

Análise de desempenho de redes cooperativas assistidas por *buffer* em dispositivos para redes B5G.

VIGNON FIDELE ADANVO

OUTUBRO / 2021



ANÁLISE DE DESEMPENHO DE REDES COOPERATIVAS ASSISTIDAS POR *BUFFER* EM DISPOSITIVOS PARA REDES B5G.

VIGNON FIDELE ADANVO

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Telecomunicações, como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Telecomunicações.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Samuel Baraldi Maфра.

COORIENTADOR: Prof. Dr. Samuel Montejo Sánchez.

Adanvo, Vignon Fidèle

A221a

Análise de desempenho de redes cooperativas assistidas por buffer em dispositivos para redes B5G. / Vignon Fidèle Adanvo. – Santa Rita do Sapucaí, 2021.

85 p.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Baraldi Mafra

Co-orientador: Prof. Dr. Samuel Montejo Sánchez

Dissertação de Mestrado em Telecomunicações – Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL.

Inclui bibliografia.

1. Rádio cognitivo 2. Probabilidade de interrupção 3. Comunicação cooperativa 4. NOMA 5. Buffer. 6. Mestrado em Telecomunicações. I. Mafra, Samuel Baraldi. II. Sánchez, Samuel Montejo III. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. IV. Título.

CDU 621.39

FOLHA DE APROVAÇÃO

Dissertação defendida e aprovada em 07/10/2021, pela comissão julgadora:

Prof. Dr. Samuel Baraldi Mafra.
INATEL

Prof. Dr. Rausley Adriano Amaral de Souza
INATEL

Prof. Dr. Evelio Martín García Fernández
UFPR

Coordenador do Curso de Mestrado
Prof. Dr. José Marcos Camara Brito

*“ L’étude approfondie de la nature
est la source la plus féconde des
découvertes mathématiques.”*

Joseph Fourier

*Aos meus pais, **Rosaline e Pierre**, por sempre acreditarem em mim, por apoiarem minhas ambições, pela dedicação e esforço que me fizeram ser o homem que sou. Obrigado por pôr os meus interesses enfrente dos seus e por seu amor incondicional.*

Agradecimentos

Agradeço à minha família em especial a minha mãe e a meu pai por estarem sempre presentes quando precisei e darem-me a força para continuar com minhas aspirações.

Agradeço ao meu orientador o Prof. Dr. Samuel Baraldi Mafra, assim como meu coorientador o Prof. Dr. Samuel Montejo Sánchez por aceitarem-me e acompanharem-me com recomendações e conselhos que foram cruciais durante a minha pesquisa.

Agradeço a minha namorada Lianet Godinez Castañeda pelo apoio incondicional recebido durante minha pesquisa.

Agradeço aos meus amigos Bandiri Moise, Nelson Delgado Amador e Eligário Milton da Costa Semedo por sempre me ouvirem quando precisei e pelos conselhos recebidos.

Agradeço também à família encontrada em Santa Rita do Sapucaí, em particular Jones Marcio Nambundo, Georgino da Silva Baltazar, Daniel Alfredo Quiteque, Elvira Salvador Diogo, Flávia Larisse da Silva Fernandes, Diego Jeldu Cuba Zuñiga e Herman Cristiano Jaime.

Agradeço a Gisele Moreira dos Santos pelos conselhos recebidos desde o início da minha pesquisa.

Agradeço a FINATEL e CAPES pelo apoio financeiro recebido durante o mestrado.

Vignon Fidele ADANVO

Sumário

Sumário	vi
Lista de Figuras	viii
Lista de Tabelas	ix
Lista de Abreviaturas e Siglas	x
Lista de Símbolos	xii
Resumo	xiv
Abstract	xv
1 Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Motivação e Análise de Trabalhos Relacionados	3
1.3 Contribuições da Dissertação	6
1.3.1 Objetivo Geral	7
1.3.2 Objetivos Específicos	7
1.4 Estrutura do Documento	8
1.5 Publicações	9
2 Fundamentação Teórica	10
2.1 Comunicação Cooperativa (CC)	10
2.1.1 Esquema Cooperativo com Retransmissor	11
2.1.2 <i>Buffer</i> no Retransmissor	15
2.2 Rádio Cognitivo	16
2.3 Acesso Múltiplo Não Ortogonal (NOMA)	18
2.4 Conclusão Parcial	20
3 Análise de Desempenho de Redes Bidirecionais Assistidas por <i>Buffer</i> nos Transmissores e Retransmissor	21
3.1 Modelo de Sistema	22
3.2 Regras de Decisão e Algoritmo de Transmissão/Recepção	23
3.2.1 Cenário 1: Sem <i>Buffer</i> nos Nós	24
3.2.2 Cenário 2: Dois <i>Buffers</i> Separados no Nó Retransmissor	25

3.2.3	Cenário 3: <i>Buffer</i> Único no Nó de Retransmissão	26
3.2.4	Cenário 4: <i>Buffers</i> Separados no Retransmissor e um <i>Buffer</i> em cada Nó Transmissor	28
3.2.5	Cenário 5: <i>Buffer</i> Único no Retransmissor e <i>Buffer</i> em cada Nó Transmissor	30
3.3	Modelos Analíticos dos Cenários	33
3.3.1	Modelo Analítico sem <i>Buffer</i>	33
3.3.2	Modelos de Markov dos Cenários com <i>Buffer</i> no Retransmissor	34
3.4	Simulações e Resultados Numéricos	36
3.4.1	Resultados Numéricos e Analíticos da Probabilidade de Interrupção Individual	38
3.4.2	Resultados Numéricos e Analíticos da Probabilidade de Interrupção do Sistema	44
3.5	Conclusão Parcial	46
4	Análise de Desempenho de Rede rádio cognitivo (<i>do inglês: cognitive radio, CR</i>) Underlay com a Técnica múltiplo acesso não ortogonal (<i>do inglês: Non-orthogonal multiple access, NOMA</i>) com Seleção de Retransmissor baseada no Estado do <i>Buffer</i>	47
4.1	Modelo de Sistema	47
4.1.1	Fase de Transmissor-Retransmissor	49
4.1.2	Fase de Retransmissor-Destino Baseado em NOMA	49
4.2	Algoritmo de Seleção de enlace	51
4.3	Matriz de Transição de Estado da Cadeia de Markov	53
4.4	Resultados Numéricos	54
4.5	Conclusão Parcial	58
5	Conclusões e Propostas para Novas Pesquisas	59
5.1	Conclusões	59
5.2	Sugestões de Trabalhos Futuros	60
	Referências Bibliográficas	61

