

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

EDUARDO GONÇALVES GOMES

**Avaliação de desempenho de sistemas de comunicação sem fio assistidos por superfícies
inteligentes reconfiguráveis em canais com desvanecimento Nakagami-*m***

São João da Boa Vista

2021

Eduardo Gonçalves Gomes

Avaliação de desempenho de sistemas de comunicação sem fio assistidos por superfícies inteligentes reconfiguráveis em canais com desvanecimento Nakagami- m

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

2021

G633a

Gomes, Eduardo Gonçalves

Avaliação de desempenho de sistemas de comunicação sem fio assistidos por superfícies inteligentes reconfiguráveis em canais com desvanecimento Nakagami-m / Eduardo Gonçalves Gomes. -- São João da Boa Vista, 2021
41 p. : il., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Câmpus Experimental de São João da Boa Vista, 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 do Câmpus Experimental de São João da Boa Vista. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE SÃO JOÃO DA BOA VISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELETRÔNICA
E DE TELECOMUNICAÇÕES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE SISTEMAS DE COMUNICAÇÃO SEM FIO
ASSISTIDOS POR SUPERFÍCIES INTELIGENTES RECONFIGURÁVEIS EM CANAIS
COM DESVANECIMENTO NAKAGAMI-M

Aluno: Eduardo Gonçalves Gomes

Orientador: Prof Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo

Banca Examinadora:

- Prof. Dr. Edgar Eduardo Benitez Olivo (Orientador)
- Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel (Examinador)
- Prof. Dr. Reginaldo Nunes de Souza (Examinador)

A ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se no prontuário do aluno
(Expediente nº 092/2021)

São João da Boa Vista , 17 de dezembro de 2021

Dedico este trabalho aos meus pais, Carlos e Lúcia, a minha irmã Sofia e ao meu grande amor Milene, por sempre estarem ao meu lado, me dando forças e me motivando a seguir em frente ao longo de toda a graduação.

AGRADECIMENTOS

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

Agradeço também a minha namorada, Milene, por sempre estar me dando forças para conseguir caminhar, principalmente nesses últimos momentos, onde foi necessário muito esforço, dedicação e paciência.

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

Também gostaria de agradecer aos membros da banca, Prof. Dr. Rafael Abrantes Penchel e o Prof. Dr. Reginaldo Nunes de Souza, pela disposição e tempo dedicado para a leitura deste trabalho. Agradeço previamente os comentários e sugestões sobre este trabalho.

Gostaria de agradecer o apoio financeiro correspondente à bolsa de iniciação científica concedida sob processo 2019/19935-6, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), durante o período de fevereiro/2020 a janeiro/2021. Os resultados obtidos nessa pesquisa foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Gostaria de agradecer todas as amigas formadas neste período durante a graduação, onde tive momentos de alegria, trocas de informação e inúmeras lembranças, tais lembranças que nunca irão sair de minha memória.

E por fim, agradeço a todos professores e funcionários que participaram desta trajetória ao longo dos anos.

RESUMO

Neste trabalho, o desempenho de uma rede sem fio assistida por superfícies inteligentes reconfiguráveis (RIS) é avaliado em termos da probabilidade de *outage* e da capacidade ergódica, considerando canais do tipo Nakagami- m . O modelo Nakagami- m permite caracterizar cenários onde o sinal viaja por m agrupamentos de multipercurso, e quando esses agrupamentos chegam ao receptor são somados e modelados por uma variável aleatória do tipo Nakagami- m . Nesse sistema, a RIS opera entre transmissor e receptor, retransmitindo o sinal proveniente do transmissor até o receptor. Tal sistema é considerado um modelo de comunicação de duplo salto, onde o primeiro salto ocorre entre transmissor-RIS e o segundo salto entre RIS-receptor. Três esquemas de deslocamento de fase para os elementos refletores da RIS são considerados: deslocamento ótimo de fase, deslocamento aleatório de fase e deslocamento quantizado de fase. O desempenho do sistema é avaliado por meio de simulações baseadas no método de Monte Carlo, considerando o impacto do número de elementos refletores e da posição da RIS entre transmissor e receptor, assim como o efeito do canal com desvanecimento. A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que o aumento do número de elementos da RIS melhora o desempenho dos três esquemas considerados. Observa-se também que, para o esquema de deslocamento aleatório de fase, o número m de agrupamentos de cada salto não altera o desempenho do sistema. Já para os outros dois esquemas, o parâmetro m tem influência em seu desempenho. Além disso, pode-se observar que o desempenho do sistema melhora quando a RIS é posicionada próxima ao transmissor ou receptor.

PALAVRAS-CHAVE: Superfícies Inteligentes Reconfiguráveis (RIS) . Nakagami- m . Probabilidade de *outage*. Capacidade Ergódica.

ABSTRACT

In this work, the performance of a wireless network assisted by reconfigurable intelligent surfaces (RIS) under Nakagami- m channels is assessed in terms of outage probability and ergodic capacity. The Nakagami- m model allows to characterize scenarios where the signal travels through m multipath clusters and when these clusters reach the receiver, they are added and modeled by a random variable Nakagami- m . In this system, a RIS operates between transmitter and receiver, retransmitting the signal from the transmitter to the receiver. Such a system is considered a double-hop communication model, where the first hop occurs between transmitter-RIS, while the second hop between RIS-receiver. Three phase shifting schemes for RIS reflector elements are considered: optimal phase shifting, random phase shifting, and quantized phase shifting. System performance is evaluated through simulations based on the Monte Carlo method, considering the impact of the number of reflective elements and the RIS position between transmitter and receiver, as well as the effect of the channel fading. From the results obtained, it can be observed that increasing the number of RIS elements improves the performance of the three schemes considered. It is also observed that, for the random phase shift scheme, the number m of clusters of each hop does not change the system performance. For the other two schemes, the parameter m has an influence on their performance. Furthermore, it can be seen that system performance improves when the RIS is placed close to the transmitter or receiver.

KEYWORDS: Reconfigurable Intelligent Surfaces (RIS). Nakagami- m . Outage Probability. Ergodic Capacity.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	PDF para um canal sujeito ao desvanecimento do tipo Rayleigh.	22
Figura 2	Modelo de canal de desvanecimento Nakagami- m	23
Figura 3	PDF para um canal sujeito ao desvanecimento Nakagami- m variando Ω ;	24
Figura 4	PDF para um canal sujeito ao desvanecimento Nakagami- m variando m	24
Figura 5	Modelo de canal na presença do RIS	26
Figura 6	Modelo do sistema	28
Figura 7	Probabilidade de <i>outage</i> vs. Potência transmitida para os modelos RPS e OPS, com $N = 16, 32$ e 64	32
Figura 8	Probabilidade de <i>outage</i> vs. Potência transmitida para os modelos OPS e QPS, com $N = 16, 32$ e 64 ; $b = 2$ e 3	33
Figura 9	Capacidade ergódica vs. Potência transmitida para os modelos RPS e OPS, com $N = 16, 32$ e 64 ;	34
Figura 10	Capacidade ergódica vs. Potência transmitida para os modelos OPS e QPS, com $N = 16, 32$ e 64 , $b = 2$ e 3	34
Figura 11	Probabilidade de <i>outage</i> vs. Potência transmitida para os modelos RPS, OPS e QPS para saltos desbalanceados	36
Figura 12	Capacidade ergódica vs. Potência transmitida para os esquemas RPS, OPS e QPS para saltos desbalanceados	37
Figura 13	Modelo co-linear Tx-RIS-Rx	37
Figura 14	Probabilidade de <i>outage</i> vs. Distância entre Tx-RIS para os esquemas RPS, OPS e QPS	38
Figura 15	Capacidade Ergódica vs. Distância entre Tx-RIS para os esquemas RPS, OPS e QPS	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros do sistema	31
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

5G	Quinta geração
6G	Sexta geração
AP	Ponto de Acesso (<i>Access Point</i>)
AF	Amplifica-e-Encaminha (<i>Amplify-and-Forward</i>)
BER	Taxa de Erro de Bit (<i>Bit Error Rate</i>)
BS	Estação Base (<i>Base Station</i>)
D2D	Dispositivo-a-Dispositivo (<i>Device-to-Device</i>)
EC	Capacidade ergódica
eMBB	Banda Larga Móvel melhorada (<i>enhanced Mobile Broadband</i>)
FD	<i>Full Duplex</i>
FTR	<i>Fluctating-Two-Ray</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>)
mMTC	Comunicação massiva do Tipo Máquina (<i>massive Machine Type Communication</i>)
mmWave	Ondas milimétricas (<i>Millimeter Wave</i>)
NLoS	Propagação sem linha de visada (<i>non-line-of-sight</i>)
OPS	Deslocamento Ótimo de fase <i>Optimal Phase Shifting</i>
PDF	Função Densidade de Probabilidade (<i>Probability Density Function</i>)
QPS	Deslocamento Quantizado de Fase (<i>Quantized Phase Shifting</i>)
RIS	Superfície Inteligente Reconfigurável (<i>Reconfigurable Intelligent Surface</i>)
RPS	Deslocamento Aleatório de Fase (<i>Random Phase Shifting</i>)
Rx	Receptor
SISO	Entra Única e Saída Única (<i>Single-input Single-output</i>)
SIMO	Entrada única e Múltiplas Saídas (<i>Single-input Multiple-Output</i>)

Tx	Transmissor
UDN	Rede ultra densa (<i>Ultra-Dense Network</i>)
URLLC	Comunicação Ultra Confiável e de Baixa Latência (<i>Ultra-Reliable and Low-Latency Communication</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Coeficiente de perda de percurso
b	Bits de quantização
B	Largura de banda do canal
d_0	Distância de referência
d	Distância entre transmissor e receptor
d_1	Distância entre TX e RIS
d_2	Distância entre RIS e Rx
f	Frequência de operação do sistema
λ	Comprimento de onda
G_l	Produto dos ganhos das antenas
γ_{OPS}	SNR fim-a-fim recebida no esquema OPS
γ_{RPS}	SNR fim-a-fim recebida no esquema RPS
γ	SNR recebida
γ_{th}	Limiar alvo de SNR
h	Coeficiente complexo de canal
$h_{1,n}$	Coeficiente de canal entre Tx e o n -ésimo elemento da RIS
$h_{2,n}$	Coeficiente de canal entre n -ésimo elemento da RIS e Rx
$ h_{1,n} $	Variável Aleatória do tipo Nakagami- m com parâmetros $(m_{1,n}, \Omega_{1,n})$
$ h_{2,n} $	Variável Aleatória do tipo Nakagami- m com parâmetros $(m_{2,n}, \Omega_{2,n})$
K_0	Constante das características da antena
m	Número de agrupamentos de multipercurso (<i>clusters</i>)
$m_{1,n}$	Número de agrupamentos do primeiro salto
$m_{2,n}$	Número de agrupamentos do segundo salto
N	Número de elementos da RIS
$N_{ruído}$	Potência do ruído

Ω	Ganho médio de canal
$\Omega_{1,n}$	Ganho médio do primeiro salto
$\Omega_{2,n}$	Ganho médio do segundo salto
P	Potência de transmissão
P_t	Potência transmitida
P_r	Potência recebida
P_{out}	Probabilidade de <i>outage</i> do sistema
ρ	SNR transmitida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Motivação	14
1.2	Trabalhos Relacionados	16
1.3	Organização do trabalho	17
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	19
2.1	Perda de percurso	19
2.2	Modelo simplificado de perda de percurso	20
2.3	Sombreamento	20
2.4	Desvanecimento de pequena escala	21
2.4.1	Desvanecimento do tipo Rayleigh	21
2.4.2	Desvanecimento do tipo Nakagami-m	22
2.5	Superfícies inteligentes reconfiguráveis (RIS)	25
2.6	Métricas de Desempenho	26
2.6.1	Probabilidade de <i>outage</i>	26
2.6.2	Capacidade Ergódica	27
3	MODELO DO SISTEMA	28
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
5	CONCLUSÕES	39
	REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo, será apresentado um contexto sobre comunicações sem fio atuais, apresentando algumas tecnologias, como também uma perspectivas para a próxima geração de redes sem fio, as redes de sexta geração (6G). Este capítulo será dividido nas seguintes seções: a Seção 1.1 apresenta a motivação deste trabalho, a Seção 1.2 apresenta trabalhos relacionados ao tema e a Seção 1.3 mostra a organização e estruturação do trabalho.

