivo e imperfeito degrada o desempenho do NOMA e precisa ser levado em conta em uma análise realista.

Com base nos estudos apresentados, o objetivo deste trabalho é destacado na próxima Seção.

1.3 OBJETIVOS

A proposta deste trabalho é avaliar o desempenho de uma rede sem fio baseada em STAR-RIS a partir do protocolo ES, considerando um cenário de dois usuários: um na região de transmissão e outro na região de reflexão, além de uma comunicação *unicast*. O objetivo é avaliar o efeito da variação de parâmetros do sistema no desempenho da rede, a partir de métricas de desempenho como probabilidade de *outage* e capacidade ergódica, as quais são funções da relação sinal-ruído (SNR, *Signal-to-Noise Ratio*). Para tal, serão considerados três esquemas de alocação de potência na estação rádio base para as informações dos usuários, três esquemas de divisão de energia para os coeficientes de transmissão e de reflexão e parâmetros como o número de elementos da STAR-RIS.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Os capítulos seguintes deste trabalho estão organizados da seguinte maneira:

- **Capítulo 2:** Esse capítulo traz uma revisão bibliográfica de conceitos relacionados ao tema para o melhor entendimento do trabalho.
- **Capítulo 3:** Nesse capítulo é apresentada uma descrição detalhada do modelo do sistema de comunicação sem fio assistido por uma STAR-RIS que será avaliado neste trabalho.
- **Capítulo 4:** Nesse capítulo são apresentados os resultados numéricos obtidos para o sistema proposto e as respectivas discussões, a fim de avaliar o seu desempenho.
- **Capítulo 5:** Por fim, esse capítulo traz as conclusões deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo serão apresentados os fundamentos teóricos relacionados ao tema proposto para este trabalho. A Seção 2.1 trata dos efeitos de propagação de larga e pequena escala: perda de percurso, sombreamento e desvanecimento. Já a Seção 2.2 apresenta os conceitos básicos de RIS e, posteriormente, a Seção 2.3 apresenta a STAR-RIS e os protocolos de operação relacionados. Por fim, a Seção 2.4 traz uma descrição sobre as métricas de desempenho que serão utilizadas para a análise do desempenho do sistema proposto.

2.1 EFEITOS DE PROPAGAÇÃO

Um dos maiores desafios em sistemas de comunicação sem fio é alcançar uma comunicação de alta confiabilidade e suportar taxas de dados cada vez mais elevadas, devido a suscetibilidade do canal a ruído, interferência e outros impedimentos que variam ao longo do tempo e de maneira aleatória. Estes eventos são divididos em dois grandes grupos: efeitos de propagação de larga e pequena escala. Os efeitos de grande escala compreendem a perda de percurso e o sombreamento, enquanto o desvanecimento resultante das componentes de multipercurso introduzidas pelo canal de propagação caracteriza o efeito de pequena escala [13].

2.1.1 Efeitos de propagação de larga escala

Os efeitos de propagação de larga escala são assim definidos porque as variações na potência recebida ocorrem em distâncias relativamente grandes [13].

2.1.1.1 Perda de percurso

A perda de percurso, do inglês *path loss*, é resultado da dissipação da potência irradiada pelo transmissor ao longo do caminho entre transmissor e receptor, além dos efeitos do canal de propagação. Como um efeito de larga escala, geralmente se dá em distâncias de 100 a 1000 metros [13].

A perda de percurso é definida como a razão entre a potência transmitida e a potência recebida em dado caminho de propagação. No espaço livre, assumindo que não há nenhum obstáculo entre o transmissor e o receptor e que o sinal propaga-se ao longo de uma linha reta entre os dois, a perda de percurso, P_L , em dB, é dada por [13]:

$$P_L[dB] = 10 \log_{10} \frac{P_r}{P_t} = 10 \log_{10} \frac{G_t \lambda^2}{(4\pi d)^2}, \quad (2.1)$$

em que P_t é a potência transmitida, P_r é a potência recebida, G_t é o produto dos ganhos das antenas transmissora e receptora na direção de linha de visada (LoS, *Line of Sight*), $\lambda = c/f$ é o comprimento de onda, sendo c a velocidade da luz no vácuo e f a frequência de operação do sistema, e d é a distância entre transmissor e receptor.

A partir de (2.1) é possível constatar que a perda de percurso no espaço livre é inversamente proporcional ao quadrado da distância entre transmissor e receptor e diretamente proporcional ao comprimento de onda, este que, por sua vez, é inversamente proporcional a frequência. Isto significa que para maiores frequências, menor é a potência recebida e, portanto, maior é a perda de percurso.

No entanto, a perda de percurso no espaço livre não é um modelo adequado para representar a maioria dos cenários. A variedade e a complexidade de ambientes de propagação de sinal existentes tornam difícil a definição de um modelo analítico único que caracterize a perda de percurso. Devido a isso, existe um modelo simplificado, que será apresentado na Seção a seguir, e modelos empíricos baseados em medições realizadas em determinado ambiente de propagação e que são válidos apenas para algumas especificações, como frequência, distância entre transmissor e receptor, altura das antenas, tipo de ambiente e outras [13].

2.1.1.2 Modelo simplificado de perda de percurso

Em muitos casos é mais interessante utilizar modelos simplificados para determinar a perda de percurso, que capturam a essência da propagação do sinal, ao invés de modelos empíricos complicados, que na realidade estabelecem apenas aproximações restritas. Isso se aplica, por exemplo, em uma análise de *trade-off*, na qual deseja-se analisar uma nova tecnologia proposta baseada em uma tecnologia referência já existente [13].

Um modelo simplificado de perda de percurso comumente utilizado em projetos de sistemas de comunicação sem fio reais é dado por [13]:

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

em que K_0 é uma constante adimensional que depende das características das antenas do sistema e do ganho médio de canal, d_0 é uma distância de referência para o campo distante da antena e η é o expoente de perda de percurso.

Devido ao fenômeno de espalhamento, o modelo dado por (2.2) é geralmente válido apenas para $d > d_0$, em que d_0 normalmente assume valores entre 1 e 10 metros em ambientes *indoors* e entre 10 a 100 metros em ambientes *outdoors*. O expoente de perda de percurso η varia conforme o ambiente de propagação. Segundo [13, Tabela 2.2], η pode variar de 1,6 a 6,5: em ambientes urbanos com macrocélulas, pode-se assumir η de 3,7 a 6,5, enquanto em ambientes urbanos com microcélulas pode-se assumir η de 2,7 a 3,5. Em lojas, fábricas e escritórios η pode variar de 1,6 a 3,5, enquanto em casas assume-se $\eta = 3$.

2.1.1.3 Sombreamento

O sombreamento refere-se ao bloqueio físico encontrado por todo sinal em um sistema de comunicação sem fio devido aos obstáculos presentes no caminho de propagação, que levam a variações aleatórias na potência recebida. Estas variações também se devem a mudanças nas superfícies refletivas e a objetos que causam espalhamento. Este efeito ocorre em distâncias proporcionais ao comprimento do obstáculo: 10 a 100 metros em ambientes *outdoors* e menores em ambientes *indoors* [13].

Para descrever o sombreamento, é necessário conhecer as características das obstruções, como localização, tamanho e propriedades dielétricas, além das mudanças nas superfícies refletivas e os objetos que causam espalhamento. No entanto, geralmente estas características não são conhecidas e, por isso, modelos estatísticos são utilizados para caracterizar este tipo de atenuação do sinal [13].

O modelo mais comum utilizado é o sombreamento log-normal, comprovado empiricamente como preciso para modelar a variação na potência recebida devido ao bloqueio físico do sinal. Neste modelo, a razão entre a potência transmitida e a potência recebida, $\psi = \frac{P_t}{P_r}$, é assumida como uma variável aleatória com uma distribuição log-normal, dada por [13]:

$$p(\psi) = \frac{\xi}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\psi_{\text{dB}}}\psi} \exp \left[-\frac{(10 \log_{10} \psi - \mu_{\psi_{\text{dB}}})^2}{2\sigma_{\psi_{\text{dB}}}^2} \right], \psi > 0, \quad (2.3)$$

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

2.1.2 Efeitos de propagação de pequena escala

Os efeitos de propagação de pequena escala são assim denominados pois as variações na potência recebida ocorrem em distâncias muito curtas, na ordem do comprimento de onda do sinal. Estes efeitos, também conhecidos na literatura como desvanecimento, são caracterizados pela combinação de múltiplas réplicas do sinal transmitido que chegam ao receptor em instantes de tempo ligeiramente distintos e com diferentes amplitudes e fases, o que pode levar a um sinal recebido distorcido e/ou enfraquecido. Estas réplicas são resultado dos multipercursos encontrados pelo sinal transmitido devido a efeitos de reflexão, refração, difração e espalhamento, decorrentes dos múltiplos objetos presentes no caminho de propagação [13, 14].

Um canal de multipercursos pode ser caracterizado tanto por sua natureza dispersiva no tempo quanto por sua natureza variável no tempo. A natureza dispersiva no tempo é representada pelo espalhamento do atraso de tempo, isto é, o atraso de tempo entre a chegada da primeira componente do sinal transmitido e a última, o que pode levar a uma distorção significativa do sinal recebido e, portanto, a interferência intersimbólica. Analogamente, no domínio da frequência, tem-se a largura de banda de coerência, largura de banda pela qual o canal passa por todas as componentes espectrais com ganho e fase linear aproximadamente iguais. Já a natureza variável no tempo, causada pela característica móvel do receptor e/ou transmissor, além do movimento dos objetos presentes no canal, é descrita pelo espalhamento Doppler e pelo tempo de coerência. Em contraste com o espalhamento do atraso, o espalhamento Doppler é uma medida do alargamento espectral causado pela taxa de mudança do canal. Enquanto isso, o tempo de coerência é o dual do espalhamento Doppler no domínio de tempo, e pode ser definido como o tempo durante o qual a resposta ao impulso do canal é invariante [13, 14].

O comportamento estatístico do desvanecimento pode ser descrito por diferentes distribuições, a depender da natureza do ambiente de propagação. A seguir, serão apresentadas as distribuições Rayleigh e Rice, relevantes para o desenvolvimento deste trabalho.

2.1.2.1 Desvanecimento do tipo Rayleigh

A distribuição Rayleigh é frequentemente utilizada para modelar o desvanecimento em cenários sem linha de visada, ou seja, sem componente dominante. Portanto, neste caso, apenas componentes de multipercurso do sinal transmitido são combinadas no receptor. Dessa forma, pelo Teorema Central do Limite (CLT, *Central Limit Theorem*), este modelo pode ser representado pela soma de duas variáveis aleatórias gaussianas independentes e identicamente distribuídas [13, 15].

O coeficiente complexo de um canal com desvanecimento do tipo Rayleigh é dado por [13, 16]:

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

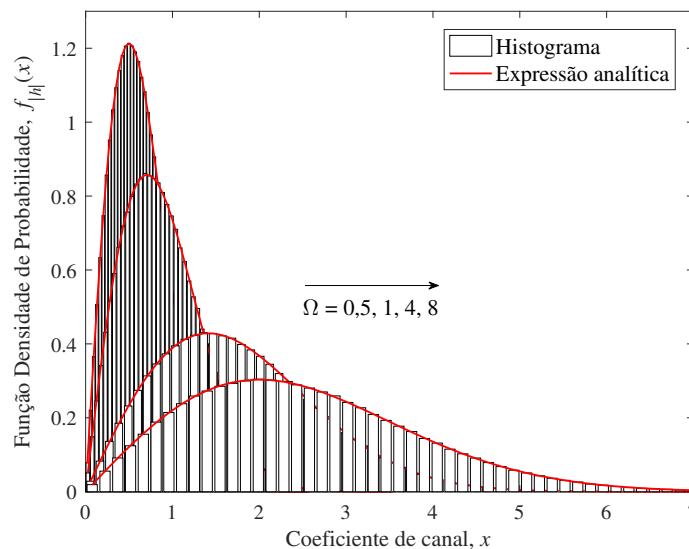
em que X e Y são variáveis aleatórias gaussianas independentes e identicamente distribuídas com média zero e variância $\sigma^2 = \Omega/2$, isto é, $X \sim \mathcal{N}(0, \frac{\Omega}{2})$ e $Y \sim \mathcal{N}(0, \frac{\Omega}{2})$, sendo $\Omega = \mathbb{E}[|h|^2]$ o ganho médio de canal, $|h|^2$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

A função densidade de probabilidade (PDF, *Probability Density Function*) de uma variável aleatória do tipo Rayleigh é dada por [13, 16]:

$$f_{|h|}(x) = \frac{2x}{\Omega} \exp\left(-\frac{x^2}{\Omega}\right), x > 0. \quad (2.5)$$

Note que esta distribuição só depende do parâmetro Ω . A Figura 2.1 apresenta a PDF de uma variável aleatória do tipo Rayleigh obtida a partir da expressão analítica dada em (2.5) e de um histograma gerado em cima de 10^6 realizações do coeficiente de canal, segundo (2.4), para $\Omega = 0,5, 1, 4$ e 8 .