Lista de Figuras

2.1	Esquema de rede cooperativa sem enlace direto.	12
2.2	Esquema de rede cooperativa bidirecional.	13
2.3	Esquema de rede cooperativa com enlace direto.	14
2.4	Esquema de rede cooperativa com seleção de retransmissor.	14
2.5	Esquema de rede cooperativa com salto sucessivo de retransmissor.	15
2.6	Esquema de rádio cognitivo.	16
2.7	Esquema NOMA.	19
2.8	Modelo de NOMA.	19
3.1	Rede bidirecional cooperativa com <i>buffer</i> em todos os nós.	22
3.2	Os cinco cenários para avaliar o desempenho do sistema.	24
3.3	Cenário 1: Sem <i>buffer</i> nos nós.	25
3.4	Cenário 2: <i>Buffers</i> separados no nó de retransmissão.	25
3.5	Cenário 3: <i>Buffer</i> único no nó de retransmissão.	27
3.6	Cenário 4: <i>Buffer</i> separado no retransmissor e <i>buffer</i> na fonte.	29
3.7	Cenário 5: <i>Buffer</i> único no nó de retransmissão e <i>buffer</i> no nó transmissor.	32
3.8	Diagrama de estado de transição do Cenário 2.	35
3.9	Diagrama de estado de transição do Cenário 3.	36
3.10	Figura comparativa do número de pacotes transmitidos em relação à taxa de perda de pacotes para diferentes valores de relação sinal-ruído (<i>do inglês: Signal-to-Noise Ratio, SNR</i>): (a) $\rho = -10$ dB, (b) $\rho = 0$ dB, (c) $\rho = 10$ dB, (d) $\rho = 20$ dB.	38
3.11	A probabilidade de interrupção de S_1 em função da SNR para os Cenários 1, 2 e 3.	39
3.12	A probabilidade de interrupção de S_1 em função da SNR com $\mathfrak{R}_i = 1\text{bpcu}$	40
3.13	A probabilidade de interrupção de S_1 em função da taxa de transmissão alvo com uma SNR igual a 10 dB.	41
3.14	A probabilidade de interrupção de S_1 e S_2 em função da distância d_{S_1R} : a) de S_1 com uma capacidade de <i>buffer</i> igual a 3, b) de S_2 com uma capacidade de <i>buffer</i> igual a 3, c) de S_1 com uma capacidade de <i>buffer</i> igual a 6 e d) de S_2 com uma capacidade de <i>buffer</i> igual a 6. $\mathfrak{R}_i = 1$ e SNR = 10 dB.	42
3.15	Probabilidade de interrupção de S_1 para S_2 em função da SNR com $\mathfrak{R}_i = 1$ e a distância ótima do Cenário 5.	43

3.16	Probabilidade de interrupção do sistema em função de d_{S_1R} com diferentes capacidades de <i>buffer</i> : a) com a capacidade igual a duas, b) com a capacidade igual a três, c) com a capacidade igual a quatro, d) com a capacidade igual a seis. $\mathfrak{N}_i = 1$ e $\text{SNR} = 10$ dB.	44
4.1	Modelo de sistema: sistema CR-NOMA cooperativo auxiliado por <i>buffer</i> de dois saltos sujeito à restrição de energia de interferência de PU. Descrição de três cenários operacionais para avaliar o desempenho do sistema.	48
4.2	Diagrama de transição de estado para o cenário com dois retransmissores e $L = 2$	54
4.3	Probabilidade de interrupção em função de I com $a = 0.2$ para diferentes capacidades de <i>buffer</i>	55
4.4	Probabilidade de interrupção em função de a com $I = 10$ dB para diferentes capacidades de <i>buffer</i>	56
4.5	Probabilidade de interrupção em função de I com $a = 0.2$ para diferentes retransmissores operacionais.	56
4.6	Probabilidade de interrupção em função de a com $I = 10$ dB para diferentes retransmissores operacionais.	57
4.7	Probabilidade de interrupção em função de I com $a = 0.2$ para os três cenários considerados.	57
4.8	Probabilidade de interrupção em função de a com $I = 10$ dB para os três cenários considerados.	58

Lista de Tabelas

3.1	Fase de operação	23
3.2	Eventos de interrupção	34
3.3	Parâmetro do sistema do Capítulo 3	37
4.1	Método de Seleção	51
4.2	Método de Seleção de Ação	52
4.3	Estados do sistema de retransmissor com dois retransmissores e $L=2$	55

Lista de Abreviaturas e Siglas

4G	Quarta geração
5G	Quinta geração
6G	Sexta geração
AF	Amplificar e Avançar (do inglês: Amplify-and-Forward)
AWGN	Ruido aditivo Gaussiano branco (do inglês: Additive White Gaussian Noise)
B5G	Além da quinta geração
BNC	Codificação de rede em camada-bits (do inglês: bit-layer Network Coding)
BSI	Informação do estado do buffer (do inglês: buffer state information)
CC	Comunicação cooperativa (do inglês: Cooperative Communication)
CF	Comprimir e Avançar (do inglês: Compress-and-Forward)
CR	Rádio cognitivo (do inglês: cognitive radio)
CSI	Informação do estado do canal (do inglês: channel state information)
DF	Detectar e Avançar (do inglês: Detect-and-Forward)
EUA	Estados Unidos da América
FD	Full-duplex
FIFO	Primeiro a entrar primeiro a sair (do inglês: First In, First Out)
HD	Half-duplex
i.i.d	Independentes e identicamente distribuídas (do inglês: independent and identically distributed)
IoT	Internet das Coisas (do inglês: Internet of Things)
MABC	Difusão por múltiplo acesso (do inglês: Multiple Access Broadcast)
MAC	Controle de acesso médio (do inglês: medium access control)
MC	Cadeia de Markov (do inglês: Markov chain)
NOMA	Múltiplo acesso não ortogonal (do inglês: Non-orthogonal multiple access)
OP	Probabilidade de interrupção (do inglês: outage probability)
PA	Potência de alocação (do inglês: power allocation)
PDF	Função densidade de probabilidade (do inglês: probability density function)
PU	Usuário primário (do inglês: primary user)

QoE	Qualidade da Experiência (do inglês: Quality of Experience)
QoS	Qualidade de serviço (do inglês: Quality of Service)
RF	Rádio frequência
SIC	Cancelamento Sucessivo de Interferências (do inglês: Successive interference cancellation)
SINR	Relação sinal-interferência-ruído (do inglês: Signal-to-interference-pulse-noise ratio)
SNR	Relação sinal-ruído (do inglês: Signal-to-Noise Ratio)
SR	Seleção de retransmissor
SU	Usuário secundário (do inglês: secondary user)
TDBC	Difusão por divisão de tempo (do inglês: Time Division Broadcast)
TWRN	Rede cooperativa bidirecional (do inglês: two-way relay network)
uMUB	Ultrabroadband móvel ubíquo (do inglês: ubiquitous mobile ultra-broadband)