1.1 MOTIVAÇÃO

A tecnologia utilizada nas transmissões de redes sem fio precisa caminhar em um ritmo capaz de atender os requisitos das redes de quinta geração (5G)(que já estão sendo implementadas) e das redes de sexta geração 6G (que estão sendo estudadas e desenvolvidas). Os serviços demandados são altas taxas de dados, suporte a um número massivo de dispositivos conectados à rede e novos serviços multimídia (ELMOSSALLAMY et al., 2020).

As redes 5G, já implementadas em alguns lugares, devem atender os requisitos citados anteriormente e para isso, a União Internacional de Telecomunicações (ITU, *International Telecommunication Union*), estabeleceu que o desenvolvimento e aplicação dessas redes sejam baseadas em três serviços fundamentais, sendo eles: Banda Larga Móvel melhorada (eMBB, *enhanced Mobile Broadband*), que é responsável por maiores taxas de transmissão de dados; Comunicação massiva do Tipo Máquina (mMTC, *massive Machine Type Communication*) capaz de gerenciar e promover suporte a um massivo número de dispositivos em uma área limitada; e Comunicação Ultra Confiável e de Baixa Latência (URLLC, *Ultra-Reliable and Low-Latency Communication*) (SHAFI et al., 2017).

Algumas tecnologias trouxeram um grande avanço e facilitaram a implementação das redes 5G, como por exemplo a tecnologia MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*) massivo, redes ultradensas (UDN, *Ultra-Dense Network*), comunicações utilizando a faixa de frequência das ondas milimétricas (mmWave, *Millimeter Wave*), dentre outras. Contudo, a alta complexidade e o custo de hardware, bem como o aumento do consumo de energia, são questões cruciais que estão diretamente ligadas a essas tecnologias e que ainda continuam em foco nas pesquisas. Além disso, para algumas tecnologias como as redes UDN é necessário implantação de várias estações bases (BSs, *Base Stations*) e pontos de acesso (AP, *Access Points*) que geram alto custo de instalação e manutenção, além de agravar o problema de interferência na rede (WU et al., 2017).

Tais tecnologias conseguiram trazer um avanço para o cumprimento da demanda de tais serviços, porém, somente essas tecnologias não são suficientes para suportar, atender e entregar os serviços demandados de forma eficiente e eficaz. Por conta disso, as tecnologias que vem sendo utilizadas nas redes 5G devem perder espaço para novas tecnologias que estão em ascensão previstas para próxima geração das redes sem fio, o 6G. Por esse motivo, a comunidade científica vem estudando e desenvolvendo pesquisas para soluções melhorem a relação custo benéfico das redes sem fio (WU; ZHANG, 2020).

Com o intuito de contornar essas adversidades, as superfícies inteligentes reconfiguráveis (RIS, *Reconfigurable Intelligent Surface*), vem sendo consideradas para serem implementadas nas redes 6G. RIS é uma tecnologia composta de muitos elementos refletivos de baixo custo, que recentemente atraíram significativa atenção, devido à sua capacidade na manipulação de ondas eletromagnéticas (ZENG et al., 2021). Com essa tecnologia é possível realizar a reconfiguração do cenário de comunicação sem fio, com uso de vários elementos refletivos passivos e integrados a superfícies planas, capaz de melhorar o desempenho das redes sem fio. Essas superfícies são capazes de refletir o sinal de forma independente controlando a fase e amplitude do sinal. Redirecionando o sinal proveniente de uma fonte, ampliando o alcance de transmissão ou até mesmo criando pontos de cancelamento de interferência, fazendo com que o desempenho do sistema melhore consideravelmente. Além disso, as RISs são como uma tecnologia capacitadora chave, capaz de suportar as comunicações sem fio das redes 6G (WU; ZHANG, 2020).

Mais especificamente a RIS é uma superfície de formato plano que agrupa um número de elementos refletivos passivos e de baixo custo (quando comparada com as tecnologias utilizadas no 5G), onde cada elemento é capaz de induzir uma mudança de fase e/ou amplitude de forma independente no sinal incidente na RIS, fazendo com que seja possível alcançar uma melhora significativa de desempenho. Outro ponto a se destacar da RIS, é que por se tratar de elementos refletivos passivos, eles não introduzem ruído na retransmissão do sinal, pois os elementos da RIS não processam o sinal recebido, e somente retransmitem o sinal com uma variação na fase e/ ou na amplitude (SHAIKH et al., 2021).

A tecnologia RIS pode ser utilizada para vários cenários e para diversas aplicações, como por exemplo redirecionar um sinal onde o transmissor não possui linha de visada (NLoS, *non-line-of-sight*) com o receptor, a RIS seria utilizada para criar uma linha de visada (LoS, *line-of-sight*) virtual entre transmissor e receptor, criando uma comunicação de dois saltos, entre transmissor-RIS e RIS-receptor. Outra possível aplicação está relacionado a um usuário na extremidade de uma célula que sofre alta atenuação do sinal proveniente da BS e também interferência co-canal, uma RIS pode ser implantado na extremidade da célula para ajudar não apenas a melhorar o potência de sinal desejada, mas também para suprimir a interferência, projetando adequadamente sua formação de feixe de reflexão, criando assim um “ponto de acesso”, bem como uma “zona livre de interferências”. Essas são algumas de muitas aplicações possíveis para a tecnologia RIS (WU; ZHANG, 2020).

Da mesma forma que podemos criar uma zona livre de interferências, é possível utilizar a RIS como uma técnica de segurança da informação na camada física, da forma que se implementarmos uma RIS nas proximidades de um dispositivo espião, é possível cancelar o sinal que chega a este dispositivo (através do enlace direto) com sinais refletidos provenientes da RIS. Esta tecnologia também pode atuar em cenários com uma comunicação massiva de vários dispositivos, a RIS pode atuar como um ponto central refletivo, redirecionando de forma inteligente, além de atuar na mitigação de interferência entre tais sinais (WU; ZHANG, 2020).

A RIS não utiliza módulos de transmissão ativos (como por exemplo amplificadores de potência), pois a RIS apenas reflete o sinal recebido e por conta disso não gera ruído ao sinal retransmitido. Outro ponto a se destacar é que a RIS utiliza vários elementos refletivos simples, de baixo custo e de

baixo consumo energético, suprimindo assim, uma limitação das tecnologias utilizadas nas redes 5G.

Dessa forma, neste trabalho de conclusão de curso, será avaliado o desempenho de um sistema de comunicação sem fio assistido por RIS, considerando alguns parâmetros do sistema como número de elementos refletores e posição da RIS, como também será avaliado o desempenho da RIS em cenários afetados pelo desvanecimento Nakagami- m . Além disso, três esquemas de deslocamento de fase para os elementos refletores da RIS são considerados: deslocamento ótimo de fase, deslocamento aleatório de fase e deslocamento quantizado de fase. O desempenho do sistema é avaliado por meio de simulações baseadas no método de Monte Carlo. A Seção 1.2 apresenta alguns trabalhos relacionados ao tema, que serviram de base para este estudo.

1.2 TRABALHOS RELACIONADOS

No artigo (WU; ZHANG, 2020) uma visão geral sobre a tecnologia e a motivação inicial para o desenvolvimento desta tecnologia é apresentada, como também, a aplicação da RIS para diversos cenários, alguns já citados na Seção 1.1, além de apresentar alguns resultados sobre a eficiência da tecnologia em termos do número de elementos refletivos, distância entre o usuário e a BS, ambas versus potência de transmissão. É possível observar que com um grande número de elementos refletivos pode-se diminuir a potência transmitida, porém se o receptor estiver a uma grande distância da RIS o desempenho dessa tecnologia começa a ser inferior a um enlace direto entre transmissor receptor.

Para o trabalho (TAO; WANG; ZHONG, 2020), é possível observar o desempenho de um sistema com entrada única e saída única (SISO, *Single-input Single-output*) sujeito ao desvanecimento do tipo Rice. O desempenho foi avaliado através da capacidade ergódica do canal e da probabilidade de *outage*. Este trabalho mostrou que o número de elementos da RIS é capaz de aumentar significativamente a capacidade ergódica do canal assim como a probabilidade de *outage* do sistema. Além disso, neste trabalho foi avaliado a melhor posição para a RIS, e foi observado que, quando a RIS é posicionada perto do transmissor ou receptor tem um desempenho muito bom quando se tem uma forte componente LOS.

Como dito anteriormente, a RIS também pode atuar na segurança da informação na camada física, e esse é o assunto abordado em (TANG et al., 2021). Nesse trabalho foi considerado um sistema de transmissão sem fio utilizando entrada única e saída múltipla (SIMO, *Single-input and Multiple-output*) na presença de um dispositivo espião com várias antenas. O receptor legítimo possui um mecanismo de defesa, onde o receptor executa o bloqueio *full-duplex* (FD) a fim de confundir o dispositivo espião. A RIS atua nesse cenário fazendo com que o sinal recebido pelo dispositivo legítimo interfira de forma destrutiva o sinal no dispositivo espião. Com isso foi observado que o efeito combinado de interferência da RIS com o bloqueio FD aumenta significativamente a segurança das comunicações sem fio, além disso, como a RIS possibilita uma mudança no ambiente sem fio, ao utiliza-la conseguimos gerar uma segurança estável, que independe do número de espiões e sinais interferentes.

Uma análise do modelo de perda de percurso para uma RIS atuando na faixa de frequência de Terahertz (THz) foi feita em (BOULOGORGOS; ALEXIOU, 2021). Nesse trabalho o modelo de perda de percurso foi analisado por meio de simulações, além de apresentar uma formula generalizada

para a perda de percurso. Além disso, a perda de percurso foi avaliada para diversos valores de temperatura, umidade relativa e números de elementos. A partir deste trabalho é possível termos uma visão geral do comportamento da RIS atuando na faixa de frequência de THz e como a temperatura afeta o desempenho da perda de percurso. Observou-se que, para temperaturas e frequências menores, a perda de percurso é menor, e que o aumento no número de elementos é capaz de reduzir a perda de percurso mesmo para frequências mais altas.

Em (SELIMIS et al., 2021) é possível analisar o desempenho de um cenário de comunicação sem fio, sujeito ao desvanecimento do tipo Nakagami- m , por meio da probabilidade de outage, capacidade ergódica e taxa de erro de bit (BER, *Bit Error Rate*), em que é apresentada uma avaliação de um sistema utilizando dois esquemas (OPS, *Optimal Phase Shifting*) e (RPS, *Random Phase Shifting*). Neste trabalho foi observado que o número de elementos está diretamente relacionado a um melhor desempenho em relação a probabilidade de outage, em que quanto maior o número de elementos melhor se torna o canal. Para a capacidade ergódica, observou-se que assim como para a probabilidade de outage, a capacidade ergódica do canal aumenta de acordo com o número de elementos refletivos. Já a BER foi analisada por meio de uma modulação BPSK, foi concluído que o sistema com OPS supera um com RPS, pois apresenta uma BER muito menor, além disso foi observado que para esta métrica, o número de elementos refletivos não altera o desempenho de forma significativa com o aumento de elementos refletivos.