Figura 2.1 – PDF de uma distribuição Rayleigh



Fonte: Adaptado de [16].

Conclui-se que, quanto maior o ganho médio de canal, mais homogênea é a distribuição, ou seja, menos provável é que o coeficiente de canal assuma valores menores do que 1, tornando o cenário mais favorável.

2.1.2.2 Desvanecimento do tipo Rice

A distribuição Rice, ao contrário da distribuição Rayleigh, é frequentemente utilizada para modelar cenários que possuem uma forte componente especular, isto é, uma componente dominante, de linha de visada, além de componentes de multipercurso mais fracas (componentes difusas) [13, 15].

Então, o coeficiente complexo de um canal com desvanecimento do tipo Rice é dado por [13, 16]:

$$h = Ae^{j\phi} + X + jY, \quad (2.6)$$

em que A é uma constante, ϕ é uma variável aleatória uniforme entre 0 e 2π , isto é, $\phi \sim \mathcal{U}[0, 2\pi)$, e X e Y são variáveis aleatórias gaussianas independentes e identicamente distribuídas com média zero e variância σ^2 , isto é, $X \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$ e $Y \sim \mathcal{N}(0, \sigma^2)$.

A função densidade de probabilidade de uma variável aleatória do tipo Rice é dada por [13, 16]:

$$f_{|h|}(x) = \frac{2(1+K)\exp(-K)x}{\Omega} \exp\left(-\frac{(1+K)x^2}{\Omega}\right) I_0\left(2x\sqrt{\frac{K(1+K)}{\Omega}}\right), x > 0, \quad (2.7)$$

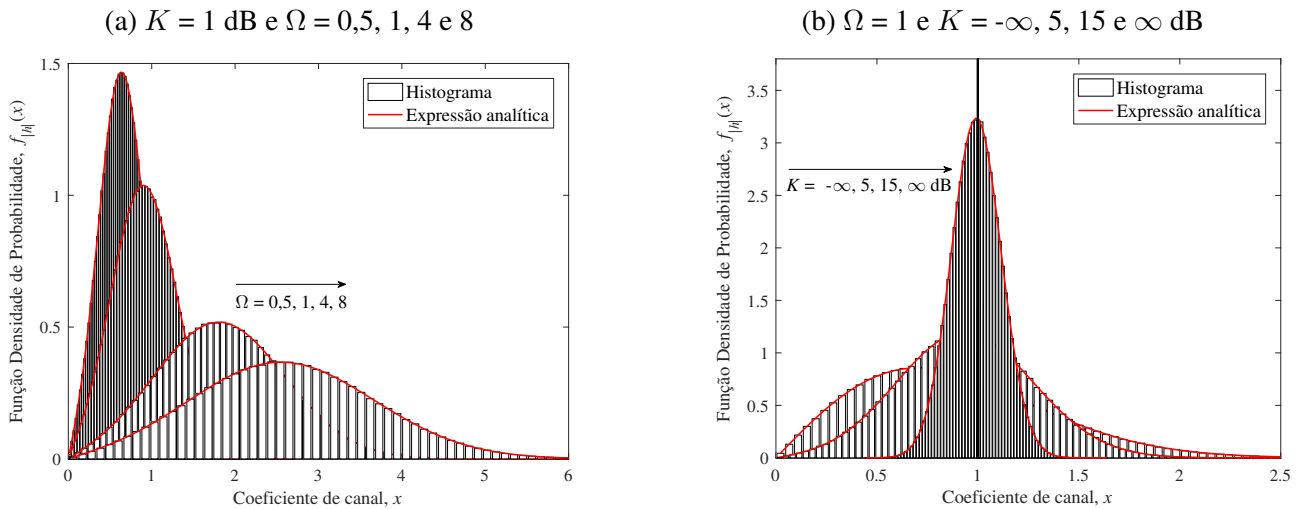
em que $I_0(\cdot)$ é a função modificada de Bessel de ordem zero e

$$K = \frac{A^2}{2\sigma^2} \quad (2.8)$$

é o fator de Rice. Assim, tem-se o ganho médio de canal $\Omega = \mathbb{E}[|h|^2] = A^2 + 2\sigma^2 = 2\sigma^2(1+K)$.

Ao contrário da distribuição Rayleigh, a distribuição Rice depende de dois parâmetros, Ω e K . As Figuras 2.2a e 2.2b apresentam a PDF de uma variável aleatória do tipo Rice obtida a partir da expressão analítica dada em (2.7) e de um histograma gerado em cima de 10^6 realizações do coeficiente de canal, segundo (2.6), considerando $\Omega = 0,5, 1, 4$ e 8 e $K = 3$ dB, e $K = -\infty, 5, 15$ e ∞ dB e $\Omega = 1$, respectivamente.

Figura 2.2 – PDF de uma distribuição Rice



Fonte: Adaptado de [16].

Conclui-se que, quanto maior o ganho médio de canal, menos provável é que o coeficiente de canal assuma valores menores do que 1, o que configura uma característica favorável. Já quanto ao fator de Rice, a medida que ele aumenta, a distribuição torna-se mais simétrica até que se tenha um canal sem desvanecimento. Em contrapartida, conforme ele diminui, mais a distribuição Rice aproxima-se de uma distribuição Rayleigh, o que permite concluir que a distribuição Rayleigh é um caso particular da distribuição Rice para $K = -\infty$ dB.

2.2 SUPERFÍCIE INTELIGENTE RECONFIGURÁVEL (RIS)

As Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis (RISs) constituem uma nova tecnologia proposta para atender aos requisitos previstos para a nova geração de redes móveis, o 6G. Trata-se de uma superfície plana com elementos refletivos quase-passivos de baixo custo, que, de forma independente, são capazes de ajustar a amplitude e/ou a fase do sinal incidente e, portanto, permitem a manipulação do sinal refletido para alcançar os mais variados objetivos, a depender da aplicação [6]. Em outras palavras, em contraste com demais técnicas relacionadas existentes, uma RIS permite reconfigurar o ambiente no qual está inserida por meio de reflexões inteligentes e controláveis, transformando-o em um “Ambiente de Rádio Inteligente” (SRE, *Smart Radio Environment*). Isso oferece aos projetistas maior grau de controle sobre o canal de propagação, ao mesmo tempo que elimina o uso de cadeias de RF, resultando na redução do consumo de energia e de custos [6].

Como já apresentado na Seção 1.1, as RISs têm uma grande variedade de aplicações. Em cenários sem linha de visada, por exemplo, esta tecnologia possibilita a criação de um enlace virtual que viabiliza a comunicação com um receptor que está em uma zona sem cobertura. Já em cenários com linha de visada, favorece o aumento da confiabilidade de uma rede por meio da geração de sinais de *jamming* que previnem a escuta [6].

O hardware destas superfícies é baseado no conceito de metassuperfície, um metamaterial de espessura pequena digitalmente controlável. Especificamente, uma metassuperfície é 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 [6, 17]. A resposta individual (amplitude e/ou fase) de cada elemento é controlada a partir de um projeto adequado das metassuperfícieis, que incluem aspectos como forma, tamanho, orientação, arranjo e outros. Em sistemas de comunicação sem fio, este controle é essencial devido a característica móvel dos usuários, que exige reconfigurações em tempo real. Tal controle pode ser alcançado a partir da manipulação da tensão de polarização de dispositivos eletrônicos como diodos PIN, transistores de efeito de campo (FETs, *Field Effect Transistors*) ou interruptores baseados em Sistemas Microeletromecânicos (MEMS, *Micro-Electromechanical Systems*). Esta manipulação, por sua vez, é realizada por um controlador inteligente que é conectado a RIS [6].

O modelo de comunicação de uma rede que utiliza uma RIS resume-se a um sistema de duplo salto, composto por dois enlaces: transmissor/RIS e RIS/receptor. Cada elemento da superfície recebe sinais resultantes de multipercursos sobrepostos e, então, um sinal combinado com amplitude e/ou fase ajustadas é retransmitido como se fosse de uma única fonte pontual, levando a um modelo de canal multiplicativo [6].

2.3 RIS COM TRANSMISSÃO E REFLEXÃO SIMULTÂNEAS (STAR-RIS)

As RISs com Transmissão e Reflexão Simultâneas (STAR-RISs) possibilitam que o sinal incidente na superfície seja refletido para o mesmo lado da superfície e, simultaneamente, transmitido para o outro lado, proporcionando uma cobertura completa do ambiente. Trata-se de uma solução alternativa à restrição topológica apresentada pelas RISs convencionais (ou RISs somente refletivas) apresentadas na Seção 2.2, que só refletem o sinal incidente e, portanto, exigem que tanto o transmissor quanto o receptor estejam do mesmo lado da superfície, proporcionando cobertura de apenas metade do ambiente e limitando as suas aplicações [18].

Em geral, o sinal incidente em um dado elemento de uma STAR-RIS é dividido em dois sinais, um transmitido e outro refletido. Estes sinais são configurados através de dois coeficientes geralmente independentes, nomeados coeficientes de transmissão e de reflexão, os quais têm amplitudes e ajustes de fase próprios. Portanto, o modelo de comunicação de uma rede assistida por uma STAR-RIS pode ser entendido como um sistema de duplo salto para cada um dos usuários, assim como uma rede assistida por uma RIS, mas que é composto por três enlaces: transmissor/STAR-RIS, STAR-RIS/usuário de transmissão e STAR-RIS/usuário de reflexão.

Quanto ao hardware, enquanto as RISs convencionais têm substratos opacos para evitar a penetração de sinais, as STAR-RISs devem ser transparentes para os sinais na sua frequência de operação [18].

2.3.1 Protocolos

Cada elemento de uma STAR-RIS, a depender do ajuste das amplitudes dos coeficientes de transmissão e de reflexão, pode operar em modo de transmissão total (modo T), modo de reflexão total (modo R) ou modo de transmissão e reflexão simultâneas (modo T&R) [5, 18]. Com base nestes modos, são propostos três protocolos práticos de operação para redes sem fio assistidas por STAR-RIS, os quais serão melhor descritos a seguir.

2.3.1.1 Energy Splitting

Para o ES, assume-se que todos os elementos da STAR-RIS operam no modo T&R. Assim, a energia do sinal incidente é dividida em duas componentes, uma para o sinal transmitido e outra para o sinal refletido, a uma razão ditada pelos valores das amplitudes dos coeficientes de transmissão e de reflexão. Essa característica oferece alta flexibilidade nas aplicações, ao mesmo tempo que torna mais complexo o ajuste das variáveis [5, 18].

2.3.1.2 Mode Switching

Para o MS, todos os elementos da STAR-RIS são divididos em dois grupos: um deles contém elementos que operam no modo T e o outro contém elementos que operam no modo R. Este protocolo pode ser visto como um caso especial do ES, em que as amplitudes dos coeficientes de transmissão e de reflexão é restrita a valores binários, ou, ainda, como uma composição de uma RIS somente refletiva e uma RIS somente transmissora de tamanhos reduzidos. Devido ao seu modelo “*on-off*”, o MS é mais fácil de implementar em comparação ao ES; no entanto, não atinge o mesmo ganho de transmissão e

de reflexão uma vez que apenas um subconjunto dos elementos é selecionado para transmissão e outro para reflexão [5, 18].