Lista de Símbolos

I_{ij}	Informação mútua entre i e j
O_{ij}	Probabilidade de outage entre i e j
$y_{ij}(t)$	Sinal recebido por j
\rightarrow	Canal unilateral
\rightleftarrows	Canal simétrico
A	Matriz de transmissão de estado da cadeia de Markov de pacotes de dados armazenados em cada buffer
a	Fator de alocação de potência
α	Fator de perda de caminho
A_{mn}	Probabilidades de transitar do estado S_n para o estado S_m
A_{nn}	Probabilidade de permanecer no mesmo estado
B_{S_1R} e B_{S_2R}	Buffers separados do relay
B_{S_1} e B_{S_2}	Buffers dos nós S_1 e S_2
S_1 e S_2	Transceptores
B_{SR}	Buffer único
D	Destino
d_{ij}	Distância entre i e j
D_p	Destino primário
D_q	Destinos secundários
E_s	Energia do sinal transmitido
K_S e $\overline{K_S}$	O estado do buffer fonte associado ao enlace disponível e indisponível respectivamente
Q_T e Q_R	Estado do buffer do retransmissor pronto para transmitir e receber respectivamente
Q_{TR}	Estado do buffer único
S	Fonte
γ_{ij}	Relação sinal-ruído instantânea entre i e j
$\gamma_{R_k D_1, D_1}$	Relação sinal-ruído de D_1 percebida por D_1
$\gamma_{R_k D_q, D_2}$	Relação sinal-interferência-ruído instantânea de D_2 percebida por D_q
h_{ij}	Envelope do desvanecimento entre i e j
I	Limite de interferência aceito por D_p
I	Matriz de identidade
i e j	Índices do transmissor e do receptor
k	Índice do retransmissor
L	Capacidade dos buffers
λ_{ij}	Potência média entre i e j

L_{\max}	Retransmissor de \mathcal{T} com mais pacotes no buffer
L_{\min}	Retransmissor de \mathcal{R} com menos pacotes no buffer
δ	Quantidade de time slot por frame
N	Capacidade do buffer único
N_0	Densidade espectral do ruído
NP e \overline{NP}	Pacote gerado no enlace disponível e indisponível respectivamente
ψ_T e ψ_R	Número do pacote a ser transmitido e recebido respectivamente
$n(t)$	Ruído aditivo Gaussiano branco
\mathcal{O}	Probabilidade média de outage
$\mathcal{O}_{R_k D}$	Probabilidade de outage do par
v_{S_1} e v_{S_2}	A quantidade de pacote em B_{SR} destinado a S_1 e a S_2 respectivamente
v_e	A quantidade de pacotes em B_{SR} destinado ao receptor com o enlace indisponível
π	Probabilidades de estado estacionário
%	Por cento
P_i	Potência de transmissão do transmissor i
$\mathcal{O}_{R_1}^{link*}$	Probabilidade de escolha o retransmissor R_1
$\mathcal{O}_{R_2}^{link}$	Probabilidade de escolher o canal fonte-retransmissor
Ψ_n	Conjunto de links disponíveis do estado S_n .
Ψ_n^s	Conjunto de link de sucesso do estado S_n
q	Índice dos destinos secundários
\mathfrak{R}_i	Taxa de transmissão alvo
R	Retransmissor
R_k	Retransmissor secundários
RX	Decisão de receber
$x(t)$	Sinal de símbolo transmitido com energia unitária
SP	Pacote armazenado
\mathcal{T} e \mathcal{R}	Conjunto que contém os <i>relays</i> capazes de transmitir e receber respectivamente
TX	Decisão de transmitir
ϕ	Conjunto vazio
w_q	Índice de componente do ruído aditivo Gaussiano branco em D_q
x_1 e x_2	Informação para o destino correspondente a D_q
y_q	Informação recebida em D_q

Resumo

Vignon Fidele, A. Análise de desempenho de redes cooperativas assistidas por *buffer* em dispositivos para redes B5G. [dissertação de mestrado]. Santa Rita do Sapucaí: Instituto Nacional de Telecomunicações; 2021.

A tecnologia da quinta geração (5G) e os requisitos previstos para a sexta geração (6G) são cada vez mais rigorosos quanto à confiabilidade e ao incremento da taxa de transmissão nas redes de comunicação móvel. Várias propostas estão sendo implementadas e discutidas para atender a esses requisitos. Dentre essas propostas, tem-se o uso de *buffer* na comunicação cooperativa, cujo uso adequado permite que os usuários experimentem uma comunicação altamente confiável.

Nesta dissertação, analisa-se o uso de *buffer* nos dispositivos e propõem-se diferentes estratégias de uso do mesmo para redes cooperativas. Em particular, os esquemas propostos são avaliados em rede bidirecional e em rede cognitiva com a técnica acesso múltiplo não ortogonal (*do inglês: Non-orthogonal multiple access, NOMA*) em termos da probabilidade de interrupção (*do inglês: outage probability, OP*).

Em primeiro lugar, considera-se um esquema de rede cooperativa bidirecional com um salto composto por dois transceptores e um *relay*. Investiga-se nele o uso de *buffer* tanto no *relay* quanto na fonte com diferentes estratégias. Entre as estratégias propostas incluem-se o uso de *buffer* único no *relay* e o uso de *buffer* em todos os nós da rede bidirecional. Para as propostas apresentadas, avalia-se o impacto da potência de transmissão, da taxa de transmissão e da posição do *relay* em relação ao transmissor em termos da OP. Obtém-se menor OP em relação às estratégias existentes. Além disso foi proposto um algoritmo onde um aumento do número de pacotes recebidos foi alcançado.

Em segundo lugar, considera-se um esquema de rede cognitiva *underlay* baseado na técnica NOMA usando a seleção de *relay* assistida pelo estado de *buffer* e de enlace. Melhor desempenho do sistema em termos da OP foi alcançado com uma escolha adequada do fator de alocação de potência na fase de retransmissão.

Em geral, para os cenários investigados, um melhor desempenho do sistema em termos da OP foi alcançado com uma escolha adequada da capacidade do *buffer* e da localização do(s) retransmissor(es).

Palavras-Chave: Rádio cognitivo, Probabilidade de interrupção, Comunicação cooperativa, NOMA, Buffer, Rede bidirecional.

Abstract

Vignon Fidele, A. Análise de desempenho de redes cooperativas assistidas por *buffer* em dispositivos para redes B5G. [dissertação de mestrado]. Santa Rita do Sapucaí: Instituto Nacional de Telecomunicações; 2021.