Outro cenário de comunicação sem fio caracterizado pelo desvanecimento Nakagami- m pode ser visto em (NI et al., 2021). Neste trabalho o modelo contempla a utilização da RIS em cenários dispositivo-a-dispositivo (D2D, *device-to-device*), que se baseia em uma comunicação direta entre dois dispositivos, dessa forma a RIS é utilizado para melhorar ainda mais o desempenho do enlace D2D por feixe passivo. O desempenho do sistema foi avaliado através da probabilidade de outage, operando em dois modos: *overlay* e *underlay*. Observou-se que no modo *overlay*, o desempenho do sistema e a ordem de diversidade dependem diretamente do número de elementos da RIS e dos parâmetros de desvanecimento (nesse caso Nakagami- m). Porém para o modo *underlay* a ordem de diversidade é zero.

Já a RIS atuando em cenários com comunicações na faixa de ondas milimétricas, pode ser visto em (DU et al., 2021) em que foi considerado o modelo de desvanecimento *Fluctating-Two-Ray* (FTR). Nesse trabalho é analisado um sistema de comunicação sem fio assistido por RIS que foi comparado com a técnica de retransmissão amplifica-e-encaminha (AF, *Amplify-and-Forward*) por meio da probabilidade de outage, da BER e do erro de fase. Nesse trabalho, os autores observaram que para um sistema com baixo número de elementos refletivos, a RIS possui a mesma performance que um sistema de retransmissão AF, isso considerando todas as métricas citadas, e por conta disso, a RIS é adequado para sistemas que trabalham na faixa de frequência das ondas milimétricas. E segundo os autores, para um número elevado de elementos a RIS supera o desempenho do sistema AF.

1.3 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido da seguinte forma:

- O Capítulo 2 apresenta os fundamentos teóricos necessários para a compreensão deste trabalho.
- O Capítulo 3 apresenta o modelo do sistema assistido por RIS que foi considerado neste trabalho.
- O Capítulo 4 exhibe os resultados obtidos e as discussões.
- Por fim, o Capítulo 5 apresenta as conclusões deste trabalho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

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

O grande desafio em uma rede de comunicação sem fio, é alcançar uma alta confiabilidade na comunicação e suportar as grandes demandas por taxa de dados, devido a suscetibilidade do canal a ruído, interferência e alguns impedimentos que variam ao longo do tempo e de forma aleatória. Tais impedimentos podem se dividir em dois grupos, efeitos de propagação em grande escala e pequena escala. Os efeitos de grande escalas são: perda de percurso e sombreamento. Já o desvanecimento de multipercurso caracteriza o efeito de pequena escala.

2.1 PERDA DE PERCURSO

A perda de percurso (*pathloss*) é causada pela dissipação da potência irradiada pelo transmissor através do percurso percorrido pelo sinal entre o transmissor e receptor, como também pelos efeitos de propagação do canal. Os efeitos de perda de percurso normalmente ocorrem em distâncias entre 100 a 1000 metros (GOLDSMITH, 2005).

A perda de percurso é a razão entre a potência transmitida e a potência recebida, para um determinado caminho de propagação, dependendo da distância de propagação do sinal. A propagação no espaço livre é o modelo mais simples de perda de percurso. Esta propagação é representada por um sinal que viaja entre dois pontos sem sofrer nenhum tipo de bloqueio durante o percurso. Esse modelo de canal comumente é chamado de canal LOS, devido ao fato de que para este modelo, existe somente uma componente LOS entre transmissor e receptor. Então para este modelo podemos dizer que a PL(dB) é dada por (GOLDSMITH, 2005)

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

em que P_t é a potência transmitida, P_r é a potência recebida, G_t é o produto dos ganhos das antenas do transmissor e do receptor na direção LOS, $\lambda = c/f$ é o comprimento de onda, sendo c a velocidade da luz, f a frequência de operação do sistema, e d a distância entre transmissor e receptor.

Dessa forma é possível observar que a perda de percurso é inversamente proporcional ao quadrado das distâncias entre transmissor e receptor. Além disso, nota-se que a perda de percurso é diretamente proporcional ao comprimento de onda, de forma que, com o aumento da frequência a perda de percurso aumenta. Isso significa que, ao aumentarmos a frequência de operação a potencia recebida irá diminuir. Porém, o modelo de propagação no espaço livre, não representa de maneira apropriada a

maioria dos cenários. Por conta disso, diversos modelos foram desenvolvidos, em que cada modelo se adequa melhor a certos cenários.

2.2 MODELO SIMPLIFICADO DE PERDA DE PERCURSO

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

Porém é possível definir um modelo simplificado que se aproxima de forma coerente a vários modelos complexos. O modelo simplificado de perda de percurso, que será apresentado a seguir, é um modelo comumente usado em projetos de sistemas que é baseado em função da distância percorrida pelo sinal. O modelo simplificado de perda de percurso é dado por (GOLDSMITH, 2005)

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

em que K_0 é uma constante adimensional que depende das características das antenas do sistema e do ganho médio do canal, d_0 é a distância de referência para o campo distante da antena e α é o expoente de perda de percurso. Os valores para tais constantes tem seu valor aproximado para representar um modelo analítico ou empírico. Devido aos efeitos de espalhamento na antena, este modelo só é válido para transmissões onde $d > d_0$. A distância d_0 assume normalmente valores de 1-10 metros em ambientes *indoors* e 10-100 metros para ambientes *outdoors*. O expoente de perda de percurso α varia de acordo com o ambiente analisado, de acordo com (GOLDSMITH, 2005, Tabela 2.2), em ambientes urbanos com macro células podemos ter o valor de α variando de 3,7 até 6,5. Já microcélulas podemos ter valores de α variando entre 2,5 até 3,5.

2.3 SOMBREAMENTO

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

O modelo mais comum para a atenuação é o modelo de sombreamento log-normal, o modelo foi confirmado empiricamente para modelar com precisão a variação na potência recebida em alguns ambientes de propagação. Dessa forma podemos definir o modelo de sombreamento log-normal em

razão da potência transmitida e recebida $\psi = \frac{P_t}{P_r}$, assume-se uma distribuição log-normal dada por (GOLDSMITH, 2005)

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

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

2.4 DESVANECIMENTO DE PEQUENA ESCALA

O desvanecimento é um efeito de pequena escala, onde em uma curta distância ou pequeno período de tempo ocorrem rápidas flutuações nas características dos sinais transmitidos. As variações causam alterações de fase e/ou amplitude, atenuação, reforço ou distorção do sinal dependendo dos parâmetros de desvanecimento. Para sistemas de comunicação sem fio, o desvanecimento é causado devido a propagação do sinal por multipercursos, onde o sinal é replicado diversas vezes por reflexões, difrações, espalhamento espectral ou até mesmo atenuações sofridas ao longa da propagação. E ao chegar no receptor tais replicas são combinadas, de forma destrutiva ou construtiva, podendo assim gerar uma recepção de boa ou má qualidade (VISWANATH, 2005). Uma característica de um canal multipercurso é o atraso de tempo no sinal recebido, este atraso é caracterizado pelo atraso entre a chegada do primeiro componente de sinal e o último componente do sinal recebido. Outra característica do sinal multipercurso é a variação no tempo, isso ocorre pelo fato de o transmissor ou receptor estarem em movimento, dando assim, origem aos múltiplos percursos. O desvanecimento pode ser caracterizado estatisticamente por várias distribuições, como por exemplo a distribuição do tipo Rayleigh, Rice, Nakagami- m , FTR, dentre outras. A seguir serão apresentados dois tipos de desvanecimentos, o do tipo Rayleigh e Nakagami- m (ALOUNI, 2005).

2.4.1 Desvanecimento do tipo Rayleigh

O desvanecimento do tipo Rayleigh é o mais simples dentre os modelos já conhecidos. Nesse desvanecimento assume-se que o canal irá variar de uma forma aleatória seguindo a distribuição de Rayleigh. Esse desvanecimento é muito utilizado para modelagem da propagação do sinal troposférico e ionosférico como também para ambientes urbanos, normalmente utilizado para sinais de rádio. Tal desvanecimento não contempla cenários que possuem linha de visada, este modelo é representado pela soma de duas variáveis aleatórias gaussianas independentes e identicamente distribuídas (ALOUNI, 2005).

O desvanecimento do tipo Rayleigh pode ser representado pelo seu coeficiente complexo de canal dado por

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

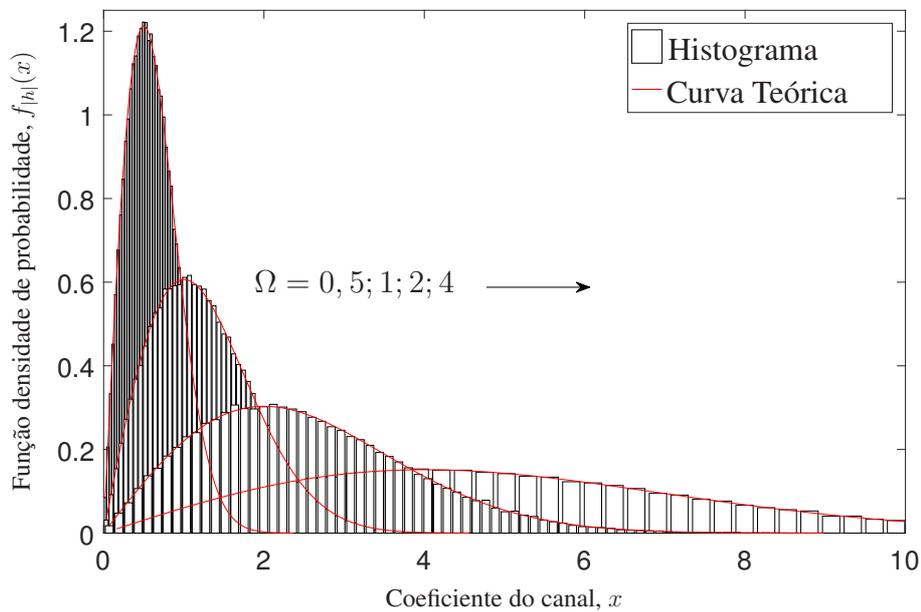
em que X e Y são variáveis aleatórias gaussianas independentes e identicamente distribuídas com média zero e variância $\Omega/2$, ou seja, $X \sim \mathcal{N}(0, \frac{\Omega}{2})$ e $Y \sim \mathcal{N}(0, \frac{\Omega}{2})$ e $\Omega = E[|h|^2]$ o ganho médio de canal. Tal distribuição depende apenas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

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

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

A Figura 1 apresenta a PDF de um canal sujeito ao desvanecimento de Rayleigh. Observa-se que o ganho médio do canal Ω influencia na severidade do canal, de forma que, quanto maior é o valor de Ω a PDF apresenta um espalhamento maior, o que significa que a probabilidade do coeficiente do canal assumir valores mais elevados aumenta, implicando em uma severidade menor no canal (GOMES; OLIVO, 2019).

Figura 1 – PDF para um canal sujeito ao desvanecimento do tipo Rayleigh.



fonte: Adaptado de (GOMES; OLIVO, 2019)

2.4.2 Desvanecimento do tipo Nakagami- m

O desvanecimento do tipo Nakagami- m já é mais complexo do que o apresentado anteriormente. Neste modelo, o sinal se propaga por m agrupamentos (ou *clusters*) de multipercurso, onde a soma dessas réplicas que chegam ao receptor são modeladas por uma variável aleatória com distribuição Nakagami- m . Na Figura 2 é possível observamos a propagação por estes m *clusters*.