2.3.1.3 Time Switching

O TS, por sua vez, alterna periodicamente todos os elementos entre os modos T e R em intervalos de tempo ortogonais. A porção de tempo alocada para transmissão total e reflexão total dos sinais pode ser otimizada para atingir um equilíbrio entre as qualidades de comunicação na frente e atrás da superfície. A vantagem deste protocolo é que, devido a exploração do domínio do tempo, os coeficientes de transmissão e de reflexão não estão acoplados; portanto, eles podem ser otimizados de forma independente. No entanto, a comutação periódica dos elementos introduz requisitos rigorosos de sincronização de tempo, o que aumenta a sua complexidade de implementação em comparação com os protocolos ES e MS [5, 18].

2.4 MÉTRICAS DE DESEMPENHO

Como já discutido, um sinal transmitido por um canal em um sistema de comunicação sem fio encontra vários efeitos durante o caminho de propagação que degradam a sua qualidade, sejam eles de larga ou pequena escala, como a perda de percurso, o sombreamento e o desvanecimento resultante de componentes de multipercurso. Dito isso, é de extrema importância avaliar o desempenho destes sistemas, principalmente em relação a confiabilidade, isto é, se são capazes de entregar um sinal transmitido sem grandes erros na recepção. Para tal, existem algumas métricas de desempenho, como a probabilidade de *outage* e a capacidade ergódica, estas que, por sua vez, são funções da SNR. Estas métricas, além de permitirem a análise do desempenho de um sistema, permitem caracterizar o efeito da variação de diversos parâmetros da rede. A seguir, tais métricas serão brevemente apresentadas.

2.4.1 Probabilidade de *Outage*

A probabilidade de *outage* é uma das métricas de desempenho mais importantes para a análise da confiabilidade de um sistema. Ela é definida como a probabilidade da SNR fim-a-fim instantânea recebida, γ_{e2e} , ser inferior a uma SNR limiar, γ_{th} , relacionada a qualidade de serviço (QoS, *Quality of Service*) exigida pelo sistema [13]. Matematicamente:

$$P_{out} = \Pr(\gamma_{e2e} < \gamma_{th}), \quad (2.9)$$

em que $\gamma_{e2e} = \gamma|h|^2$, sendo γ a SNR transmitida e $|h|^2$ o ganho instantâneo de canal.

2.4.2 Capacidade Ergódica

A capacidade ergódica, também conhecida como capacidade de Shannon, é definida como a máxima taxa de comunicação média sobre múltiplos estados de canais alcançada por um sistema, considerando o tipo de desvanecimento que afeta estes canais. Em outras palavras, trata-se da máxima taxa de dados que se pode transmitir por um canal de forma confiável. Matematicamente, a capacidade ergódica é igual a média da capacidade de Shannon normalizada pela largura de banda do canal B , $\log_2(1 + \gamma_{e2e})$, para um canal com Ruído Gaussiano Aditivo Branco (AWGN, *Additive White Gaussian Noise*) com SNR fim-a-fim instantânea recebida γ_{e2e} , calculada sobre a distribuição de γ_{e2e} [13], isto é:

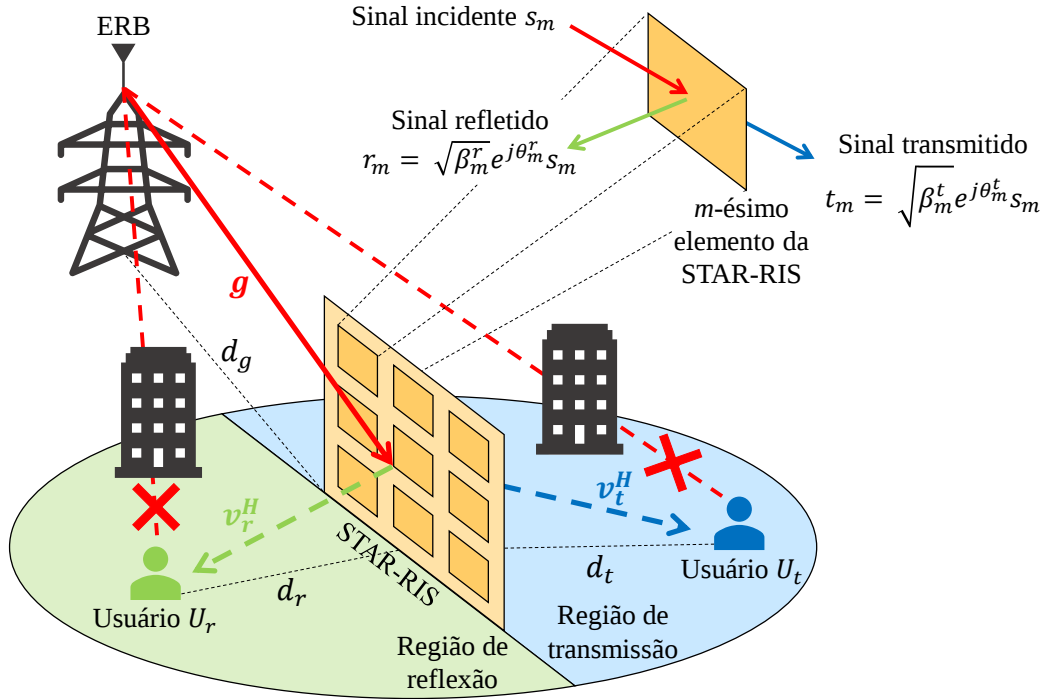
$$C = E [\log_2 (1 + \gamma_{e2e})] , \quad (2.10)$$

dada em bps/Hz.

3 MODELO DO SISTEMA

Este capítulo descreve o modelo do sistema de comunicação sem fio assistido por uma STAR-RIS que será avaliado neste trabalho, apresentado na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Modelo do Sistema



Fonte: Elaborado pelo autor.

A rede é composta por uma ERB de uma antena que se comunica com dois usuários de antena única com o auxílio de uma STAR-RIS composta de M elementos com capacidade de transmissão e de reflexão simultâneas. Um dos usuários está localizado na região de transmissão, ou seja, atrás da superfície, e por isso é chamado de usuário U_t . Já o outro está na região de reflexão, ou seja, na frente da superfície, e por isso é chamado de usuário U_r .

Os enlaces entre a ERB e ambos os usuários estão obstruídos por obstáculos. Há linha de visada somente entre a ERB e a STAR-RIS e entre a STAR-RIS e cada um dos usuários. Neste caso, a função da STAR - RIS é possibilitar a comunicação entre a ERB e os usuários, estabelecendo enlaces adicionais de transmissão e de reflexão. Os coeficientes complexos dos canais entre a ERB e a STAR-RIS, entre a STAR-RIS e o usuário de transmissão e entre a STAR-RIS e o usuário de reflexão são identificados por, respectivamente: $\mathbf{g} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$, $\mathbf{v}_t^H \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ e $\mathbf{v}_r^H \in \mathbb{C}^{1 \times M}$ [5]. A distância entre a ERB e a STAR-RIS é representada por d_g , enquanto as distâncias entre a STAR-RIS e os usuários U_k , $k \in \{t, r\}$, representadas por d_k , $k \in \{t, r\}$, são variáveis aleatórias uniformemente distribuídas e independentes entre $d_{\min}$ e $d_{\max}$, isto é, $d_k \sim \mathcal{U}(d_{\min}, d_{\max})$.

Os canais são afetados por desvanecimento do tipo plano, com relação a sua natureza dispersiva no tempo, e lento, com relação a sua natureza variável no tempo. Em um desvanecimento plano, a largura de banda do sinal é menor que a largura de banda de coerência do canal; portanto, o canal

não introduz distorção, o que equivale no tempo a não apresentar interferência intersimbólica. Já em um desvanecimento lento, o intervalo da unidade de informação (geralmente, o tempo de símbolo), é menor que o tempo de coerência do canal; isso significa que o canal é quase estático ou, em outras palavras, apresenta resposta constante durante o tempo de um símbolo [14].

Além disso, este sistema é afetado por desvanecimento do tipo Rice. Como apresentado, as STAR-RISs vêm sendo estudadas como uma solução para cenários de propagação de ondas milimétricas, onde a atenuação é maior. Portanto, é adequado que se tenha linha de visada entre os elementos, caso em que o canal é melhor caracterizado por uma distribuição Rice.

O sinal incidente no m -ésimo elemento da STAR-RIS é representado por s_m , para $m \in \mathcal{M} \triangleq \{1, 2, \dots, M\}$. Assim, os sinais transmitido e refletido pelo m -ésimo elemento da superfície podem ser modelados por $t_m = (\sqrt{\beta_m^t} e^{j\theta_m^t}) s_m$ e $r_m = (\sqrt{\beta_m^r} e^{j\theta_m^r}) s_m$, em que $\sqrt{\beta_m^t} \in \{0, 1\}$, $\theta_m^t \in [0, 2\pi)$ e $\sqrt{\beta_m^r} \in \{0, 1\}$, $\theta_m^r \in [0, 2\pi)$ representam a amplitude e o ajuste de fase dos coeficientes de transmissão e de reflexão, respectivamente [5].

Para cada elemento, os ajustes de fase dos coeficientes de transmissão e de reflexão, ou seja, θ_m^t e θ_m^r , podem ser ajustados de forma independente um do outro. Por outro lado, as amplitudes $\sqrt{\beta_m^t}$ e $\sqrt{\beta_m^r}$ são acopladas devido a Lei da Conservação de Energia. Dessa forma, para cada elemento, a soma das energias dos sinais transmitido e refletido deve ser igual a energia do sinal incidente, isto é, $|t_m|^2 + |r_m|^2 = |s_m|^2$, o que leva a [5]:

$$\beta_m^t + \beta_m^r = 1, \forall m \in \mathcal{M}. \quad (3.1)$$

Em uma comunicação *unicast*, em que a ERB envia informações diferentes para os usuários de transmissão e de reflexão, o sinal recebido pelo usuário U_k , $k \in \{t, r\}$, considerando o protocolo ES, é dado por [5]:

$$y_k = \mathbf{v}_k^H \mathbf{\Theta}_k \mathbf{g} \left(\sqrt{\alpha_t P} x_t + \sqrt{\alpha_r P} x_r \right) + n_k, \quad (3.2)$$

em que $\mathbf{\Theta}_k \in \mathbb{C}^{M \times M}$ é a matriz de coeficientes de transmissão, para $k = t$, e de reflexão, para $k = r$, dada por $\mathbf{\Theta}_k = \text{diag} \left(\sqrt{\beta_1^k} e^{j\theta_1^k}, \dots, \sqrt{\beta_M^k} e^{j\theta_M^k} \right)$, P é a potência total disponível na ERB, α_t e α_r são os fatores de alocação de potência da ERB para o usuário de transmissão e de reflexão, respectivamente, sendo $\alpha_t + \alpha_r = 1$. Além disso, x_t e x_r representam o símbolo de informação da ERB para os usuários de transmissão e de reflexão, respectivamente, sendo $\mathbb{E}[|x_k|^2] = 1$, e n_k é uma variável aleatória que representa o ruído AWGN no usuário U_k , cuja distribuição é gaussiana complexa circularmente simétrica de média 0 e variância σ_n^2 , isto é, $n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_n^2)$.

Partindo de (3.2), a Relação Sinal-Interferência-Mais-Ruído (SINR, *Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio*) instantânea do usuário U_k , $k \in \{t, r\}$, pode ser escrita como [5]:

$$\begin{aligned} \gamma_k &= \frac{\alpha_k P |\mathbf{v}_k^H \mathbf{\Theta}_k \mathbf{g}|^2}{\alpha_{\bar{k}} P |\mathbf{v}_k^H \mathbf{\Theta}_k \mathbf{g}|^2 + \sigma_n^2} \\ &= \frac{\alpha_k \gamma |\mathbf{v}_k^H \mathbf{\Theta}_k \mathbf{g}|^2}{\alpha_{\bar{k}} \gamma |\mathbf{v}_k^H \mathbf{\Theta}_k \mathbf{g}|^2 + 1}, \end{aligned} \quad (3.3)$$

em que $\bar{k} = r$, se $k = t$, $\bar{k} = t$, se $k = r$ e $\gamma = \frac{P}{\sigma_n^2}$ é a SNR transmitida pela ERB.