The fifth-generation (5G) technology and the requirements foreseen for the sixth-generation (6G) are increasingly strict regarding reliability and transmission speed increase in mobile communication networks. Several proposals are being implemented and discussed to meet these requirements. Among these proposals, there is the use of a buffer in cooperative communication. Proper use of it allows users to experience highly reliable communication.

In this dissertation, the use of buffer in devices is analyzed and different strategies for using it for cooperative networks are proposed. In particular, the proposed schemes are evaluated in a bidirectional network and a cognitive network with the Non-orthogonal multiple access (NOMA) technique in terms of the outage probability.

First, a bidirectional cooperative network scheme with a hop composed of two transceiver and a relay is considered. It investigates the use of buffer both in the relay and in the source with different strategies. Among the proposed strategies are the use of a single buffer in the relay and the use of a buffer in all nodes of the bidirectional network. For the proposals presented, the impact of the transmission power, the transmission rate and the position of the relay in relation to the transmitter in terms of outage probability is evaluated. Less outage probability is obtained in relation to existing strategies. For the bidirectional network analyzed, an algorithm was proposed where an increment in the number of packets received in each time slot was achieved.

Second, a cognitive underlay network scheme based on the NOMA technique using buffer and link state assisted relay selection is considered. Better system performance in terms of outage probability was achieved with an adequate choice of power allocation factor in the retransmission phase.

In general, for the investigated scenarios, a better system performance in terms of outage probability was achieved with an adequate choice of buffer capacity and the location of the relay(s).

Keywords: Cognitive radio, Outage probability, Cooperative communication, NOMA, Buffer, Bidirectional network.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

O crescimento acelerado do número de usuários e a necessidade de aumentar a taxa de transmissão de dados são alguns dos principais motivos que impulsionaram uma evolução tecnológica das redes de comunicações móveis celulares [1]. Entre as que podem ser citadas estão a rede de quarta geração (4G) [2, 3] ainda em uso em grande parte do mundo e a atual quinta geração (5G) [4, 5] em fase de maturidade. Este crescimento do número de usuários é refletido no relatório [6], em que estimam-se 8.8 bilhões de assinaturas móveis até o final de 2026 sendo 7.9 bilhões atualmente em uso. Em várias partes do mundo, as redes 5G já começaram a ser implementadas, principalmente na Europa, nos Estados Unidos da América (EUA) e na China. O 5G promete uma taxa de transmissão de dados de até 10 Gbps com latência de 1 ms acelerando ainda mais o crescimento do tráfego de dados [7, 8]. Embora a tecnologia 5G não tenha sido totalmente explorada em algumas regiões do mundo, várias investigações começaram na nova rede móvel da próxima geração que será chamado sexta geração (6G) que já se encontra em fase de desenvolvimento [9–12]. Dentre os requisitos esperados ou as possíveis capacidades da rede 6G extraídos de [11] estão os seguintes:

- Pico de taxa de dados maior que 100 Gbps ;
- Latência menor que 1 ms ;
- Taxa de dados de experiência do usuário maior que 10 Gbps;
- Uma sensibilidade de recepção menor que -130 dBm;
- Uma eficiência espectral três vezes maior em relação ao 5G;
- Uma eficiência energética dez vezes maior em relação ao 5G.

Os diferentes desafios impostos pelos requisitos especificados da tecnologia 6G

estão sendo desenvolvidos por pesquisadores por todo mundo através de novas soluções tecnológicas ou melhorias nas tecnologias existentes. De acordo com [9], dentre as soluções promissoras estão as tecnologias de coleta de energia, a *blockchain* para uma segurança descentralizada [13], a comunicação de luz visível para a tecnologia 6G [14], a conectividade ubíqua integrando redes de comunicação por satélite e as comunicações subaquáticas para fornecer cobertura global [9]. No entanto, de acordo com [15], a comunicação cooperativa (*do inglês: Cooperative Communication, CC*) é amplamente investigada na 5G e é considerada junto com a técnica full-duplex (FD) uma técnica promissora nas redes ubíquas além da quinta geração (B5G)/6G, como as redes cognitivas, a internet das coisas (*do inglês: Internet of Things, IoT*) e a transmissão cooperativa por satélite e terrestre.

A CC permite que nós distribuídos em uma rede sem fio colaborem uns com os outros a fim de realizarem uma forma de diversidade espacial para combater os efeitos prejudiciais do desvanecimento [16]. Geralmente, em uma CC, são usados os retransmissores em uma posição fixa para uma cobertura mais ampla da rede e para aumentar o ganho de diversidade. Além disso, com o uso de retransmissores, os transmissores podem enviar o sinal com menor potência de transmissão em relação ao esquema convencional, obtendo assim uma melhor eficiência energética [17]. Sendo assim, a CC pode aumentar a confiabilidade e elevar a qualidade do serviço oferecido quando o retransmissor é usado adequadamente.

Adicionalmente, um serviço de alta confiabilidade pode ser obtido reduzindo a perda de dados durante uma transmissão na camada física. A perda de dados pode ocorrer quando o usuário móvel da rede desloca-se experimentando uma forte variação de canal, ou quando as condições meteorológicas são infavoráveis à comunicação sem fio ou ainda na presença dos obstáculos, tais como edifícios ou árvores [18, 19]. Além disso, um usuário móvel pode experimentar perdas de dados quando a relação sinal-ruído instantânea é menor que a relação sinal-ruído requerida [19]. Para resolver estes desafios, o *buffer* foi introduzido como uma ferramenta promissora. O uso adequado do mesmo em CC possibilita a retenção temporária das informações à espera de uma melhor condição de canal antes de realizar a transmissão [20], e com isso reduzir a perda de dados no sistema. Esta melhoria pode atender a um dos requisitos da 6G que abrange a questão do aumento da taxa de transmissão de dados e a obtenção de uma comunicação confiável. Além disso, a técnica de múltiplo acesso não ortogonal (*do inglês: Non-orthogonal multiple access, NOMA*) foi proposta com o objetivo de aumentar a taxa de transmissão e melhorar a eficiência espectral e energética.

A técnica NOMA usa principalmente o domínio de potência para acesso múltiplo. Além da técnica NOMA no domínio de potência, pode-se encontrar na literatura

também a técnica NOMA no domínio de código. A técnica NOMA no domínio de potência usa principalmente níveis de potência de maneira sobreposta para enviar a mensagem, enquanto a técnica NOMA no domínio do código usa níveis de código para enviar a mensagem. Essa técnica permite melhorar significativamente a eficiência espectral e a taxa de transmissão [21]. Os usuários desta rede decodificam suas mensagens usando a técnica cancelamento sucessivo de interferências (*do inglês: Successive interference cancellation, SIC*) [21–23]. O uso adequado de NOMA não só proporciona maiores benefícios em termos do incremento da capacidade do sistema [21], mas também permite atingir uma melhor eficiência espectral e energética na comunicação sem fio principalmente na rede 5G [24, 25] e futuramente na 6G [26]. No entanto, o uso ineficiente de espectro alocado foi demonstrado em [27]. A fim de melhorar a eficiência do uso do espectro, uma nova proposta de alocação foi feita chamada de rádio cognitivo (*do inglês: cognitive radio, CR*).