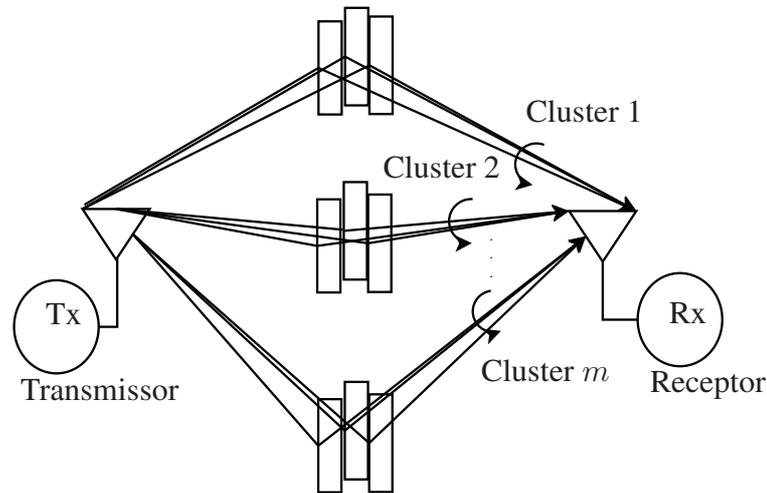
O desvanecimento do tipo Nakagami- m é definido diretamente pelo coeficiente de canal dado por (ALOUNI, 2005)

$$|h| = \sqrt{\sum_{i=1}^m (X_i + jY_i)}, \quad (2.6)$$

em que, X_i e Y_i são variáveis aleatórias gaussianas independentes e identicamente distribuídas com média zero e variância $\Omega_i/(2m)$. Observe que para este modelo de canal, é possível interpretá-lo

como uma soma de m clusters do tipo Rayleigh, possuindo média $\Omega/2$. O ganho médio de canal para esta distribuição é $\Omega = m\Omega_i$.

Figura 2 – Modelo de canal de desvanecimento Nakagami- m



fonte: Produção do próprio autor.

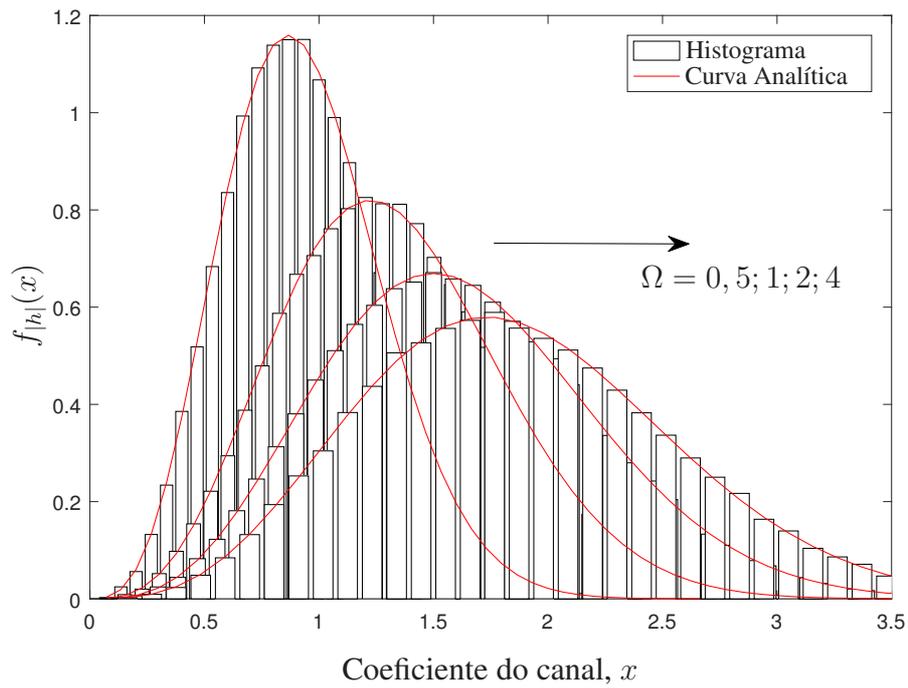
A PDF de uma variável aleatória do tipo Nakagami- m dada por (ALOUNI, 2005)

$$f_{|h|}(x) = \frac{2m x^{2m-1}}{\Omega^m \Gamma(m)} \exp\left(-\frac{m x^2}{\Omega}\right), \quad (2.7)$$

em que $\Gamma(\cdot)$ é a função Gamma.

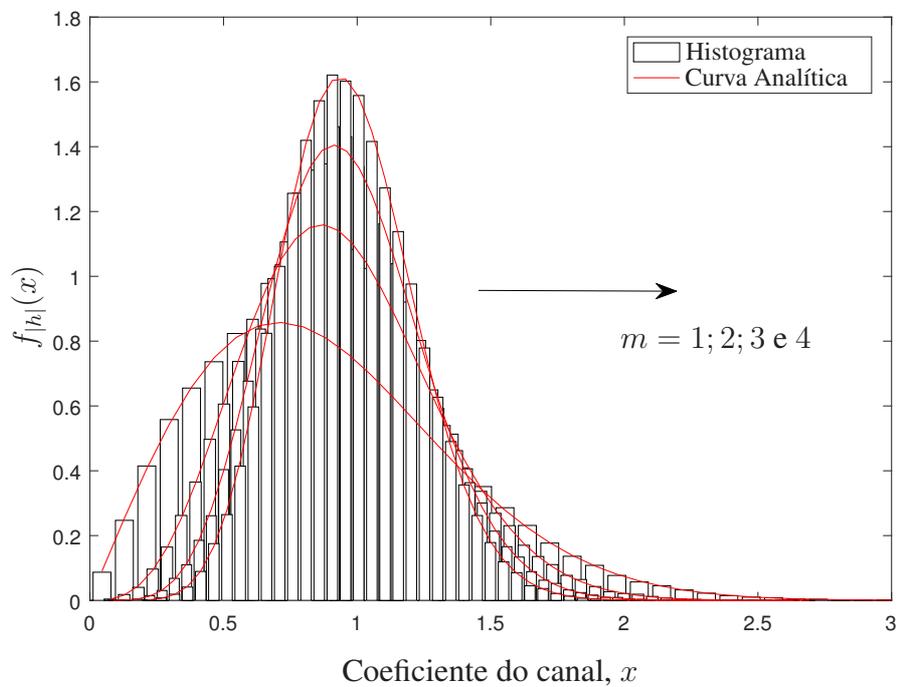
A Figura 3 apresenta a PDF para um canal sujeito ao desvanecimento do tipo Nakagami- m , com parâmetros $m = 2$ e $\Omega = 1, 2, 3$ e 4 . Na Figura 4 tem-se a PDF para um canal sujeito ao desvanecimento do tipo Nakagami- m com $\Omega = 1$ e $m = 1, 2, 3$ e 4 . Note que, na Figura 3, conforme aumenta Ω , a PDF apresenta um espalhamento maior, o que significa que a probabilidade do canal assumir valores elevados aumenta, implicando assim em um canal menos severo. Para a Figura 4 observe que conforme m aumenta a curva se desloca para a direita, de modo que, quanto maior é o número de agrupamentos que chegam no receptor, menos severo é o canal (GOMES; OLIVO, 2020).

Figura 3 – PDF para um canal sujeito ao desvanecimento Nakagami- m variando Ω ;



fonte: Adaptado de (GOMES; OLIVO, 2020)

Figura 4 – PDF para um canal sujeito ao desvanecimento Nakagami- m variando m



fonte: Adaptado de (GOMES; OLIVO, 2020)

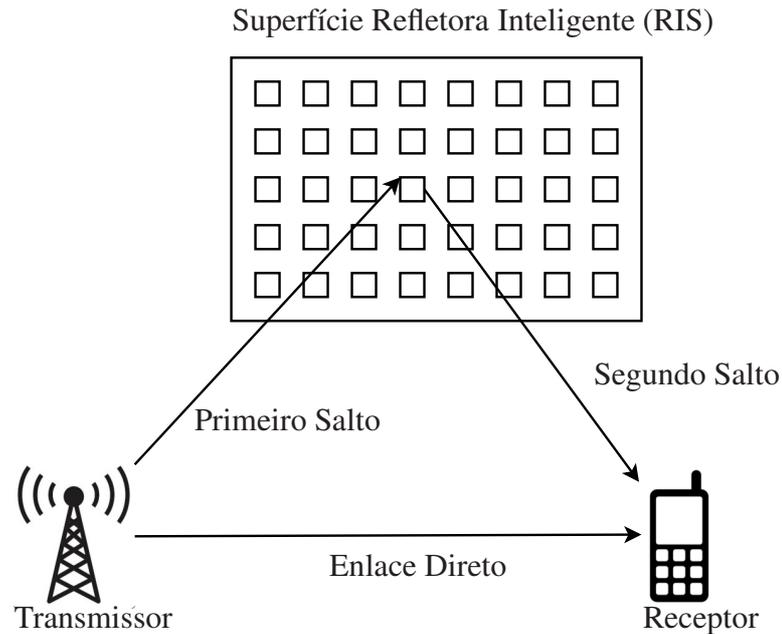
2.5 SUPERFÍCIES INTELIGENTES RECONFIGURÁVEIS (RIS)

As superfícies inteligentes reconfiguráveis (RIS) são uma tecnologia proposta para a nova geração de redes sem fio, o 6G. Tal tecnologia é vista como habilitadora pois, com o auxílio e implementação da mesma, será possível alcançar taxas de dados mais elevadas, suporte ao número massivo de dispositivos e uma alta confiabilidade na comunicação sem fio, sendo tais requisitos necessários nas redes 6G. Uma RIS é composta de uma superfície plana que contém um grande número de elementos refletivos passivos de baixo custo (WU; ZHANG, 2020). Tal superfície possui N elementos refletivos, em que cada um, independentemente, é capaz de induzir uma mudança de fase e/ou amplitude no sinal incidente. Dessa forma, diferentemente das técnicas e tecnologias utilizadas atualmente, uma RIS permite reconfigurar o cenário de propagação no qual está inserida por meio de reflexões inteligentes e controláveis. Como mencionado anteriormente na Seção 1.1, existe uma gama de aplicações possíveis para a RIS, como por exemplo: fornecer uma linha de visada virtual para um canal onde o receptor está em uma zona sem cobertura de sinal por meio de LOS (*dead zone*), ou até mesmo aumentar a confiabilidade de um sistema com enlace LOS presente, dentre outras aplicações já citadas.

A parte de hardware da RIS é baseada no conceito de metasuperfície, feita de metamateriais que são configuráveis de forma digital (ABADAL et al., 2020). A metasuperfície é, de forma resumida, um arranjo constituído por um grande número dos chamados meta-átomos com espessura elétrica na ordem do sub comprimento de onda da frequência de operação de interesse (LIASKOS et al., 2018). É necessário projetar os elementos de forma adequada, considerando no projeto alguns fatores como por exemplo, o tamanho, forma geométrica, orientação, arranjo, dentre outras características, e a partir desse projeto é possível modificar a resposta (amplitude de reflexão e deslocamento de fase) de cada elemento refletivo da RIS. Vale ressaltar que para aplicações em redes sem fio, o coeficiente de reflexão de cada elemento da RIS deve ser variável para poder atender as demandas e as variações dinâmicas decorrente da movimentação do usuário, sendo assim necessária uma configuração em tempo real. Essa reconfiguração pode ser alcançada utilizando diodos PIN, transistores FETs (transistor de efeito de campo) ou interruptores do sistema microeletromecânico (WU; ZHANG, 2020).