Portanto, a probabilidade de *outage* instantânea e a capacidade instantânea do usuário U_k , $k \in \{t, r\}$, podem ser escritas, respectivamente, como:

$$P_{\text{out},k} = \Pr(\gamma_k < \gamma_{\text{th}}) \quad (3.4)$$

e

$$C_k = \log_2(1 + \gamma_k). \quad (3.5)$$

Neste trabalho, será avaliada a capacidade agregada do sistema. Para o modelo proposto, a capacidade agregada instantânea é igual a soma das capacidades instantâneas dos usuários U_k , $k \in \{t, r\}$, dadas em (3.5), isto é:

$$\begin{aligned} C_{\text{agregada}} &= \sum_{k \in \{t, r\}} C_k \\ &= \sum_{k \in \{t, r\}} \log_2(1 + \gamma_k). \end{aligned} \quad (3.6)$$

O próximo capítulo apresenta a análise dos resultados do sistema descrito a partir das métricas de desempenho probabilidade de *outage* e capacidade ergódica, as quais são função da SINR.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta o desempenho do sistema descrito no Capítulo 3. A probabilidade de *outage* e a capacidade ergódica do sistema, as quais são função da SINR, foram avaliadas a partir de simulações realizadas no software MATLAB, baseadas no método de Monte Carlo com 10^6 iterações. Este método consiste em realizações massivas e aleatórias dos estados dos canais, a fim de obter resultados numéricos que convergem para um resultado muito próximo ao comportamento real.

Para tal, considerou-se uma frequência de operação de 3,5 GHz. A distância entre a ERB e a STAR-RIS, d_g , e as distâncias máxima e mínima entre a STAR-RIS e os usuários, $d_{\max}$ e $d_{\min}$, são iguais a 150 metros, 20 metros e 1 metro, respectivamente. Todos os canais tem largura de banda $B = 1$ MHz e ganhos médios definidos a partir do modelo simplificado de perda de percurso, apresentado na Subseção 2.1.1.2. Os expoentes de perda de percurso são $\eta_g = 3$ e $\eta_t = \eta_r = 2,5$ para o canal entre a ERB e a STAR-RIS e para os canais entre a STAR-RIS e os usuários, respectivamente, enquanto o fator de Rice, K , é igual a 3 dB. A SNR limiar, γ_{th} , foi considerada como igual a -10 dB, e o número de elementos da STAR-RIS, M , quando não especificado, é igual a 64. De forma semelhante, quando não especificado, considera-se que a potência total disponível na ERB, P , assume valores de -10 a 40 dBm.

Além disso, foi assumido um cenário referido como Divisão de Energia Uniforme (UES, *Uniform Energy Splitting*), em que as amplitudes dos coeficientes de transmissão e de reflexão de todos elementos da STAR-RIS é a mesma, isto é, $\sqrt{\beta_m^t} = \sqrt{\beta^t}$ e $\sqrt{\beta_m^r} = \sqrt{\beta^r} \forall m \in \mathcal{M}$, sendo $0 \leq \sqrt{\beta^t}, \sqrt{\beta^r} \leq 1$ e $\beta^t + \beta^r = 1$ [5]. Por simplicidade, a partir daqui, as amplitudes dos coeficientes de transmissão e de reflexão serão referidas como β_t e β_r , respectivamente. Já os ajustes de fase destes coeficientes são resultados de um ajuste contínuo ótimo, ou seja, foram definidos de modo a compensar a fase dos canais, isto é, $\theta_k = -(-\angle \mathbf{v}_k + \angle \mathbf{g})$, em que $\theta_k \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ é o vetor de ajustes de fase dos coeficientes de transmissão, se $k = t$, e de reflexão, se $k = r$. A Tabela 4.1 resume os valores atribuídos aos parâmetros do sistema.

Tabela 4.1 – Parâmetros do Sistema

Parâmetro	Símbolo	Valor
Frequência de operação	f	3,5 GHz
Distância entre a ERB e a STAR-RIS	d_g	150 m
Distância mínima entre a ERB e os usuários	$d_{\min}$	1 m
Distância máxima entre a ERB e os usuários	$d_{\max}$	20 m
Largura de banda dos canais	B	1 MHz
Expoente de perda de percurso do canal entre a ERB e a STAR-RIS	η_g	3
Expoente de perda de percurso do canal entre a STAR-RIS e os usuários	η_t, η_r	2,5
Fator de Rice	K	3 dB
SNR limiar	γ_{th}	-10 dB
Número de elementos da STAR-RIS	M	64

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os resultados foram divididos em duas partes: a Seção 4.1 apresenta um estudo da variação de parâmetros da STAR-RIS, enquanto a Seção 4.2 traz uma análise comparativa entre a STAR-RIS e um esquema de referência baseado em RISs convencionais.

4.1 ANÁLISE DO DESEMPENHO DA STAR-RIS

A primeira análise está relacionada com os fatores de alocação de potência para os usuários de transmissão e de reflexão, α_t e α_r , e as amplitudes dos coeficientes de transmissão e de reflexão, β_t e β_r .

São considerados três esquemas de alocação de potência na estação rádio base para as informações dos usuários: um esquema de alocação fixa e igual para ambos os usuários, conhecida como Alocação Igual de Potência (EPA, *Equal Power Allocation*), e dois esquemas função das distâncias entre a STAR-RIS e os usuários de transmissão e de reflexão, d_t e d_r , isto é, $\alpha_t = 0,5$, $\alpha_t = d_t / (d_t + d_r)$ e $\alpha_t = d_r / (d_t + d_r)$, sendo $\alpha_t + \alpha_r = 1$.

Analogamente, também são considerados três esquemas de divisão de energia para os coeficientes de transmissão e de reflexão da superfície: um esquema de divisão fixo e igual, e dois esquemas função das distâncias entre a STAR-RIS e os usuários, isto é, $\beta_t = 0,5$, $\beta_t = d_t / (d_t + d_r)$ e $\beta_t = d_r / (d_t + d_r)$, sendo $\beta_t + \beta_r = 1$.

O desempenho da rede foi avaliado considerando as 9 combinações possíveis de pares (α_t, β_t) – ou (α_r, β_r) . Todos os pares estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Combinações de pares (α_t, β_t)

$\alpha_t = 0,5$	$\alpha_t = d_t / (d_t + d_r)$	$\alpha_t = d_r / (d_t + d_r)$
$\beta_t = 0,5$	$\beta_t = 0,5$	$\beta_t = 0,5$
$\beta_t = d_t / (d_t + d_r)$	$\beta_t = d_t / (d_t + d_r)$	$\beta_t = d_t / (d_t + d_r)$
$\beta_t = d_r / (d_t + d_r)$	$\beta_t = d_r / (d_t + d_r)$	$\beta_t = d_r / (d_t + d_r)$

Fonte: Elaborado pelo autor.

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 mostram, respectivamente, a SINR, a probabilidade de *outage* e a capacidade ergódica agregada em função da potência total disponível, P , para os 9 pares apresentados na Tabela 4.2 e os parâmetros descritos na Tabela 4.1. Para melhor visualização, tanto a SINR quanto a probabilidade de *outage* apresentadas são referentes ao usuário de transmissão, pois os resultados mostram que as curvas do usuário de reflexão coincidem.

Figura 4.1 – Relação Sinal-Interferência-Mais-Ruído em função da potência total disponível para diferentes fatores de alocação de potência para o usuário de transmissão (α_t) e amplitudes do coeficiente de transmissão (β_t)

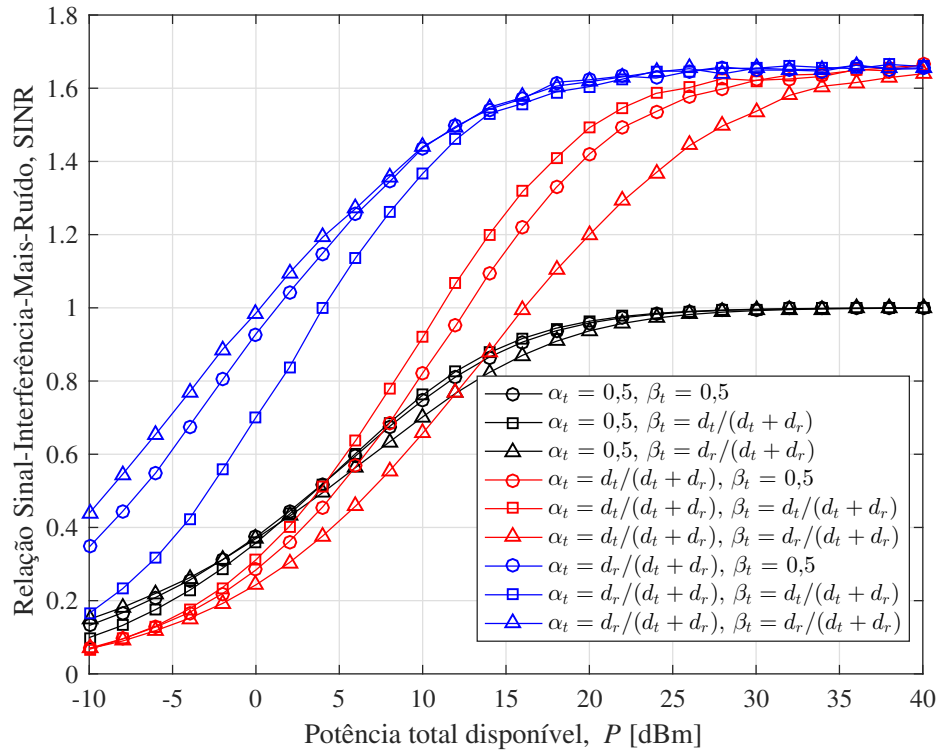


Figura 4.2 – Probabilidade de *outage* em função da potência total disponível para diferentes fatores de alocação de potência para o usuário de transmissão (α_t) e amplitudes do coeficiente de transmissão (β_t)