O CR permite que os dispositivos cognitivos de um sistema de comunicação sem fio detectem uma faixa de frequência licenciadas e a usem oportunisticamente desde que não prejudiquem os usuários não cognitivos. Dentre os protocolos mais encontrados na literatura, podem ser citados os protocolos *underlay*, *overlay* e *interweave* [28]. No protocolo *underlay*, os usuários cognitivos se comunicam apenas enquanto sua interferência aos usuários não cognitivos estiver abaixo de um limite determinado. Já no protocolo *overlay*, os usuários cognitivos se comunicam simultaneamente com os usuários não cognitivos usando o conhecimento da mensagem e o ganho do canal da rede não cognitiva para auxiliá-la. Finalmente, no protocolo *interweave*, os usuários cognitivos só transmitem suas informações quando detectarem uma frequência de rádio não utilizada ou aberta dos usuários não cognitivos. O usuário cognitivo deve liberar a frequência de imediato quando os usuários não cognitivos se comunicam por meio da mesma. De acordo com [29, 30], os três protocolos mostraram sua eficiência principalmente no uso eficiente do espectro alocado.

1.2 Motivação e Análise de Trabalhos Relacionados

Os usuários em uma comunicação sem fio podem experimentar uma falha na comunicação ou perda de informações devido a diversos fatores, dentre eles o desvanecimento. Isso acontece quando o sinal enviado pelo transmissor percorre múltiplo caminho no meio de propagação possibilitando no receptor uma falha na decodificação da mensagem. No entanto, a rede cooperativa pode fornecer um serviço confiável e combater os efeitos de sombreamentos e desvanecimentos [31]. Geralmente, nesta rede cooperativa, quando o canal de retransmissão está indisponível, a informação a

ser retransmitida é perdida. Para superar essa limitação, um *buffer* de dados é incluído no retransmissor para armazenar temporariamente as informações ao custo da tolerância de atraso de pacote [20]. Essa proposta promete reduzir ainda mais a falha na comunicação em comparação com as redes cooperativas convencionais proporcionando uma comunicação ainda mais confiável [20].

A comunicação cooperativa bidirecional foi introduzida como uma técnica eficiente principalmente em termos de *time slot* quando dois nós desejam trocar informações por meio de um retransmissor. Isso porque, nessa rede, além de proporcionar uma diversidade espacial, permite enviar informações em menos tempo em comparação a duas comunicações direcionais. Além disso, a rede de CR com a técnica NOMA foi introduzida com o objetivo de alcançar uma maior eficiência energética e espectral [32]. Isso porque, a técnica de CR permite que os usuários não licenciados usem oportunisticamente as frequências licenciadas desde que não prejudiquem aos usuários licenciados e a técnica NOMA permite que vários usuários usem o mesmo recurso em termos de tempo, frequência e espaço. Neste dissertação, a rede cooperativa bidirecional e a rede cognitiva como a técnica NOMA serão analisadas indistintamente.

Em [33], os autores exploram o uso de *buffers* fixos e dinâmicos no retransmissor por meio de uma rede de retransmissão em ambientes de desvanecimento lento. Nele, foi investigado o impacto da vazão, do atraso médio dos pacotes e da perda de informação proporcionado pelo uso do *buffer*. Os autores mostram que, para o ambiente de desvanecimento investigado, os modelos propostos oferecem melhor desempenho em termos de capacidade da rede em relação aos esquemas convencionais, ou seja, os esquemas sem *buffer*. Apesar desse benefício, observou-se um atraso maior devido ao uso de *buffer*, uma vez que a informação que chega ao retransmissor deve ser armazenada antes de ser convenientemente retransmitida. Já em [34,35], os autores investigam a rede cooperativa bidirecional (*do inglês: two-way relay network*, TWRN) assistida por *buffer* com uma taxa de transmissão fixa. Foi verificada a eficiência do uso de *buffer* no retransmissor na TWRN para aplicações tolerantes ao atraso [34] e não tolerantes ao atraso [35]. Adicionalmente, em [36] os autores estudam a vazão e o atraso do sistema em uma TWRN FD. A novidade em [36] é que o protocolo adaptativo proposto combina os estados do *buffer*, o enlace com perdas e a probabilidade de interrupção (*do inglês: outage probability*, OP) para decidir transmitir, receber, ou transmitir e receber. Com esta combinação, foi possível maximizar o desempenho da vazão da rede. Adicionalmente, em [37] o autor realiza uma análise baseada na aprendizagem por reforço multiagente. Esse novo recurso usa vários agentes com base na combinação do enlace com perdas e dos estados do *buffer* onde foi possível maximizar o desempenho em termos da OP. A OP é dada pela probabilidade do evento em que a

informação mútua é menor que a taxa de transmissão alvo.

A codificação de rede em camada física permite, no nível de controle de acesso ao meio, que dois ou mais pacotes possam ser combinados antes de serem enviados [38]. Em [39], os autores realizam uma análise de *buffer* finito em uma rede de retransmissor bidirecional mediante a codificação em XOR das mensagens no retransmissor, onde ficou claro que, para um tamanho de *buffer* limitado, a codificação XOR permite reduzir a ocupação do *buffer*. Além disso, em [40, 41], os autores realizam uma pesquisa sobre a importância de codificar a mensagem antes de transmiti-la com diferentes protocolos de transmissão. Em [40], é usado uma programação de transmissão aprimorada, que leva uma consideração conjunta do *buffer* de retransmissão finito, sobrecarga de sinalização e as perdas de enlace em um esquema de codificação de rede. Essa estratégia conseguiu melhorar a eficiência da transmissão e evitar o estouro do *buffer* em comparação às estratégias usadas em [39]. Por outro lado, em [41], o protocolo codificação de rede em camada-bits (*do inglês: bit-layer Network Coding, BNC*) foi implementado para realizar uma proposta baseada no modelo de Markov. Para uma configuração de tamanho de *buffer* razoável, um equilíbrio foi encontrado entre o desempenho da vazão e o atraso da fila. Esta abordagem conseguiu aumentar a vazão e diminuir o consumo energético em comparação com [40]. Além disso, em [42], os autores usam um modelo híbrido composto pela informação do estado do canal/informação de estado de *buffer* (CSI/BSI) para propor um protocolo baseado em um esquema de transmissão seletiva com estados da cadeia de Markov no retransmissor. Um melhor desempenho da vazão foi obtido nesta proposta em relação aos obtidos em [40, 41].