O modelo de comunicação de uma rede que usa RIS é feito por um sistema de duplo salto, onde temos um enlace transmissor-RIS e outro RIS-receptor. Cada elemento da RIS irá receber sinais provenientes de múltiplos caminhos sobrepostos, e depois disso, retransmite o sinal combinado ajustando a fase e/ou amplitude, dessa forma, ao chegar no receptor temos um modelo de canal multiplicativo, isso será melhor esclarecido no Capítulo 3. A Figura 5 apresenta um modelo de canal na presença da RIS, onde é possível observar a comunicação de duplo salto, sendo que o primeiro salto representa o enlace Transmissor-RIS, já o segundo salto representa o enlace entre o RIS-Receptor. Note também que no sistema modelado há presença de enlace direto entre Transmissor e Receptor.

Figura 5 – Modelo de canal na presença do RIS



fonte: Produção do próprio autor.

2.6 MÉTRICAS DE DESEMPENHO

Devido às variações que o sinal sofre durante sua transmissão, decorrentes dos efeitos de grande e pequena escala, é necessário avaliar a confiabilidade do sistema de comunicação sem fio, visando verificar se esse sistema consegue alcançar uma alta confiabilidade sem gerar grandes erros na recepção. Nesta seção serão apresentadas duas métricas de desempenho que serão utilizadas para avaliar o cenário assistido por RIS a ser apresentado no Capítulo 3. Uma visão geral da probabilidade de *outage* e da capacidade ergódica do canal será apresentada nesta seção. Tais métricas de desempenho avaliadas por meio de simulações baseadas no método de Monte Carlo permitem caracterizar o efeito de cada parâmetro do sistema. O método de Monte Carlo consiste na realização de iterações massivas de amostragens aleatórias do estado do canal, para a obtenção de resultados numéricos que convergem para um resultado muito próximo ao comportamento real.

2.6.1 Probabilidade de *outage*

A probabilidade de *outage* é uma das métricas mais importantes para avaliação da confiabilidade de sistema de comunicação sem fio. Ela é definida como a probabilidade da SNR fim-a-fim instantânea recebida, γ , estar abaixo de um limiar γ_{th} que está relacionado com a qualidade do serviço do sistema, podendo assim determinar a confiabilidade da rede, de forma que (GOLDSMITH, 2005)

$$P_{out} = \Pr(\gamma < \gamma_{th}), \quad (2.8)$$

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

2.6.2 Capacidade Ergódica

Outra métrica de avaliação é a capacidade ergódica, também conhecida como capacidade de Shannon. É definida como a máxima taxa média atingida sobre todas as possíveis variações do canal, levando em consideração o tipo do desvanecimento a que o canal está sujeito, de forma que a capacidade ergódica é definida como (GOLDSMITH, 2005)

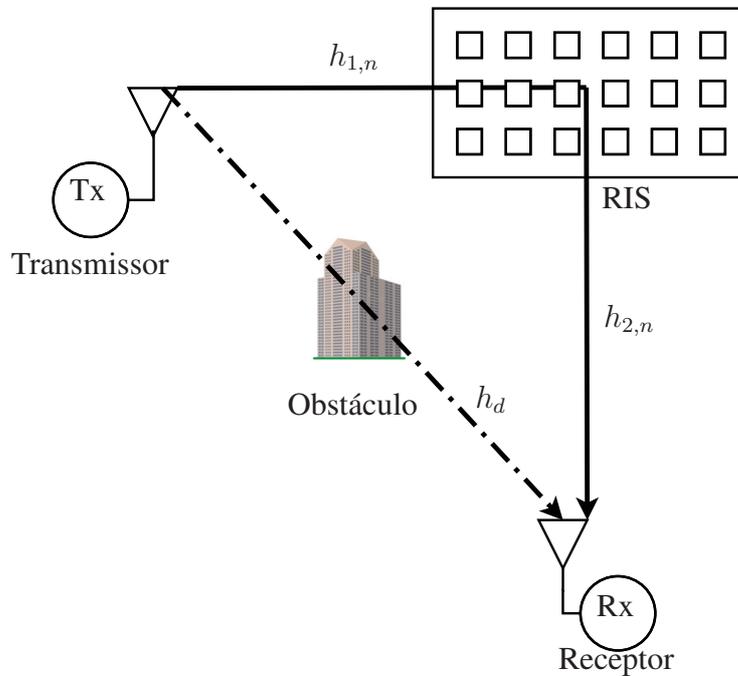
$$C = E\{\log_2(1 + \gamma)\} \quad (2.9)$$

em que γ é a SNR recebida. A capacidade ergódica é dada em bps/Hz. A capacidade ergódica é um limitante superior do desempenho do sistema onde o comprimento da palavra-código é longa o suficiente para experimentar todos estados do canal de desvanecimento.

3 MODELO DO SISTEMA

Neste capítulo será apresentado o modelo do sistema assistido por RIS que será avaliado neste trabalho por meio da probabilidade de *outage* e da capacidade ergódica. Considere uma rede sem fio assistida por RIS de acordo com a Figura 6, constituída por um transmissor (Tx), a RIS e o receptor (Rx). Esse canal é chamado de canal de duplo salto (*dual hop*), isso ocorre pois há duas instâncias de comunicação, Tx-RIS e RIS-Rx. Observa-se que, nesse cenário, o enlace direto entre Tx e Rx está muito atenuado devido aos obstáculos, tornando-se indisponível para comunicação. Portanto, o único meio de comunicação entre Tx e Rx é através do enlace NLOS constituído de dois saltos entre Tx-RIS e RIS-Rx, porém é possível considerar que esse enlace gera uma linha de visada virtual entre Tx e Rx. Outro ponto a ressaltar é que esse sistema é afetado pelo desvanecimento do tipo Nakagami- m .

Figura 6 – Modelo do sistema



fonte: Produção do próprio autor.

O sinal recebido em Rx pode ser expressado por (SELIMIS et al., 2021)

$$y = \sqrt{P}x \left(\sum_{n=1}^N h_{1,n}h_{2,n}r_n \right) + \nu, \quad (3.1)$$

em que P é a potência transmitida, x é o sinal de informação com energia normalizada unitária, $h_{1,n}$ é o coeficiente complexo de canal entre Tx e o n -ésimo elemento refletivo da RIS e $h_{2,n}$ é coeficiente complexo de canal entre o n -ésimo elemento refletivo da RIS e Rx. Além disso, $r_n = \exp(j\theta_n)$ é a resposta em fase do n -ésimo elemento da RIS, onde $\theta_n \in [0, 2\pi]$ e por fim, ν é o ruído gaussiano branco aditivo com média zero e variância σ_N^2 .

Podemos definir os coeficientes do desvanecimento da seguinte forma, $h_{1,n} = |h_{1,n}| \exp(j\theta_{1,n})$ e $h_{2,n} = |h_{2,n}| \exp(j\theta_{2,n})$, em que $|h_{1,n}|$ e $|h_{2,n}|$ são variáveis aleatórias independentes que seguem

uma distribuição do tipo Nakagami- m com parâmetros $(m_{1,n}, \Omega_{1,n})$ e $(m_{2,n}, \Omega_{2,n})$ respectivamente. As fases $\theta_{1,n}$ e $\theta_{2,n}$ são variáveis aleatórias independentes entre si, como também independem de $|h_{1,n}|$, $|h_{2,n}|$ (YACOUB, 2009). Já os parâmetros $\Omega_{1,n}$ e $\Omega_{2,n}$ dependem da distância entre Tx-RIS e RIS-Tx, respectivamente. Além disso dependem de K_0 , considerando que os ganhos das antenas transmissoras e receptoras são unitários, tem-se que $K_0 = \left(\frac{\lambda}{4\pi}\right)^2$ que representa o fator de perda de percurso a uma distância de referência, em que $\lambda = c/f$ é o comprimento de onda do sinal transmitido. Dessa forma $\Omega_{1,n}$ e $\Omega_{2,n}$ são dados por

$$\Omega_{1,n} = K_0 d_1^{-\alpha} \quad (3.2)$$

e

$$\Omega_{2,n} = K_0 d_2^{-\alpha}, \quad (3.3)$$

respectivamente, em que α representa o expoente de perda de percurso.

Para este cenário será analisado três esquemas de deslocamento de fase dos elementos refletivos. O primeiro é o esquema de deslocamento ótimo de fase (OPS, *Optimal Phase Shifting*), onde cada elemento da RIS desloca uma fase de maneira que, combinado com as fases dos sinais incidentes na RIS, a fase do sinal refletido pela RIS seja nula. Porém para a aplicação deste esquema é necessário conhecer as fases $\theta_{1,n}$ e $\theta_{2,n}$ previamente e, para isso, é necessário termos as informações de estado do canal (CSI, *Channel State Information*). No entanto nem todo cenário de comunicação possui o CSI, e por conta disso torna-se interessante utilizar um esquema de deslocamento aleatório de fase (RPS, *Random Phase Shifting*). Neste segundo esquema de deslocamento de fase, cada elemento da RIS aplica uma fase aleatória no sinal incidente podendo influenciar de forma positiva ou negativa no sinal refletido.

Primeiramente analisando o cenário RPS, vamos definir a SNR fim-a-fim recebida no receptor, que é dada por (SELIMIS et al., 2021)

$$\gamma_{\text{RPS}} = \rho \left| \sum_{n=1}^N |h_{1,n}| |h_{2,n}| \exp(j\phi_n) \right|^2, \quad (3.4)$$

em que, $\rho = P/N_{\text{ruído}}$ é a SNR transmitida, sendo $N_{\text{ruído}} = -174 + 10 \log_{10}(B)$ dBm e B é a largura de banda do canal. Já ϕ_n é a combinação de fases através do enlace de dois saltos entre Tx e Rx que passa pela RIS. De forma que $\phi_n = \theta_{1,n} + \theta_{2,n} - \theta_n$, em que θ_n é uma fase escolhida aleatoriamente.

Agora considerando o caso onde temos CSI perfeito, podemos aplicar o esquema OPS na RIS. Para tal esquema as combinações de fases entre $\theta_{1,n}$, $\theta_{2,n}$ e θ_n faz com que ϕ_n seja zerado. E dessa forma temos a seguinte SNR fim-a-fim (SELIMIS et al., 2021)

$$\gamma_{\text{OPS}} = \rho \left(\sum_{n=1}^N |h_{1,n}| |h_{2,n}| \right)^2. \quad (3.5)$$

O terceiro esquema que será avaliado é o esquema de deslocamento quantizado de fase (QPS, *Quantized Phase Shifting*), este esquema utiliza a mesma SNR fim-a-fim que o esquema RPS, dado em (3.4), entretanto, neste caso, a fase θ_n é gerada de forma discreta da forma que a fase tenha $L = 2^b$

níveis, onde b é o número de bits de quantização. Dessa forma, para um caso de $b = 2$, tem-se que $\theta_n = 0, \pi/2, \pi$ e $3\pi/2$ e a partir de θ_n será feito o cálculo de ϕ_n , onde o valor de θ_n , que será subtraído de $\theta_{1,n} + \theta_{2,n}$ é o valor que mais se aproxima dessa soma, de forma a tentar zerar o valor de ϕ_n . Com isso, podemos assumir que para a quantização, o erro de ϕ_n segue uma distribuição uniforme em $[-\pi/2^b, \pi/2^b)$.