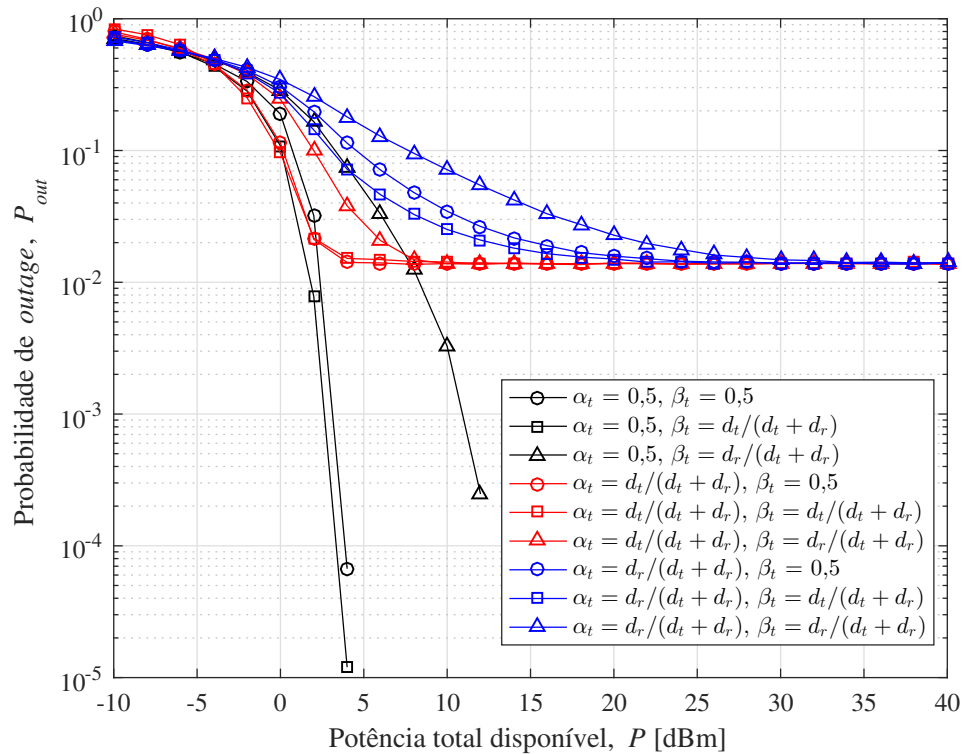
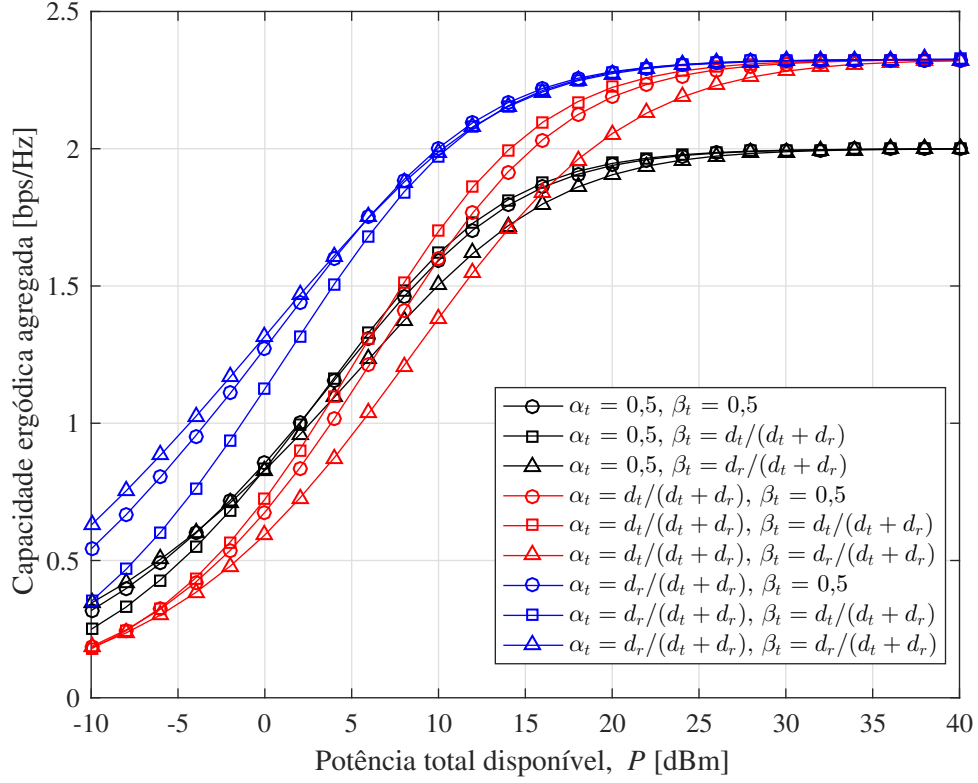


Figura 4.3 – Capacidade ergódica agregada em função da potência total disponível para diferentes fatores de alocação de potência para o usuário de transmissão (α_t) e amplitudes do coeficiente de transmissão (β_t)



A partir da Figura 4.1 observa-se um comportamento de saturação da SINR para alta SNR transmitida, $\gamma = \frac{P}{\sigma_n^2}$. Isso é esperado pois, para alta SNR, a expressão da SINR, dada em (3.3), resume-se a uma razão constante, função dos fatores de alocação de potência α_t e α_r :

$$\begin{aligned} \lim_{\gamma \rightarrow \infty} (\gamma_k) &= \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \left(\frac{\alpha_k |\mathbf{v}_k^H \boldsymbol{\Theta}_k \mathbf{g}|^2}{\alpha_{\bar{k}} |\mathbf{v}_k^H \boldsymbol{\Theta}_k \mathbf{g}|^2 + \frac{1}{\gamma}} \right) \\ &= \frac{\alpha_k}{\alpha_{\bar{k}}}, \end{aligned} \quad (4.1)$$

em que $\bar{k} = r$, se $k = t$ e $\bar{k} = t$, se $k = r$.

Quando o fator de alocação de potência do usuário de transmissão é igual a 0,5, isto é, $\alpha_t = 0,5$, tem-se $\lim_{\gamma \rightarrow \infty} (\gamma_k) = 1$, valor que pode ser observado na Figura 4.1 para alta SNR. Já para os esquemas de alocação de potência em função das distâncias, isto é, para $\alpha_t = d_t / (d_t + d_r)$ e $\alpha_t = d_r / (d_t + d_r)$, (4.1) resume-se a uma razão função das distâncias entre a STAR-RIS e os usuários: $\lim_{\gamma \rightarrow \infty} (\gamma_k) = d_k / d_{\bar{k}}$. Seja $x = d_k$ e $y = d_{\bar{k}}$. Como as distâncias entre a STAR-RIS e os usuários são variáveis aleatórias uniformes e independentes, a PDF conjunta entre elas é igual ao produto entre as PDFs individuais, isto é, $f_{d_k, d_{\bar{k}}}(x, y) = f_{d_k}(x) \cdot f_{d_{\bar{k}}}(y) = \left(\frac{1}{d_{\max} - d_{\min}} \right)^2$ e, portanto, a SINR média do usuário U_k , $k \in \{t, r\}$, para alta SNR, pode ser calculada como:

$$\begin{aligned}
E[\gamma_k] &\simeq \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \frac{x}{y} f_{d_k, d_{\bar{k}}}(x, y) dx dy \\
&= \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \frac{x}{y} \left(\frac{1}{d_{\max} - d_{\min}} \right)^2 dx dy \\
&= \frac{1}{2} \left(\frac{1}{d_{\max} - d_{\min}} \right)^2 [(d_{\max})^2 - (d_{\min})^2] [\ln(d_{\max}) - \ln(d_{\min})], \tag{4.2}
\end{aligned}$$

em que $\simeq$ significa equivalência assintótica, ou seja, representa a equivalência em regime de alta SNR, isto é, para $\gamma \rightarrow \infty$.

Fazendo $d_{\max} = 20$ m e $d_{\min} = 1$ m em (4.2), tem-se $E[\gamma_k] \approx 1.655$, que é o valor observado na Figura 4.1 em regime de alta SNR.

Já a partir da Figura 4.2, nota-se que, para alta SNR, a probabilidade de *outage* dos casos em que $\alpha_t = 0,5$ não satura como a probabilidade de *outage* dos casos em que α_t é função das distâncias. Isto é explicado pelo fato de a probabilidade de *outage* depender do limiar determinado; neste caso, $\gamma_{\text{th}} = -10$ dB. Portanto, quando $\alpha_t = 0.5$, para alta SNR, como a SINR é igual a 1, ou seja, $\lim_{\gamma \rightarrow \infty} (\gamma_k) = 1$, o sistema não entra em *outage*, isto é, a probabilidade de *outage* é exatamente igual a 0.

Enquanto isso, a saturação observada na probabilidade de *outage* para os casos em que α_t é função das distâncias pode ser explicada resolvendo (3.4) para alta SNR, isto é, para $\gamma_k = d_k/d_{\bar{k}}$, de modo que se tenha, para o usuário $U_k, k \in \{t, r\}$:

$$\begin{aligned}
P_{\text{out},k} &= \Pr(\gamma_k < \gamma_{\text{th}}) \\
&\simeq \Pr\left(\frac{d_k}{d_{\bar{k}}} < \gamma_{\text{th}}\right) \\
&= \Pr(d_k < \gamma_{\text{th}} d_{\bar{k}}). \tag{4.3}
\end{aligned}$$

Seja $x = d_k$ e $y = d_{\bar{k}}$. A expressão (4.3) pode ser resolvida a partir da Função de Distribuição Cumulativa (CDF, *Cumulative Distribution Function*) de d_k , $F_{d_k}(x)$, para $x = \gamma_{\text{th}}y$, e da PDF de $d_{\bar{k}}$, $f_{d_{\bar{k}}}(y)$, isto é:

$$P_{\text{out},k} = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} F_{d_k}(\gamma_{\text{th}}y) f_{d_{\bar{k}}}(y) dy, \tag{4.4}$$

em que:

$$F_{d_k}(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x < d_{\min}, \\ \frac{x - d_{\min}}{d_{\max} - d_{\min}} & \text{se } d_{\min} \leq x < d_{\max}, \\ 1 & \text{se } x \geq d_{\max}. \end{cases} \tag{4.5}$$

Fazendo $d_{\max} = 20$ m e $d_{\min} = 1$ m em (4.4), tem-se $P_{\text{out},k} \approx 0.0138$, que é o valor observado na Figura 4.2 em regime de alta SNR.

Por fim, a partir da Figura 4.3, observa-se que a capacidade ergódica agregada também apresenta comportamento de saturação em regime de alta SNR. Assim como a SINR, isso é esperado pois, para alta SNR, a capacidade agregada instantânea, dada em (3.6), resume-se a uma expressão que também é função dos fatores de alocação de potência α_t e α_r :

$$\begin{aligned} \lim_{\gamma \rightarrow \infty} (C_{\text{agregada}}) &= \lim_{\gamma \rightarrow \infty} \left\{ \sum_{k \in \{t,r\}} \left[\log_2 \left(1 + \left(\frac{\alpha_k |\mathbf{v}_k^H \boldsymbol{\Theta}_k \mathbf{g}|^2}{\alpha_{\bar{k}} |\mathbf{v}_k^H \boldsymbol{\Theta}_k \mathbf{g}|^2 + \frac{1}{\gamma}} \right) \right) \right] \right\} \\ &= \sum_{k \in \{t,r\}} \left[\log_2 \left(1 + \frac{\alpha_k}{\alpha_{\bar{k}}} \right) \right], \end{aligned} \quad (4.6)$$

em que $\bar{k} = r$, se $k = t$ e $\bar{k} = t$, se $k = r$.

Quando o fator de alocação de potência do usuário de transmissão é igual a 0,5, isto é, $\alpha_t = 0,5$, $\lim_{\gamma \rightarrow \infty} (C_{\text{agregada}}) = 2$, valor que pode ser observado na Figura 4.3 para alta SNR. Já para os casos em que α_t é função das distâncias, isto é, para $\alpha_t = d_t / (d_t + d_r)$ e $\alpha_r = d_r / (d_t + d_r)$, (4.6) resume-se a $\lim_{\gamma \rightarrow \infty} (C_{\text{agregada}}) = \sum_{k \in \{t,r\}} \left[\log_2 \left(1 + \frac{d_k}{d_{\bar{k}}} \right) \right]$. Assim como feito para a SINR média, como as distâncias entre a STAR-RIS e os usuários são variáveis aleatórias uniformes e independentes, a capacidade ergódica agregada para alta SNR pode ser calculada a partir da PDF conjunta de d_k e $d_{\bar{k}}$, ou seja:

$$\begin{aligned} E[C_{\text{agregada}}] &\simeq \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \left[\log_2 \left(1 + \frac{x}{y} \right) + \log_2 \left(1 + \frac{y}{x} \right) \right] f_{d_k, d_{\bar{k}}}(x, y) dx dy \\ &= \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \left[\log_2 \left(1 + \frac{x}{y} \right) + \log_2 \left(1 + \frac{y}{x} \right) \right] \left(\frac{1}{d_{\max} - d_{\min}} \right)^2 dx dy. \end{aligned} \quad (4.7)$$

Fazendo $d_{\max} = 20$ m e $d_{\min} = 1$ m em (4.7), tem-se $E[C_{\text{agregada}}] \approx 2.3257$, que é o valor observado na Figura 4.3 em regime de alta SNR.