Em [43] e [44], a OP de uma rede de rádio cognitivo *underlay* baseadas em técnica NOMA é investigada em dois cenários diferentes. Em [43], os autores restringem a potência de transmissão do retransmissor enquanto consideram que a fonte não interfere no usuário primário (*do inglês: primary user, PU*) devido ao seu distanciamento suficiente. O coeficiente de potência de alocação (*do inglês: power allocation, PA*) ótimo que melhora o desempenho do sistema foi encontrado em [43]. Diferentemente de [43], em [44] os autores restringem a potência de transmissão da fonte e consideram que o retransmissor não interfere no PU devido ao seu distanciamento suficiente. O coeficiente de PA ótimo que melhora o esquema é determinado. Adicionalmente, [44] é expandido para [45], onde os autores consideram um esquema de seleção parcial de retransmissor em uma rede de rádio cognitivo *underlay* baseada em técnica NOMA com restrição da potência de transmissão da fonte e consideram que o retransmissor não interfere no PU. Os autores mostraram que o fator PA e o número de retransmissores têm um grande impacto no desempenho da probabilidade de interrupção.

Por outro lado, em [46], os autores propuseram dois modelos com memória interna, o protocolo max-max e o modelo híbrido, que proporcionam maior benefício e flexibilidade na seleção do retransmissor. Adicionalmente, em [47] os autores propõem um esquema max-link com seleção de retransmissor auxiliado por *buffer* e que programa as transmissões apenas através do enlace de canal mais forte disponível. Mesmo que essa proposta tenha um atraso significativo para um tamanho de *buffer* elevado, uma melhor diversidade de ganho é alcançada. Para reduzir esse atraso causado, em [48] os autores apresentaram um esquema de seleção de retransmissor baseado em estado de *buffer* em um sistema de retransmissor cooperativo assistido por *buffer*. Foi realizada uma análise sobre a OP, onde verifica-se os benefícios do uso do retransmissor assistido por *buffer*. Esse esquema proposto melhora o atraso causado pelo sistema em relação ao esquema de [47].

1.3 Contribuições da Dissertação

A fim de superar as limitações da rede cooperativa bidirecional, o uso de *buffer* é introduzido no nó retransmissor em [36, 37, 42]. Com esta estratégia, o retransmissor pode armazenar temporariamente as informações recebidas sempre que o canal de retransmissão estiver indisponível e conseqüentemente, atingir uma diversidade espacial. As estratégias de uso de *buffer* no retransmissor na rede cooperativa bidirecional encontradas na literatura implementam dois *buffers* separados para cada direção. No entanto, em determinado momento da transmissão, essa estratégia pode apresentar desproporcionalidade na ocupação do *buffer*, gerando uma interrupção por falta de espaço no mesmo. Devido a isso, nesta dissertação se considera uma análise sobre o impacto do uso de *buffer* único no retransmissor na rede cooperativa bidirecional. Adicionalmente, quando a relação sinal ruído instantânea de todos os canais da rede bidirecional é menor do que a relação sinal ruído requerida, geralmente todas as informações transmitidas não são capazes de chegar ao destino com sucesso. Para contornar isso, nesta dissertação será introduzido o uso de *buffer* nos nós transmissores. Conseqüentemente, consegue-se que na referida condição do canal, os transmissores possam armazenar temporariamente as informações a serem transmitidas.

Por outro lado, apesar dos bons resultados obtidos em [36, 37, 42] quanto ao atraso e à probabilidade de interrupção no uso de *buffer* na rede bidirecional investigada, estes trabalhos apresentam uma deficiência em relação ao uso do espectro disponível. Isso porque, os autores não exploram totalmente os espectros disponíveis quando apenas um enlace está disponível. Além disso, espera-se que a nossa proposta de uso de *buffer* nos nós transmissores aumente o atraso do pacote no sistema. Portanto, nesta

dissertação considera-se uma formulação de um algoritmo para cada cenário investigado na rede cooperativa bidirecional que será capaz de aumentar o número de transmissões por *time slot*. Com isso, espera-se reduzir o atraso de pacote e alcançar um uso eficiente do espectro disponível.

Em [43–45], foi demonstrado que o CR com a técnica NOMA pode proporcionar uma maior eficiência energética e espectral. Além disso, a seleção de retransmissor foi introduzida como uma técnica cooperativa eficiente, tendo como principal vantagem a simplicidade de implementação, uma vez que não requer de um transmissor complexa da camada física [48]. Por este motivo, nesta dissertação considera-se avaliar um esquema de rede de CR com a técnica NOMA assistido por *buffer* no retransmissor com seleção de retransmissor.

1.3.1 Objetivo Geral

Propor um modelo de uso de *buffer* mais generalizado em termos de dispositivos com *buffer* e uma estratégia de uso do mesmo capaz de elevar a robustez nas redes cooperativas.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Investigar o uso de *buffer* nas redes cooperativas em geral e em particular na rede cooperativa bidirecional bem como na rede cognitiva com técnica NOMA;
2. Propor diferentes estratégias de uso do *buffer* no transmissor/retransmissor na rede cooperativa bidirecional para elevar a confiabilidade sem incrementar o custo do hardware;
3. Propor uma estratégia de transmissão e retransmissão baseada nas informações do estado de *buffer* e de canal para reduzir a perda dos pacotes na rede cooperativa bidirecional;
4. Propor uma estratégia de seleção de retransmissor na rede cognitiva com a técnica NOMA investigada, capaz de selecionar em condição idêntica do canal o retransmissor que causa a menor interferência ao usuário primário na fase de transmissão/retransmissão, aproveitando assim a eficiência espectral e energética que esta rede fornece;
5. Avaliar os esquemas propostos e compará-los com os existentes em termos da probabilidade de interrupção.

Desta forma, as contribuições desta dissertação podem ser resumidas em três grandes partes principais:

1. Para o esquema de rede cooperativa bidirecional:
 - Propor e avaliar o uso de *buffer* único no retransmissor;
 - Propor e avaliar com diferentes estratégias o uso de *buffer* no nó retransmissor e transmissor baseado no estado de *buffer* e do enlace;
 - Propor um algoritmo capaz de aumentar a quantidade de pacotes recebidos.
2. Para o esquema de rede de CR com a técnica NOMA:
 - Reformular o esquema de seleção de retransmissor com base no estado do *buffer* apresentado em [48], para melhorar o desempenho do sistema em termos da probabilidade de interrupção;
 - Ao contrário de [45], aqui foram implementados dois retransmissores selecionados pelo estado do *buffer* e pela disponibilidade do canal;
 - Estender os esquemas de [43, 44], considerando que tanto o transmissor quanto o retransmissor são limitados pelo limite de interferência do PU;
 - Modelar por cadeia de Markov, os estados dos retransmissores em relação aos números dos pacotes.
3. Determinar a posição ideal do(s) retransmissor(es) e o tamanho do *buffer* adequado nas duas redes cooperativas investigadas capazes de fornecer melhor desempenho em termos de probabilidade de interrupção.