Após a apresentação das SNRs fim-a-fim e dos esquemas que serão avaliados, no próximo capítulo será realizada a análise de desempenho de ambos os esquemas através da probabilidade de *outage* e da capacidade ergódica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será apresentada a avaliação de desempenho do sistema retratado no Capítulo 3. Inicialmente validou-se os resultados apresentados em (SELIMIS et al., 2021). Após isso, com os resultados validados, avaliou-se o desempenho de tal sistema através de simulações para a probabilidade de *outage* e capacidade ergódica, que foram realizadas através do software Octave, usando o método de Monte Carlo, com 10^5 iterações. Para isso, foi-se utilizado o modelo na Figura 6, com o enlace LOS indisponível devido à presença de obstáculos, dessa forma, avaliou-se somente o enlace de dois saltos. Também serão considerados os esquemas RPS, OPS e QPS. Para avaliação será utilizado uma frequência de 3,5 GHz, a mesma que é utilizada nas redes 6G. Os coeficientes de perda de percurso são $\alpha_{1,n} = 2,5$ e $\alpha_{2,n} = 2,5$ para o primeiro e segundo salto, respectivamente. As distâncias entre Tx-RIS e RIS-Rx são $d_1 = d_2 = 50$ m, respectivamente. Além disso será considerado que o canal possui uma largura de banda de $B = 20$ MHz. Com tais informações já é possível encontrarmos os parâmetros $\Omega_{1,n}$ e $\Omega_{2,n}$ de acordo com as expressões dadas em (3.2) e (3.3), respectivamente. Para completar a caracterização dos coeficientes de canal com desvanecimento Nakagami- m , tem-se que $m_{1,n} = m_{2,n} = 3$. Com isso, para as primeiras simulações será considerado a variação do número de elementos refletivos da RIS, onde $N = 16, 32$ e 64 . A Tabela 1 apresenta de forma resumida os parâmetros utilizados para avaliar o desempenho do sistema.

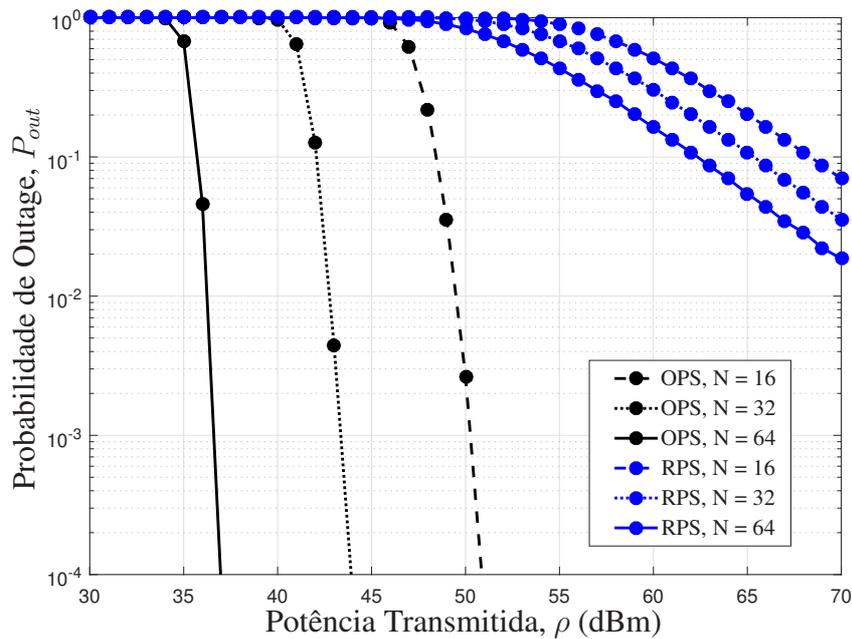
Tabela 1 – Parâmetros do sistema

Parâmetros	Valor
Frequência de operação	$f = 3,5$ GHz
Largura de Banda	$B = 20$ MHz
Expoente de perda de percurso primeiro salto	$\alpha_{1,n} = 2,5$
Expoente de perda de percurso segundo salto	$\alpha_{2,n} = 2,5$
Limiar alvo	$\gamma_{th} = 0$ dB
Distância entre Tx-RIS	$d_1 = 50$ m
Distância entre RIS-Rx	$d_2 = 50$ m
Número de clusters do primeiro salto	$m_{1,n} = 3$
Número de clusters do segundo salto	$m_{2,n} = 3$
Número de elementos do RIS	$N = 16, 32$ e 64

Para a apresentação dos resultados, será feita uma avaliação comparando o desempenho entre os esquemas RPS e OPS, como também entre o esquema OPS e QPS. A Figura 7 apresenta a probabilidade de *outage* versus potência transmitida para os esquemas RPS e OPS, com parâmetros conforme apresentado na tabela 1. As curvas em azul representam o esquema RPS, já as curvas em preto o esquema OPS. Primeiramente vamos analisar o efeito do número de elementos refletivos da RIS. Observe que, para o esquema RPS, com aumento de N , para uma mesma potência transmitida, diminui a probabilidade de *outage* melhorando assim a qualidade do sistema. Entretanto, no esquema RPS, é observado que a inclinação das curvas é pouco acentuada. Já pra o esquema OPS, note que com o aumento de N a inclinação das curvas é muito acentuada, e como para o esquema RPS, o aumento de N para uma mesma potência transmitida gera uma probabilidade de *outage* menor. Observe também

que, por se tratar de um modelo onde os elementos da RIS conseguem anular as fases provenientes de cada saltos, para um número menor elementos, o desempenho do esquema OPS supera o modelo RPS. Podemos observar que para $N = 16$ no esquema OPS com uma potência transmitida de 47 dBm, temos uma probabilidade de *outage* em torno de 6×10^{-1} . Já para a mesma potência e mesmo valor de N , no esquema RPS tem uma probabilidade de *outage* igual a 1. De fato, em termos do número de elementos e avaliando através da probabilidade de *outage* o esquema OPS tem um desempenho melhor que o RPS, como esperado por anular a fase ϕ_n e por isso é considerado o esquema ótimo.

Figura 7 – Probabilidade de *outage* vs. Potência transmitida para os modelos RPS e OPS, com $N = 16, 32$ e 64

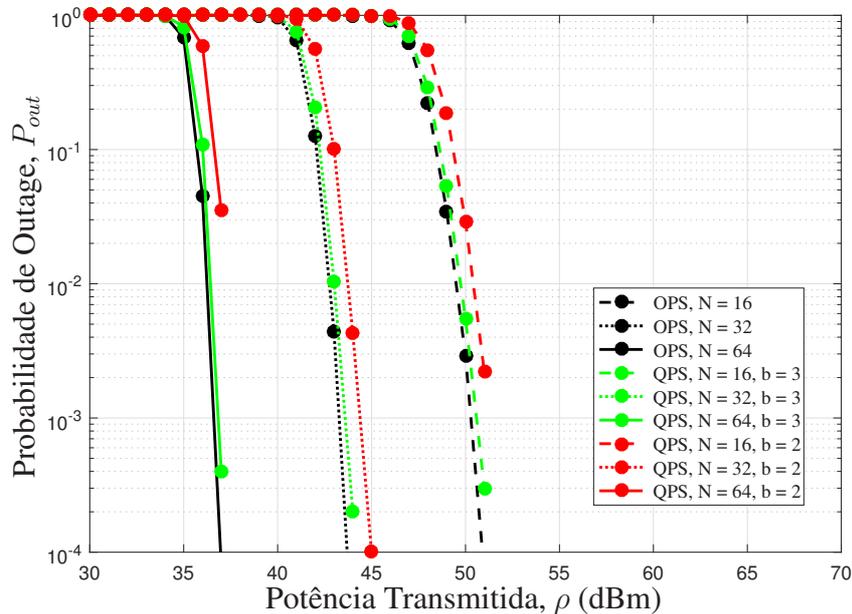


fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 8 apresenta a probabilidade de *outage* versus potência transmitida para os esquemas OPS e QPS, onde as curvas verde e vermelha caracterizam o esquema QPS, em verde tem-se as curvas com um número de bits de quantização $b = 3$, as curvas em vermelho são para $b = 2$ e as curvas em preto representam o esquema OPS. Para tal análise também foi variado o número de elementos refletivos $N = 16, 32$ e 64 . Observe que o esquema OPS, tem o mesmo comportamento que o modelo OPS, mesma inclinação, porém ganhos diferentes. Note que para $b = 2$, tem-se uma diferença facilmente perceptível entre o esquema QPS (curvas vermelhas) e o esquema OPS (curva preta), porém ao aumentar os bits de quantização para $b = 3$, as curvas do esquema QPS se aproximam daquelas correspondentes ao esquema OPS, isso ocorre pois no esquema QPS, as fases induzidas pela RIS tentam compensar as fases dos dois saltos, tentando chegar próximo ao modelo OPS, onde ϕ_n é zero. Então através dos bits de quantização podemos dizer que o erro atrelado a ϕ_n segue uma distribuição uniforme em $[-\pi/2^b, \pi/2^b)$, e dessa forma, quanto maior for o número de bits de quantização, mais o esquema QPS se aproxima do OPS. Observe também que para o esquema QPS, da mesma forma para o esquema OPS, o aumento do número de elementos refletivos da RIS melhora o desempenho, onde para um mesmo valor de potência transmitida, temos uma probabilidade de *outage* menor para

N mais elevado.

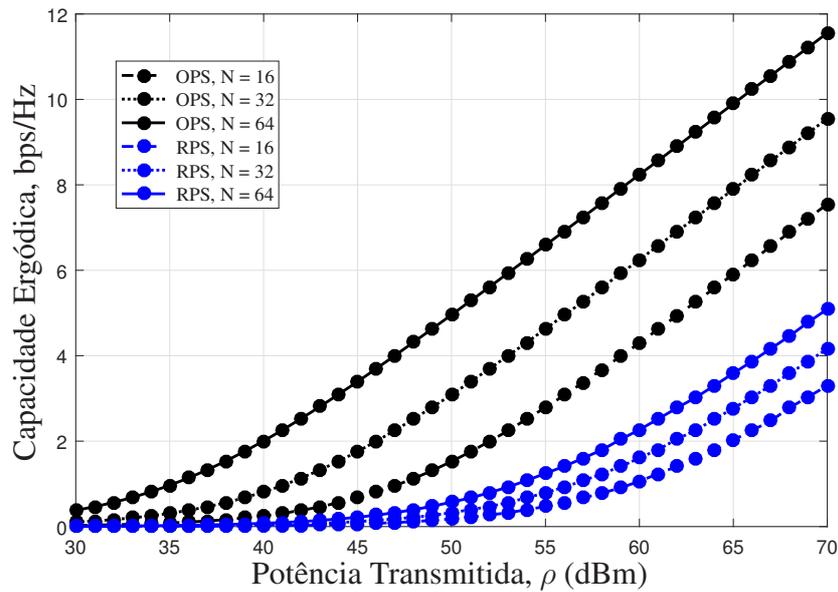
Figura 8 – Probabilidade de *outage* vs. Potência transmitida para os modelos OPS e QPS, com $N = 16, 32$ e 64 ; $b = 2$ e 3 .



fonte: Produção do próprio autor.

Agora analisando o impacto de N nos esquemas RPS e OPS, através da capacidade ergódica, como visto na Figura 9. Pode-se observar que o aumento do número de elementos refletivos para ambos os esquemas melhora a capacidade ergódica do sistema, como visto para a probabilidade de *outage*. Porém, note que, a diferença de desempenho entre cada valor N , para o esquema RPS é menor que para o esquema OPS. Isso implica que, aumentar o número de elementos refletivos no esquema RPS melhora o sistema, de fato, porém é evidente que as melhorias no desempenho são pequenas com o aumento de N . Já para o esquema OPS, o aumento de N trás a possibilidade de alcançar melhores desempenhos.