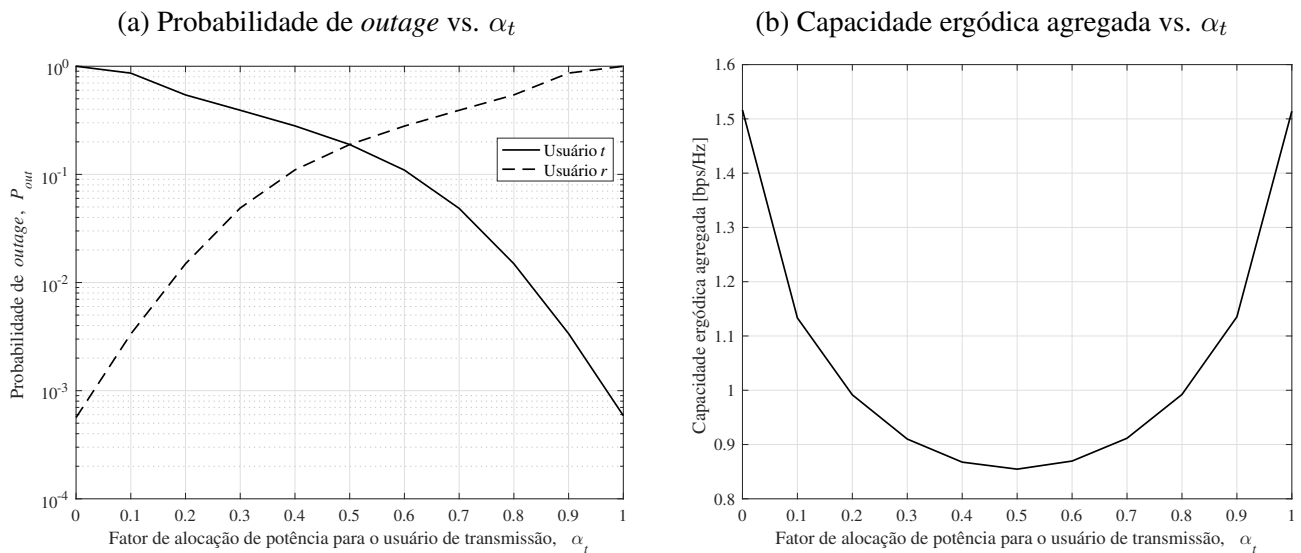
Outra conclusão que se pode tirar desta análise é que, em geral, enquanto o tipo de esquema de alocação de potência da ERB para os usuários (α_t e α_r) tem grande impacto nos resultados, o tipo de esquema de divisão de energia para os coeficientes de transmissão e de reflexão (β_t e β_r), não. Como pode ser observado nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, para dado esquema de α_t , os resultados não variam muito entre os três esquemas de β_t . Por outro lado, para dado esquema de β_t , observa-se que os resultados tem variação significativa entre os três esquemas de α_t .

Ainda, para dado esquema de β_t , em regime de baixa SNR, conclui-se que, em termos de SINR e capacidade ergódica agregada, o esquema $\alpha_t = d_r / (d_t + d_r)$ é o que apresenta melhor desempenho. Esta alocação é função de d_r , ou seja, o fator de alocação de potência para o usuário de transmissão é proporcional a distância entre a STAR-RIS e o usuário de reflexão. Uma possível explicação para isso vem do conceito de “*water-filling*”, em que uma maior quantidade de potência é destinada quando as condições do canal são favoráveis e uma menor quando não [13]. Isso significa que, em um cenário em que o usuário de transmissão está mais próximo da STAR-RIS que o usuário de reflexão, por exemplo, o usuário de transmissão recebe maior parte da potência disponível, pois sua condição é mais favorável que a do usuário de reflexão, mais distante.

Além disso, em geral, conclui-se que os casos em que α_t é função das distâncias apresentam melhor comportamento com relação a SINR e a capacidade ergódica agregada, mas apresentam probabilidades de *outage* maiores. Os casos que apresentam menor probabilidade de *outage* são aqueles em que α_t tem alocação fixa e igual de potência, embora a SINR e a capacidade ergódica agregada apresentem resultados inferiores. Tem-se, então, uma situação de *trade-off*.

Em seguida, foi realizada uma análise do efeito da variação do fator de alocação de potência para o usuário de transmissão, α_t , considerando alocações fixas de 0 a 1. A Figura 4.4 apresenta a probabilidade de *outage* de ambos os usuários e a capacidade ergódica agregada da STAR-RIS em função de α_t , para $\beta_t = 0,5$ e $P = 0$ dBm. A partir dela, conclui-se que os valores de α_t que resultam nas maiores capacidades ergódica agregada são aqueles próximos das extremidades, ou seja, próximos de 0 e 1. No entanto, nestes pontos, a probabilidade de *outage* não é adequada: enquanto um dos usuários tem probabilidade de *outage* mínima, o outro está completamente em *outage*. Portanto, o valor de α_t mais adequado é aquele que resulta em uma probabilidade de *outage* satisfatória para ambos os usuários, ou seja, $\alpha_t = 0,5$, embora este valor retorne a capacidade ergódica agregada mínima.

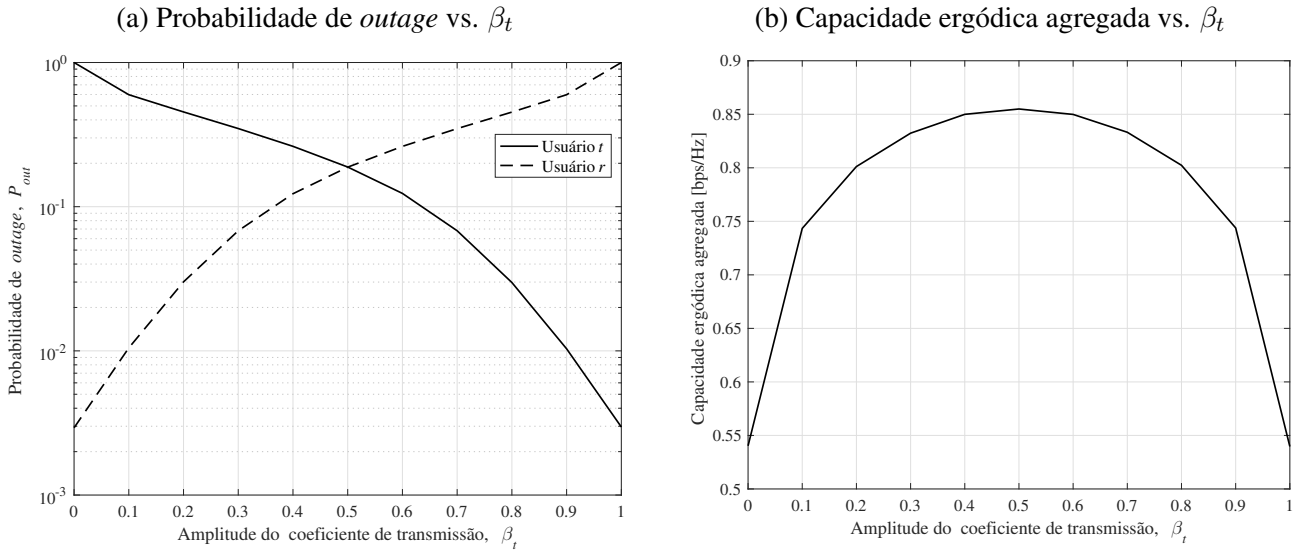
Figura 4.4 – Desempenho da STAR-RIS em função do fator de alocação de potência para o usuário de transmissão (α_t), para $\beta_t = 0,5$ e $P = 0$ dBm



Fonte: Elaborado pelo autor.

De maneira análoga, o efeito da variação da amplitude do coeficiente de transmissão, β_t , também foi analisado, considerando valores fixos de 0 a 1. A probabilidade de *outage* de ambos os usuários e a capacidade ergódica agregada da STAR-RIS em função de β_t , para $\alpha_t = 0,5$ e $P = 0$ dBm, estão apresentadas na Figura 4.5. A partir dela, observa-se que tanto a probabilidade de *outage* quanto a capacidade ergódica agregada apresentam o resultado mais satisfatório para $\beta_t = 0,5$. Este comportamento difere daquele observado na Figura 4.4 porque, naquele caso, apesar da probabilidade de *outage* apresentar melhor resultado para $\alpha_t = 0,5$, neste ponto, a capacidade ergódica atinge seu valor mínimo.

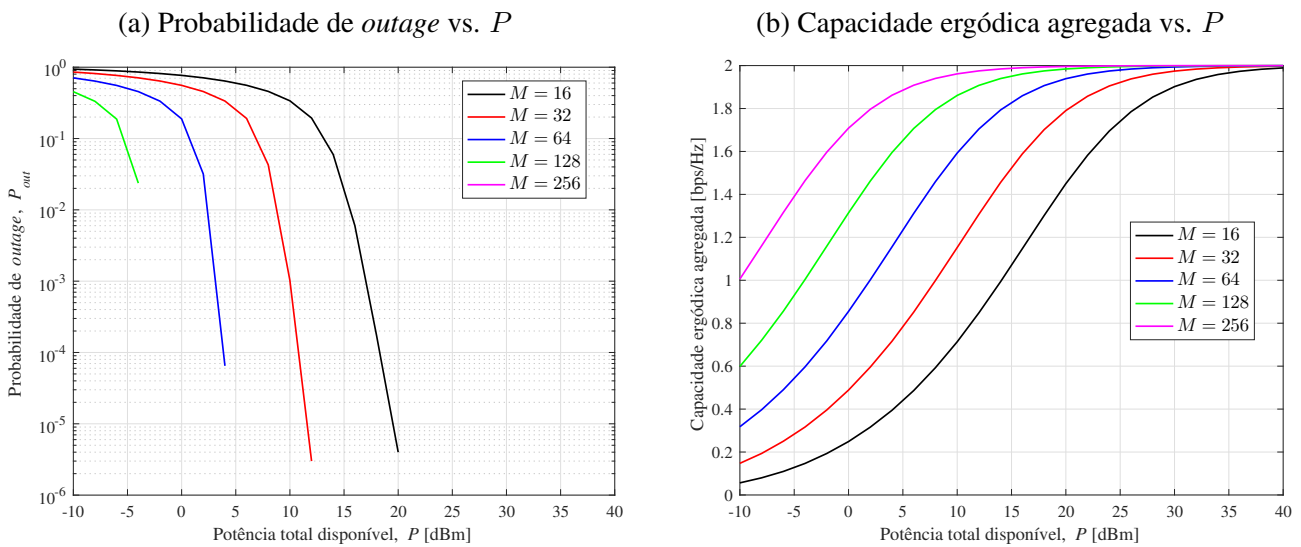
Figura 4.5 – Desempenho da STAR-RIS em função da amplitude do coeficiente de transmissão (β_t), para $\alpha_t = 0,5$ e $P = 0$ dBm



Fonte: Elaborado pelo autor.