1.4 Estrutura do Documento

O restante do documento está estruturado da seguinte forma.

No Capítulo 2, são realçados os fundamentos teóricos de diferentes tecnologias entre as quais, a comunicação cooperativa, o uso de *buffer* na rede cooperativa sem fio, o rádio cognitivo e a técnica NOMA. Nele pôde-se destacar as aplicações existentes dessa tecnologia e com essa base enriquecer o trabalho.

Por outro lado, no Capítulo 3 são apresentados um modelo de uso de *buffer* no retransmissor e no transmissor baseado no estado de *buffer* e de enlace em uma rede cooperativa bidirecional. Nele é avaliado o desempenho dos diferentes esquemas propostos por meio da OP. Adicionalmente é desenvolvido um algoritmo que incrementa a quantidade de pacote transmitido por *time slot* em cada esquema. Também são apresentados os resultados obtidos sobre o impacto da distância, da potência de transmissão e da taxa de transmissão alvo sobre probabilidade de interrupção. As análises são realizadas por meio da cadeia de markov (*do inglês: Markov chain*, MC) e por simulação de Monte Carlo.

No Capítulo 4 é analisado uma esquema de seleção de retransmissor com base no estado do *buffer* em redes de rádio cognitivo *underlay* baseadas na técnica NOMA. Nele, é apresentado um algoritmo de seleção do retransmissor e em seguida os resultados numéricos obtidos são mostrados.

Finalmente apresentam-se as conclusões finais no Capítulo 5.

1.5 Publicações

Os seguintes artigos foram produzidos como resultado das pesquisas relacionadas a este trabalho:

- ❶ **Outage Performance of Buffer-State-Based Relay Selection in Underlay CR-NOMA Networks.** Aceito e publicado em XXXVIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE TELECOMUNICAÇÕES E PROCESSAMENTO DE SINAIS. Florianópolis, SC, 2020.
- ❷ Artigo a ser submetido: **Outage Performance of Two-Way Relay Networks with Different Buffer Strategies.**

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Neste capítulo, são apresentados diferentes esquemas de rede cooperativa, assim como as definições de informação mútua e de probabilidade de interrupção. Além disso, é definido o conceito de *buffer* de dado e seu uso nas redes cooperativas. Finalmente, são apresentados brevemente os principais conceitos de rádio cognitivo e da técnica NOMA.

2.1 Comunicação Cooperativa (CC)

A comunicação cooperativa originou-se do trabalho [49] em um esquema de canal de retransmissão. Neste esquema, são considerados um nó transmissor, um nó retransmissor e um nó receptor para realizar a comunicação. O propósito principal é conseguir uma cooperação entre os usuários da rede por meio deste esquema. No entanto, o mesmo foi modificado em diferentes trabalhos [16, 50] de acordo com a finalidade da rede.

A rede cooperativa permite aumentar a qualidade de serviço eficaz por meio da cooperação [16] beneficiando assim aos usuários da mesma. A qualidade de serviço eficaz pode ser medida na camada física pela taxa de erro de bit, pela taxa de erro de símbolo ou pela probabilidade de interrupção. Recentemente, a CC tem sido objeto de várias investigações principalmente em redes de sensores [51], em IoT [52], em comunicação por satélite e em redes móveis [53]. Na próxima subseção, serão apresentados os métodos de retransmissão e os esquemas cooperativos mais emblemáticos encontrados na literatura.

2.1.1 Esquema Cooperativo com Retransmissor

A cooperação em uma rede sem fio pode ser alcançada por meio do uso de um retransmissor. Frequentemente, o retransmissor é usado em um ponto fixo entre o transmissor e o receptor para receber e reencaminhar o símbolo enviado pelo transmissor. No entanto, a cooperação em uma rede sem fio pode também ser alcançada entre os usuários da mesma sem a necessidade de implementar um retransmissor em um ponto fixo. Para tal, os nós transmissores (usuários) podem, além de enviar suas próprias informações, atuar como nós retransmissores para enviar as informações dos usuários cooperativos. Nessas duas formas de cooperação, os retransmissores devem ter funções simples, como encaminhamento de sinal e roteamento simples. O método como esses retransmissores redirecionam a mensagem recebida pode ser dividida em: amplificar e avançar (*do inglês: Amplify-and-Forward*, AF), detectar e avançar (*do inglês: Detect-and-Forward*, DF) e comprimir e avançar (*do inglês: Compress-and-Forward*, CF).

Método de Retransmissão

Os principais métodos de retransmissão cooperativa explorados na literatura são: AF, DF, e CF. No método AF, o retransmissor amplifica o símbolo recebido e reencaminha para o próximo nó ou para seu destino [54]. Essa etapa é realizada por uma adição simples de símbolos e não requer cálculos adicionais devido à sua simplicidade. Já no método DF, o retransmissor decodifica as mensagens do nó transmissor antes de recodificá-las para retransmitir [55]. Ao contrário de AF, o método DF requer os livros de código completos dos nós transmissores e muitos cálculos no retransmissor [56]. No método CF, o retransmissor comprime o sinal recebido e logo retransmite. Ao contrário de DF, a implementação de CF não requer os livros de código dos nós transmissor, mas requer a distribuição de saída do canal do retransmissor [57]. Em [58], o desempenho em termos da probabilidade de interrupção dos três métodos de retransmissão foi comparado de forma unificada. Os autores demonstram que bons desempenhos em termos de OP obtêm-se no método DF em comparação com CF e AF. Por essa razão, nesta dissertação, implementa-se o método de retransmissão DF.

Esquemas com um retransmissor

Existem diferentes esquemas de rede cooperativa baseadas no uso de um único retransmissor. A Figura 2.1 mostra uma delas que é composta pelo transmissor, retransmissor e receptor. Nesse esquema, o nó transmissor se comunica com o receptor por meio do retransmissor. Porém, não há um enlace direto entre o transmissor e o recep-

tor. Os canais de comunicação envolvidos podem estar sujeitos a diversos fenômenos por exemplo o desvanecimento. O desvanecimento acontece quando um sinal transmitido em um canal sem fio percorre múltiplos percursos, que ocasiona variações na potência instantânea do sinal recebido.