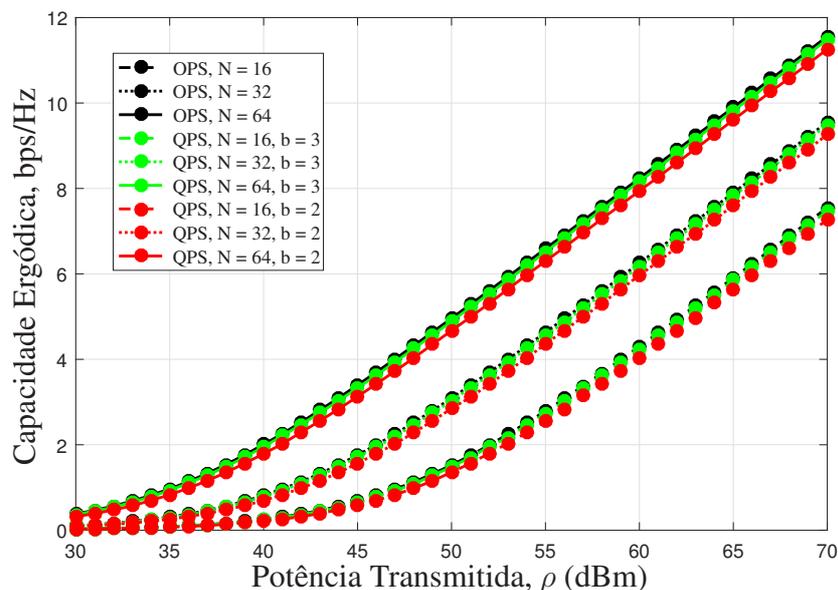
Figura 9 – Capacidade ergódica vs. Potência transmitida para os modelos RPS e OPS, com $N = 16$, 32 e 64;



fonte: Produção do próprio autor.

Já a Figura 10, apresenta a capacidade ergódica versus potência transmitida para os esquemas OPS e QPS, as curvas em verde são para $b = 3$, as curvas em vermelho para $b = 2$ e em preto o modelo OPS. Como dito anteriormente, para a probabilidade de *outage*, o aumento do número de bits de quantização faz com que o esquema QPS se aproxime ao esquema OPS. Dessa forma vemos que para $b = 2$ possuímos um desempenho inferior que para $b = 3$, que nesse caso, se aproxime consideravelmente ao caso OPS.

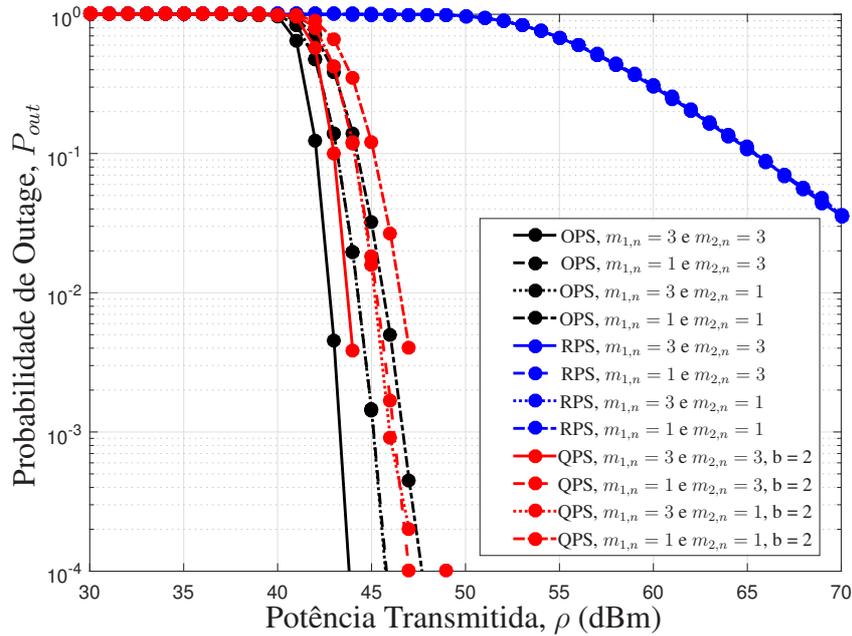
Figura 10 – Capacidade ergódica vs. Potência transmitida para os modelos OPS e QPS, com $N = 16$, 32 e 64, $b = 2$ e 3.



fonte: Produção do próprio autor.

Após avaliar o efeito do número de elementos, será analisado o impacto de saltos desbalanceados em termos da probabilidade de *outage* e capacidade ergódica. Nos casos anteriores foi considerado que $m_{1,n} = m_{2,n} = 3$, porém agora os parâmetros $m_{1,n}$ e $m_{2,n}$ não serão iguais. Dessa forma será avaliado quatro combinações onde $(m_{1,n}, m_{2,n}) = (3, 3), (1, 3), (3, 1)$ e $(1, 1)$. Além disso fixou-se o número de elementos da RIS em $N = 32$. Note que para $(m_{1,n}, m_{2,n}) = (1, 1)$ temos que os dois saltos seguem uma distribuição de Rayleigh. Isso ocorre pois, o desvanecimento de Rayleigh é um caso particular de Nakagami- m , quando $m = 1$. Na Figura 11 é apresentado a probabilidade de *outage* versus potência transmitida para os três esquemas. Observe que, para o esquema RPS a alteração de $m_{1,n}$ e $m_{2,n}$ não tem impacto nos resultados, pois para as quatro combinações analisadas as curvas se sobrepõem, isso ocorre pois a fase é independente dos coeficientes de canal, e dessa forma, o impacto da aleatoriedade das fases faz com que o desbalanceamento dos dois saltos, em relação ao parâmetro $m_{1,n}$ e $m_{2,n}$, seja irrelevante. Tal efeito é causado pela aleatoriedade das fases. Quando comparado aos outros dois esquemas, observe que no esquema QPS, onde a fase θ_n tenta compensar a soma das fases $\theta_{1,n}$ e $\theta_{2,n}$, observamos que a diferença entre os parâmetros de cada salto resulta em curvas que não são sobrepostas. Contudo note que o primeiro e segundo salto são simétricos, de forma que a curva com $m_{1,n} = 1$ e $m_{2,n} = 3$ se sobrepõe a curva com $m_{1,n} = 3$ e $m_{2,n} = 1$, já para as curvas com $m_{1,n} = 3$ e $m_{2,n} = 3$, observamos que a mesma possui um desempenho melhor que as outras duas curvas de QPS, devido ao fato de que para o desvanecimento Nakagami- m , o aumento do parâmetro m faz com que o desempenho do sistema melhore, pois, com aumento de m o canal torna-se menos severo, porém com $m_{1,n} = 1$ e $m_{2,n} = 1$, temos o pior desempenho dentre as combinações, pelo fato de que m para os dois saltos é menor, tornando o canal mais severo. Já para o esquema OPS é possível observarmos o mesmo efeito de QPS, porém por se tratar de modelo com $\phi_n = 0$, o desempenho do mesmo é superior aos outros esquemas.

Figura 11 – Probabilidade de *outage* vs. Potência transmitida para os modelos RPS, OPS e QPS para saltos desbalanceados

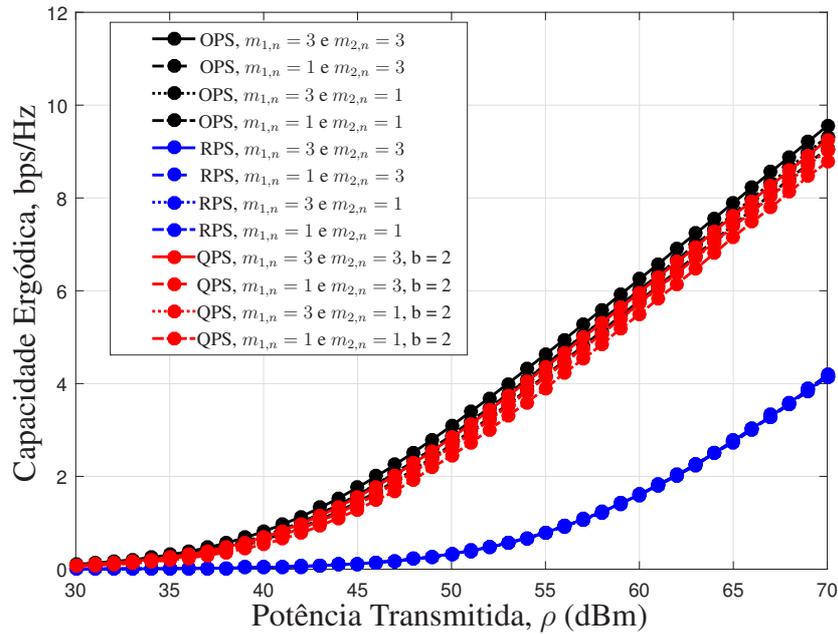


fonte: Produção do próprio autor.

A Figura 12 apresenta a capacidade ergódica versus potência transmitida, para os três esquemas analisados neste trabalho, com saltos desbalanceados. Note que, da mesma forma que para a probabilidade de *outage*, para o esquema RPS a mudanças dos parâmetros dos saltos desbalanceados não altera o comportamento da curva, de forma que para todos os casos analisados de $m_{1,n}$ e $m_{2,n}$ as curvas se sobrepõem, devido a aleatoriedade das fases θ_n . Já para os esquemas OPS e QPS, note que também é possível observar que os dois saltos são simétricos, de forma que as curvas para $m_{1,n} = 1$ e $m_{2,n} = 3$ e $m_{1,n} = 3$ e $m_{2,n} = 1$ se sobrepõem. Já para $m_{1,n} = 3$ e $m_{2,n} = 3$ temos um desempenho melhor que as outras curvas, devido ao fato de m para os dois saltos ser maior. Entretanto para $m_{1,n} = 1$ e $m_{2,n} = 1$, temos o pior desempenho, já que nessa combinação temos os menores valores de m , tornando o canal mais severo nos dois saltos. Observe também que no esquema OPS para $m_{1,n} = 1$ e $m_{2,n} = 3$ e $m_{1,n} = 3$ e $m_{2,n} = 1$ temos um desempenho superior ao esquema QPS para $m_{1,n} = 3$ e $m_{2,n} = 3$. Porém, o esquema QPS para $b = 2$, já supera o esquema RPS de forma considerável.

Após analisar os efeitos do número de elementos e dos saltos desbalanceados, será avaliado o impacto da posição da RIS no sistema. Dessa forma iremos considerar um sistema co-linear, onde Tx, Rx e RIS estão na mesma linha, e que a distância entre Tx e Rx se mantém fixa em 100 m. A análise será feita deslocando a RIS ao longo da distância entre Tx e Rx. Tal modelo pode ser observado na Figura 13. Cabe ressaltar que para esse modelo também não existe a presença de enlace LOS.