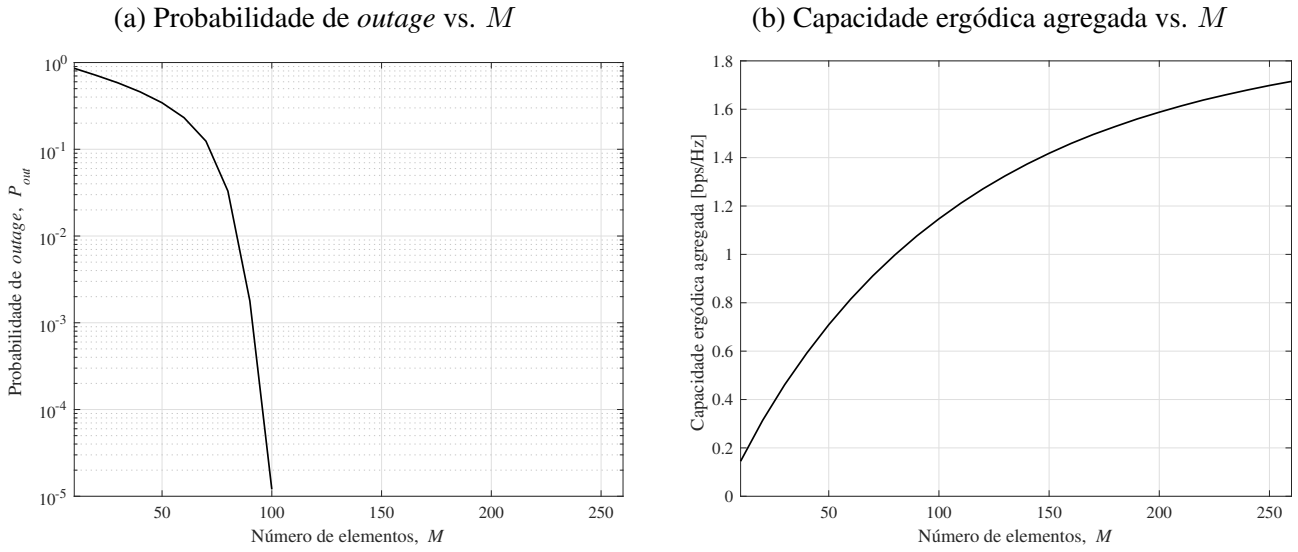
Por fim, foi avaliado o efeito da variação do número de elementos com capacidade de transmissão e de reflexão simultâneas, M , no comportamento do sistema. A Figura 4.6 apresenta o desempenho do sistema em função da potência total disponível, P , para $M = 16, 32, 64, 128$ e 256 , enquanto a Figura 4.7 apresenta o desempenho do sistema em função de M para $P = 0$ dBm; neste caso, foram considerados valores de M entre 10 e 260. Além disso, para ambas, $\alpha_t = \beta_t = 0,5$. Para melhor visualização, as probabilidades de *outage* apresentadas são referentes ao usuário de transmissão, pois os resultados mostram que as curvas do usuário de reflexão coincidem.

Figura 4.6 – Desempenho da STAR-RIS em função da potência total disponível para $\alpha_t = \beta_t = 0,5$ e $M = 16, 32, 64, 128$ e 256



Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 4.7 – Desempenho da STAR-RIS em função do número de elementos para $\alpha_t = \beta_t = 0,5$ e $P = 0$ dBm



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Figura 4.6, conclui-se que, conforme o valor de M aumenta, menor a potência total disponível necessária para um desempenho satisfatório, o que leva a economia energética e de custos. Para $M = 128$, por exemplo, o sistema apresenta probabilidade de *outage* nula em $P = -4$ dBm e atinge a capacidade ergódica agregada máxima em torno de $P = 20$ dBm, enquanto que, para $M = 64$, o sistema apresenta probabilidade de *outage* nula em $P = 4$ dBm e atinge a capacidade ergódica agregada máxima em torno de $P = 25$ dBm. Além disso, nota-se, a partir da Figura 4.6a, que o número de iterações definido não foi suficiente para determinar com precisão a probabilidade de *outage* para $M = 256$; no gráfico, ela é nula para todas as potências avaliadas.

A Figura 4.7, por sua vez, permite constatar que, dada uma baixa potência fixa, $P = 0$ dBm, tanto a probabilidade de *outage* quanto a capacidade ergódica agregada melhoram conforme o número de elementos aumenta.

4.2 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A STAR-RIS E O ESQUEMA DE REFERÊNCIA

A fim de verificar a efetividade do modelo de sistema assistido por uma STAR-RIS apresentado no Capítulo 3, propõe-se um esquema de referência, composto por duas RISs convencionais de $M/2$ elementos cada, situadas lado a lado e atendidas pela mesma ERB; portanto, ao todo, o esquema de referência é composto por M elementos refletivos. Cada uma das superfícies, chamadas de RIS 1 e RIS 2, é responsável por assistir um usuário de reflexão, localizado na frente delas. Portanto, neste cenário, há quatro canais: dois canais entre a ERB e cada superfície e outros dois entre cada superfície e seu respectivo usuário. A potência disponível na ERB é dividida a partir de dois fatores de alocação de potência: α_1 para o usuário da RIS 1 e α_2 para o usuário da RIS 2, sendo $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$. Além disso, como se tratam de RISs somentes refletivas, todo o sinal incidente em um elemento é refletido para o usuário com amplitude $\beta = 1$. Demais parâmetros e características são iguais aos do esquema com STAR-RIS.

Para o esquema com STAR-RIS, foram considerados os três esquemas de alocação de potência da ERB para os usuários apresentados na Seção 4.1, isto é, $\alpha_t = 0,5$, $\alpha_t = d_t / (d_t + d_r)$ e $\alpha_t = d_r / (d_t + d_r)$, sendo $\alpha_t + \alpha_r = 1$, e $\beta_t = 0,5$. Já para o esquema de referência, foram considerados três esquemas semelhantes de alocação de potência da ERB para os usuários das RIS 1 e 2: um esquema de alocação fixo e igual, e dois esquemas função das distâncias entre cada uma das RISs e seus usuários, d_1 e d_2 , isto é, $\alpha_1 = 0,5$, $\alpha_1 = d_1 / (d_1 + d_2)$ e $\alpha_1 = d_2 / (d_1 + d_2)$, sendo $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$.

As Figuras 4.8, 4.9 e 4.10 mostram, respectivamente, a SINR, a probabilidade de *outage* e a capacidade ergódica agregada em função da potência total disponível do esquema de referência descrito e do esquema com STAR-RIS. Para melhor visualização, tanto a SINR quanto a probabilidade de *outage* apresentadas são referentes a apenas um usuário de cada esquema, pois os resultados mostram que as curvas do outro usuário coincidem.

Neste caso, o que se conclui é que, em regime de baixa SNR, o esquema com STAR-RIS apresenta melhor desempenho tanto com relação a probabilidade de *outage* quanto a capacidade ergódica agregada para as três alocações de α_t . Já em regime de alta SNR, o comportamento do esquema de referência é igual ao comportamento do esquema com STAR-RIS, analisado na Seção 4.2: a SINR e a capacidade ergódica agregada apresentam um comportamento de saturação que é maior e igual quando α_t e α_1 são funções das distâncias, enquanto a probabilidade de *outage* é mais adequada para os casos em que $\alpha_t = \alpha_1 = 0,5$.

Figura 4.8 – Relação Sinal-Interferência-Mais-Ruído em função da potência total disponível para a STAR-RIS e o esquema de referência considerando diferentes fatores de alocação de potência

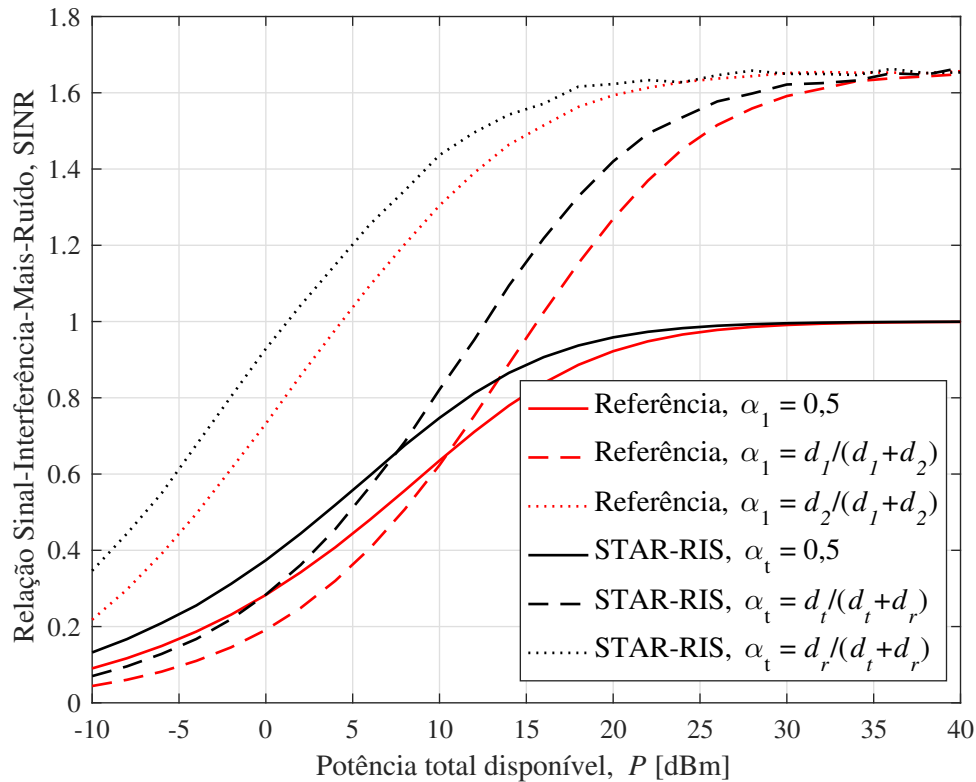
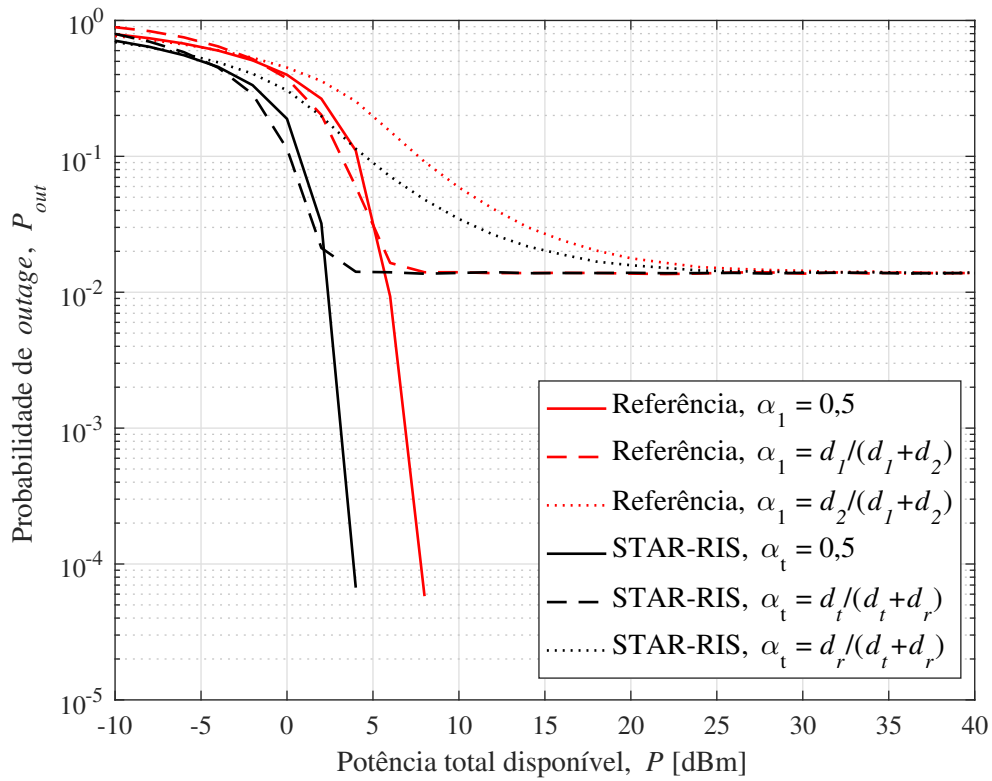
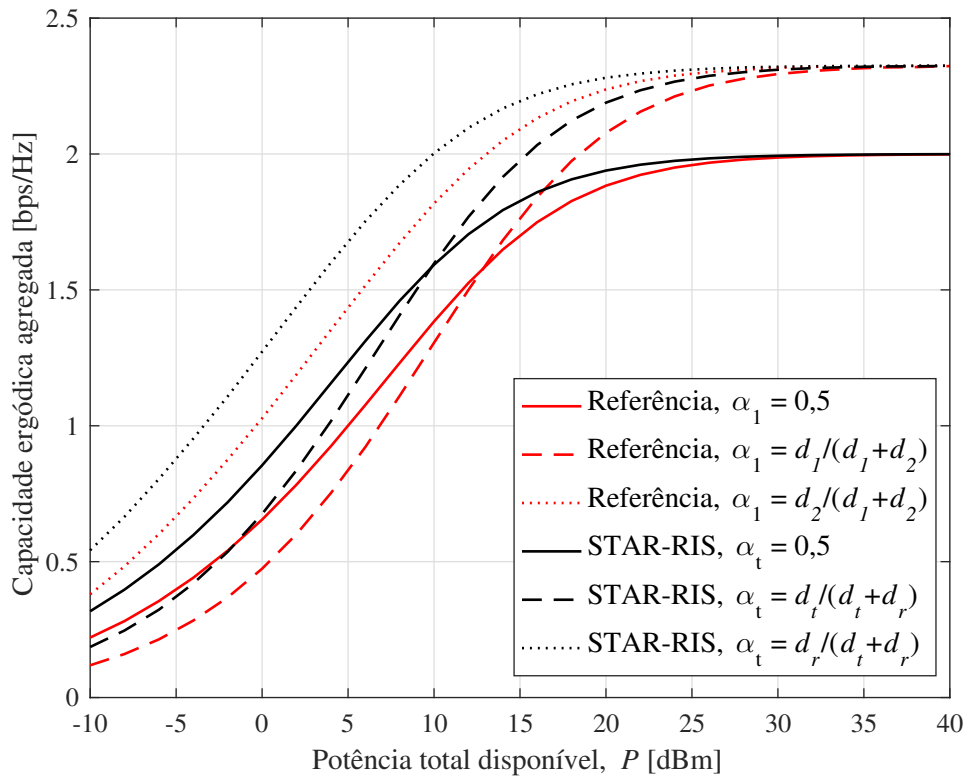


Figura 4.9 – Probabilidade de *outage* em função da potência total disponível para a STAR-RIS e o esquema de referência considerando diferentes fatores de alocação de potência



Fonte: Elaborado pelo autor.