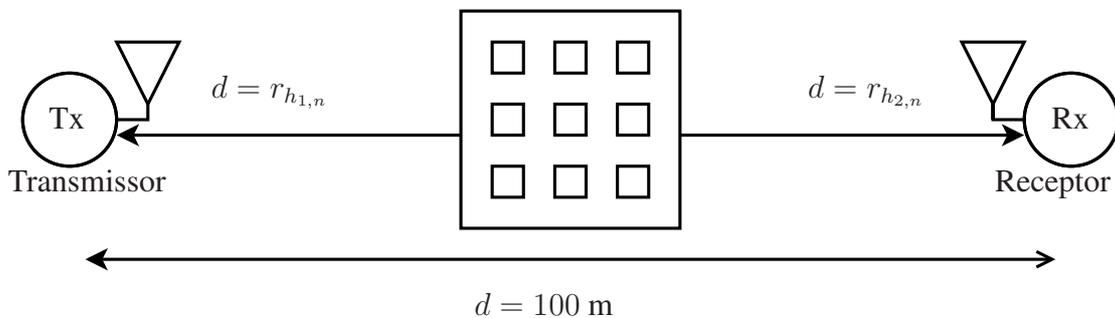
Figura 12 – Capacidade ergódica vs. Potência transmitida para os esquemas RPS, OPS e QPS para saltos desbalanceados



fonte: Produção do próprio autor.

Figura 13 – Modelo co-linear Tx-RIS-Rx

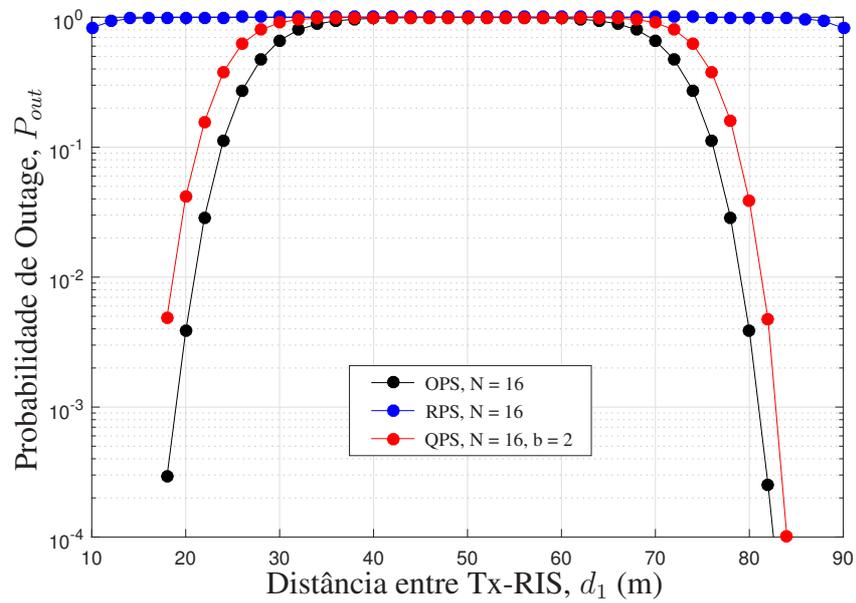
Superfície Refletora Inteligente (RIS)



fonte: Produção do próprio autor.

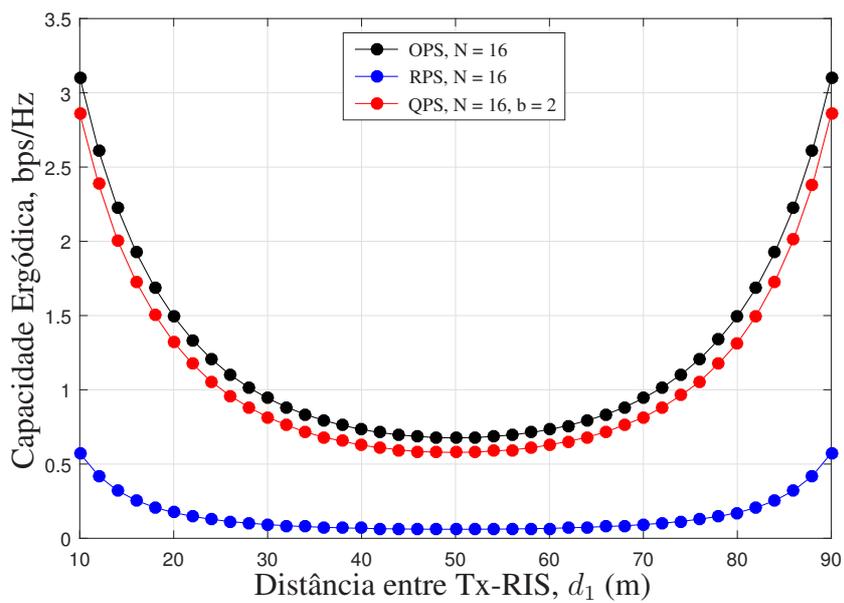
Para tal análise foi fixado o valor de $N = 16$ e uma potência transmitida de 45 dBm. A Figura 14 apresenta a probabilidade de *outage* avaliada ao longo da distância. Observe que, para o esquema RPS, o desempenho é bem fraco ao longo de toda distribuição de distância. Porém note que para os esquemas OPS e QPS, a probabilidade de *outage* é menor quando a RIS está posicionada próxima ao transmissor ou ao receptor, apresentando um melhor desempenho do sistema. Já a Figura 15 apresenta a capacidade ergódica avaliada em função da posição da RIS. Observe que essa figura complementa a anterior, de forma que, para todos esquemas, é notório que a capacidade ergódica do canal é melhor quando posicionada próxima ao transmissor ou receptor. E para as duas métricas avaliadas é possível observar que para a distância $d_1 \approx 50$ m, possuímos o pior desempenho tanto para a probabilidade de *outage* quanto para capacidade ergódica.

Figura 14 – Probabilidade de *outage* vs. Distância entre Tx-RIS para os esquemas RPS, OPS e QPS



fonte: Produção do próprio autor.

Figura 15 – Capacidade Ergódica vs. Distância entre Tx-RIS para os esquemas RPS, OPS e QPS



fonte: Produção do próprio autor.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi avaliado o desempenho de um sistema de comunicação sem fio assistido por RIS, considerando canais de desvanecimento Nakagami- m , através das métricas: probabilidade de *outage* e capacidade ergódica. Avaliou-se, por meio de simulações baseadas no método de Monte Carlo, o impacto do número de elementos refletivos da RIS, o efeito de saltos desbalanceados e por fim, avaliou-se o posicionamento da RIS em um sistema co-linear entre transmissor e receptor. Para isso foram analisados três esquemas de deslocamento de fase: deslocamento ótimo de fase (OPS), deslocamento aleatório de fase (RPS) e deslocamento quantizado de fase (QPS). A partir dos resultados obtidos, notou-se que para todos os esquemas o aumento do número de elementos da RIS melhora o desempenho do sistema. Contudo, para os esquemas OPS e QPS, o aumento do número de elementos tem um impacto maior em termos da probabilidade de *outage* e capacidade ergódica, uma vez que a fase ϕ_n é nula no caso do esquema OPS ou é parcialmente compensada no caso do QPS. Já a performance do esquema QPS depende do número de bits de quantização, onde quanto maior for esse valor mais próximo do esquema OPS o QPS se torna. Analisando os efeitos de saltos desbalanceados, foi possível observar que os saltos são simétricos na condição de dois saltos com a mesma distância, de forma que, inverter os parâmetros dos saltos, entre si, não gera resultados diferentes. Outro ponto a se destacar é que para o esquema RPS, os saltos desbalanceados não alteram a resposta do sistema, de forma que para parâmetros diferentes de desvanecimento, as curvas se sobrepueram. Tal efeito foi observado tanto para as curvas de *outage* como para as curvas da capacidade ergódica. Isso deve-se ao fato de que a aleatoriedade das fases θ_n é um fator de extrema relevância no desempenho de sistemas assistidos por RIS. Em relação ao posicionamento da RIS, notou-se que a RIS possui melhor desempenho quando a RIS está localizado próxima ao transmissor ou receptor. Dessa forma é possível obtermos o melhor desempenho, tanto em termos da probabilidade de *outage* como da capacidade ergódica. Pode-se elencar os desempenhos dos esquemas, onde o esquema OPS é o que possui melhor desempenho, pois é o esquema ótimo porém, a implementação de um sistema OPS depende de conhecermos o CSI, que em muitos casos práticos é extremamente difícil. Já o esquema QPS é uma excelente aproximação ao esquema OPS quando aumentamos os bits de quantização, dessa forma ficando em segundo lugar. O esquema RPS apresenta o pior desempenho entre os esquemas considerados, porém tal esquema não depende do CSI. O fato das fases θ_n serem aleatórias prejudica o desempenho do sistema, fazendo com que o impacto de cada parâmetro seja pequeno, para o caso do número de elementos refletivos da RIS, ou até mesmo nulo como para o caso de saltos desbalanceados onde foi variado m .

REFERÊNCIAS

- ABADAL, S. et al. Programmable metamaterials for software-defined electromagnetic control: Circuits, systems, and architectures. **IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems**, v. 10, n. 1, p. 6–19, 2020.
- ALOUNI, M. K. S. e M.-S. **Digital Communication Over Fading Channels**. [S.l.]: 2nd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley, 2005.
- BOULOGEORGOS, A.-A. A.; ALEXIOU, A. Pathloss modeling of reconfigurable intelligent surface assisted THz wireless systems. In: **ICC 2021 - IEEE International Conference on Communications**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–6.
- DU, H. et al. Millimeter wave communications with reconfigurable intelligent surfaces: Performance analysis and optimization. **IEEE Transactions on Communications**, v. 69, n. 4, p. 2752–2768, 2021.
- ELMOSSALLAMY, M. A. et al. Reconfigurable intelligent surfaces for wireless communications: Principles, challenges, and opportunities. **IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking**, v. 6, n. 3, p. 990–1002, 2020.
- GOLDSMITH, A. **Wireless Communication**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.
- GOMES, E. G.; OLIVO, E. E. B. Simulação e caracterização estatística de canais de desvanecimento do tipo Rayleigh. **XXXI CIC**, 2019.
- GOMES, E. G.; OLIVO, E. E. B. Simulação e caracterização estatística de canais de desvanecimento do tipo Nakagami- m . **XXXII CIC**, 2020.
- LIASKOS, C. et al. A new wireless communication paradigm through software-controlled metasurfaces. **IEEE Communications Magazine**, v. 56, n. 9, p. 162–169, 2018.
- NI, Y. et al. Performance analysis for RIS-assisted D2D communication under Nakagami- m fading. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 70, n. 6, p. 5865–5879, 2021.
- SELIMIS, D. et al. On the performance analysis of RIS-empowered communications over Nakagami- m fading. **IEEE Communications Letters**, v. 25, n. 7, p. 2191–2195, 2021.
- SHAFI, M. et al. 5g: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 35, n. 6, p. 1201–1221, 2017.
- SHAIKH, M. H. N. et al. Performance analysis of intelligent reflecting surface-assisted wireless system with non-ideal transceiver. **IEEE Open Journal of the Communications Society**, v. 2, p. 671–686, 2021.
- TANG, X. et al. Securing wireless transmissions with RIS-receiver coordination: Passive beamforming and active jamming. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 70, n. 6, p. 6260–6265, 2021.
- TAO, Q.; WANG, J.; ZHONG, C. Performance analysis of intelligent reflecting surface aided communication systems. **IEEE Communications Letters**, v. 24, n. 11, p. 2464–2468, 2020.
- VISWANATH, D. T. e P. **Fundamentals of Wireless Communication**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005.

WU, Q. et al. An overview of sustainable green 5G networks. **IEEE Wireless Communications**, v. 24, n. 4, p. 72–80, 2017.

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.

YACOUB, M. D. Nakagami- m phase-envelope joint distribution: An improved model. In: **2009 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)**. [S.l.: s.n.], 2009. p. 335–339.

ZENG, S. et al. Reconfigurable intelligent surface (RIS) assisted wireless coverage extension: RIS orientation and location optimization. **IEEE Communications Letters**, v. 25, n. 1, p. 269–273, 2021.