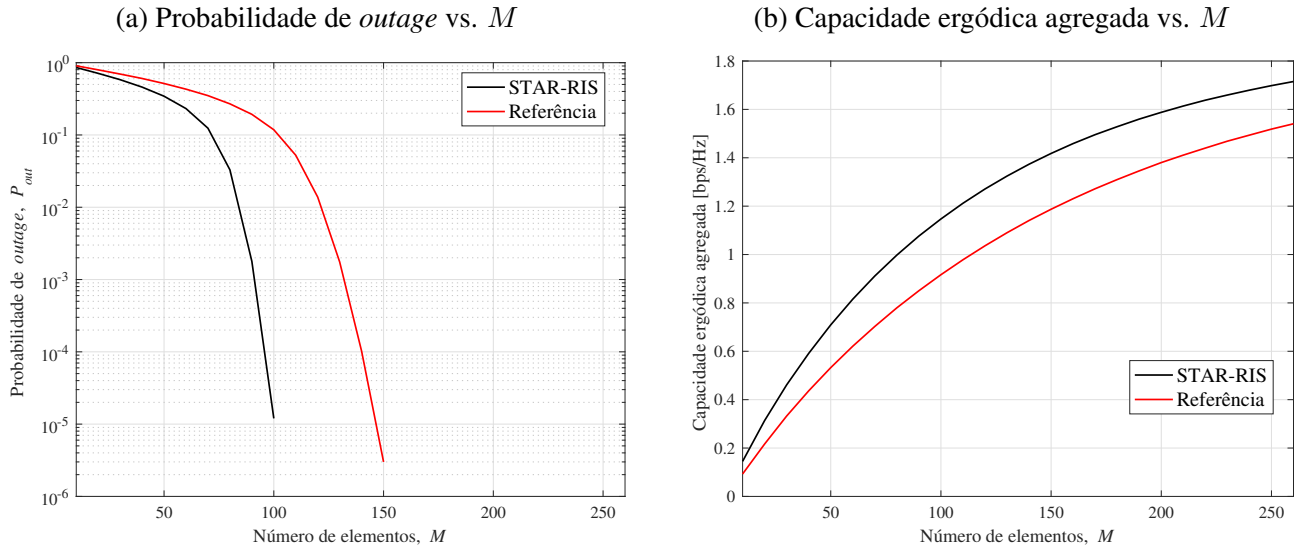
Figura 4.10 – Capacidade ergódica agregada em função da potência total disponível para a STAR-RIS e o esquema de referência, considerando diferentes fatores de alocação de potência



Fonte: Elaborado pelo autor.

Por fim, foi avaliado o efeito da variação do número de elementos, M , no desempenho do esquema de referência em comparação ao da STAR-RIS. A Figura 4.11 apresenta a probabilidade de *outage* e a capacidade ergódica agregada tanto do esquema de referência quanto do esquema com STAR-RIS em função de M , considerando $\alpha_t = \alpha_1 = 0,5$ e $P = 0$ dBm. De novo, para melhor visualização, a probabilidade de *outage* apresentada é referente a apenas um usuário de cada esquema, pois os resultados mostram que as curvas do outro usuário coincidem.

Figura 4.11 – Desempenho da STAR-RIS e do esquema de referência em função do número de elementos para $\alpha_t = \alpha_1 = 0,5$ e $P = 0$ dBm



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da Figura 4.11, constata-se que, conforme M aumenta, melhor é o desempenho tanto do esquema de referência quanto do esquema com STAR-RIS. Além disso, dada uma baixa potência total disponível, $P = 0$ dBm, o desempenho da STAR-RIS é superior ao do esquema de referência para todos os valores atribuídos para M .

O capítulo a seguir finaliza este trabalho sintetizando as conclusões obtidas ao longo do mesmo.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foi avaliado o desempenho de uma rede sem fio baseada em STAR-RIS a partir do protocolo ES, considerando um cenário de dois usuários: um na região de transmissão e outro na região de reflexão. Para tal, foram consideradas as métricas probabilidade de *outage* e capacidade ergódica, obtidas a partir da implementação do método de Monte Carlo. Foram considerados três esquemas de alocação de potência na estação rádio base para as informações dos usuários, três esquemas de divisão de energia para os coeficientes de transmissão e de reflexão e parâmetros como o número de elementos da STAR-RIS.

A partir dos resultados obtidos, concluiu-se que, em regime de baixa SNR, o sistema apresenta melhor desempenho em termos de capacidade ergódica agregada quando a alocação de potência do usuário de transmissão (ou de reflexão) é proporcional a distância entre a superfície e o usuário de reflexão (ou de transmissão). Isso pode ser explicado pelo conceito de “*water-filling*”, em que uma maior quantidade de potência é destinada para os canais com condições mais favoráveis, e menor para os canais mais desfavorecidos. Por outro lado, este esquema de alocação de potência agrava a probabilidade de *outage* quando comparado com o esquema de alocação fixa e igual. Em regime de alta SNR, é observado um comportamento de saturação para os três esquemas de α_t , com exceção da probabilidade de *outage* para $\alpha_t = 0,5$. A capacidade ergódica agregada é maior para os casos em que α_t é função das distâncias quando comparado ao caso em que α_t tem alocação fixa e igual, mas a probabilidade de *outage* é melhor para $\alpha_t = 0,5$.

Em relação aos esquemas de divisão de energia para os coeficientes de transmissão e de reflexão, β_t e β_r , concluiu-se que, em geral, os esquemas função das distâncias pouco alteram o desempenho do sistema em relação ao esquema de divisão igual. Portanto, por simplicidade de implementação, pode-se dizer que a divisão fixa é mais adequada.

Além disso, constatou-se que o desempenho do sistema melhora conforme o número de elementos da STAR-RIS aumenta. Quanto maior o valor de M , menor a potência total disponível que resulta em uma SNR adequada.

Por fim, foi averiguado que, em regime de baixa SNR, o esquema com STAR-RIS apresenta melhor desempenho em comparação ao esquema de referência proposto, baseado em RISs convencionais, confirmando a sua utilidade em sistemas de comunicação sem fio. Para alta SNR, o esquema de referência apresenta um comportamento de saturação igual ao observado para o esquema com STAR-RIS.

Para trabalhos futuros, sugere-se a avaliação do cenário apresentado considerando uma ERB de mais antenas e a investigação do problema de minimização do consumo de potência necessário para a otimização conjunta da formação de feixe ativo na ERB e da formação de feixe passivo para transmissão e reflexão na STAR-RIS.

REFERÊNCIAS

- 1 RADIOCOMMUNICATION SECTOR OF ITU. **Recommendation ITU-R M.2083-0: IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond.** Geneva, 2015.
- 2 ANATEL. **5G completa um ano de implantação no Brasil.** 2023. [Online]. Disponível em: <<https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/5g-completa-um-ano-de-implantacao-no-brasil>>.
- 3 G1. **Operadoras lançam primeira experiência do 5G no Brasil, mas serviço ainda é limitado.** 2020. [Online]. Disponível em: <<https://g1.globo.com/economia/tecnologia/noticia/2020/07/18/operadoras-lancam-primeira-experiencia-do-5g-no-brasil-mas-servico-ainda-e-limitado.ghtml>>.
- 4 G1. **Após 1 ano, 128 celulares são compatíveis com 5G; veja lista completa.** 2023. [Online]. Disponível em: <<https://g1.globo.com/tecnologia/noticia/2023/07/07/lista-de-celulares-compativeis-com-5g-cresce-apos-1-ano-confira.ghtml>>.
- 5 MU, X. et al. Simultaneously Transmitting and Reflecting (STAR) RIS Aided Wireless Communications. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 21, n. 5, p. 3083–3098, 2022.
- 6 WU, Q.; ZHANG, R. Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network. **IEEE Communications Magazine**, v. 58, n. 1, p. 106–112, 2020.
- 7 XU, J. et al. STAR-RISs: Simultaneous Transmitting and Reflecting Reconfigurable Intelligent Surfaces. **IEEE Communications Letters**, v. 25, n. 9, p. 3134–3138, 2021.
- 8 DOCOMO, N. **DOCOMO Conducts World’s First Successful Trial of Transparent Dynamic Metasurface.** 2020. [Online]. Disponível em: <https://www.docomo.ne.jp/english/info/media_center/pr/2020/0117_00.html>.
- 9 REN, Y. et al. Secrecy Communication for Simultaneous Transmission and Reflection (STAR) RIS Aided Systems With Multiple Eavesdroppers. In: **2023 IEEE 34th Annual International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC)**. [S.l.: s.n.], 2023. p. 1–6.
- 10 WANG, C. et al. STAR-RIS-Enabled Secure Dual-Functional Radar-Communications: Joint Waveform and Reflective Beamforming Optimization. **IEEE Transactions on Information Forensics and Security**, v. 18, p. 4577–4592, 2023.
- 11 YASWANTH, J. et al. Joint Beamforming Design for STAR-RIS-Aided MU-MIMO System with SWIPT. In: **2023 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)**. [S.l.: s.n.], 2023. p. 574–579.
- 12 GHADI, F. R.; LÓPEZ-MARTINEZ, F. J.; WONG, K.-K. Analytical Characterization of Coverage Regions for STAR-RIS-Aided NOMA/OMA Communication Systems. **IEEE Communications Letters**, v. 27, n. 11, p. 3063–3067, 2023.
- 13 GOLDSMITH, A. **Wireless Communication.** Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2005.
- 14 RAPPAPORT, T. S.; VIEIRA, D.; ALBINI, L. C. P. **Comunicações sem fio: princípios e práticas.** 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2009. ISBN 9788576051985.

- 15 SIMON, M. K.; ALOUINI, M.-S. **Digital Communication over Fading Channels**. 2. ed. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2005. ISBN 9780471715221.
- 16 OLIVO, E. E. B. **Disciplina Comunicações Móveis Avançadas**. 2023. Material Didático. Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia - Campus de São João da Boa Vista.
- 17 LIASKOS, C. et al. A New Wireless Communication Paradigm through Software-Controlled Metasurfaces. **IEEE Communications Magazine**, v. 56, n. 9, p. 162–169, 2018.
- 18 LIU, Y. et al. STAR: Simultaneous Transmission and Reflection for 360° Coverage by Intelligent Surfaces. **IEEE Wireless Communications**, v. 28, n. 6, p. 102–109, 2021.