Figura 2.1: Esquema de rede cooperativa sem enlace direto.

Este esquema opera em modo *full-duplex (FD)* ou em *half-duplex (HD)*. A técnica FD permite a um nó transmitir e receber ao mesmo tempo e na mesma banda de frequência. Porém a técnica HD permite a um nó transmitir ou receber na mesma banda de frequência, em tempos diferentes. O restante do documento considera apenas o modo HD.

O sinal recebido pelo retransmissor ou pelo receptor é expresso por:

$$y_{ij}(t) = h_{ij}\sqrt{E_s}x(t) + n(t), \quad (2.1)$$

onde $ij \subset \{S, R, D\}$, $i \neq j$, o elemento i é o transmissor e o elemento j o receptor, h_{ij} é o ganho do canal correspondente, E_s é a energia do sinal transmitido pelo transmissor correspondente, $x(t)$ é um sinal de símbolo transmitido com energia unitária e $n(t) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ representa o ruído aditivo Gaussiano branco (*do inglês: Additive White Gaussian Noise, AWGN*) complexo com variância $\sigma^2 = N_0$, onde N_0 é a potência de ruído unilateral. A relação sinal-ruído (*do inglês: Signal-to-Noise Ratio, SNR*) instantânea de cada enlace é expressa por [59]:

$$\gamma_{ij} = \rho |h_{ij}|^2, \quad (2.2)$$

onde $\rho = \frac{P_i}{N_0}$ é a SNR, P_i é a potência de transmissão do transmissor. A informação mútua de cada enlace é expressa por:

$$I_{ij} = \frac{1}{\delta} \log(1 + \gamma_{ij}), \quad (2.3)$$

onde δ é a quantidade de transmissões a ser realizada por *time slot*. Em particular, $\delta = 2$ para a Figura 2.1. A probabilidade de interrupção é dada pela probabilidade do evento em que a informação mútua é menor que a taxa de transmissão alvo.

$$\mathcal{O}_{ij} = \mathcal{P}(I_{ij} < \mathfrak{R}_i) \quad (2.4)$$

onde \mathfrak{R}_i é a taxa de transmissão alvo.

A Figura 2.2 mostra um esquema de rede cooperativa bidirecional. Os nós terminais são transceptores, ou seja, podem ser considerados como transmissor e receptor. A comunicação acontece em ambas as direções através do retransmissor. Os dois principais protocolos de transmissão mais explorados na literatura neste esquema são a difusão por divisão de tempo (*do inglês: Time Division Broadcast, TDBC*) e difusão por múltiplo acesso (*do inglês: Multiple Access Broadcast, MABC*). A TDBC consiste em três fases de transmissão, duas para a transmissão da mensagem através das fontes e uma para a difusão da mesma através do retransmissor. Neste protocolo, apenas um nó pode transmitir em uma fase. Já o MABC consiste em duas fases de transmissão, uma para a transmissão simultânea de mensagens através dos nós de origem e outra para sua difusão pelo retransmissor [60]. Esta dissertação considera o TDBC.

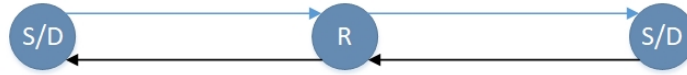


Figura 2.2: Esquema de rede cooperativa bidirecional.

A SNR, a informação mútua e a probabilidade de interrupção de cada enlace são expressas usando as Equações (2.2), (2.3), (2.4), respectivamente. A probabilidade de interrupção individual de acordo com [61] pode ser descrita por:

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{ij} &= \mathcal{P}(\min\{I_{ir}, I_{rj}\} < \mathfrak{R}_i) \\ &= \mathcal{P}\left[|h_{ir}|^2 < \frac{\alpha_i - 1}{\rho_i}\right] + \mathcal{P}\left[|h_{ir}|^2 \geq \frac{\alpha_i - 1}{\rho_i}\right] \mathcal{P}\left[|h_{rj}|^2 < \frac{\alpha_r - 1}{\rho_r}\right] \end{aligned} \quad (2.5)$$

onde $i \neq j$, $\rho_r = P_r/N_0$, $\rho_i = P_i/N_0$, $\alpha_i = 2^{3\mathfrak{R}_i}$ e \mathfrak{R}_i é a taxa de transmissão alvo de i e j .

A Figura 2.3 mostra um esquema de rede cooperativa em que há um enlace direto entre o transmissor e o receptor. Este esquema pode ser usado na rede sem fio para estabelecer um caminho alternativo por meio do enlace de retransmissão quando a SNR instantânea do enlace direto é menor do que a relação sinal ruído requerida. A SNR, a informação mútua e a OP de cada enlace neste esquema podem ser expressas de acordo com as Equações (2.2), (2.3) e (2.4), respectivamente.

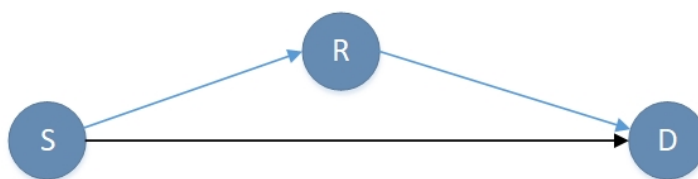


Figura 2.3: Esquema de rede cooperativa com enlace direto.

Esquemas com Vários Retransmissores

A Figura 2.4 mostra um esquema de comunicação cooperativa com seleção de retransmissor. Este esquema é considerado como uma solução atrativa para melhorar o desempenho das redes cooperativas convencionais. Por exemplo, os nós de retransmissão estão localizados em diferentes posições em redes sem fio cooperativas de tal forma que o sinal transmitido passa por diferentes rotas, o que causa diferentes atenuações nos sinais recebidos no destino. Este fenômeno reduz o desempenho geral do sistema. Portanto, rotas de alta qualidade devem ser escolhidas usando técnicas de seleção de retransmissor para minimizar esse efeito e beneficiar-se da comunicação cooperativa.

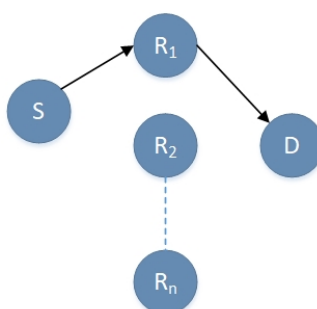


Figura 2.4: Esquema de rede cooperativa com seleção de retransmissor.

Os autores em [62] exploram, além das técnicas de seleção de retransmissor, que um ganho de diversidade pode ser alcançado com a seleção de retransmissor em uma rede cooperativa. A SNR, a informação mútua e a OP de cada enlace são descritas pelas Equações (2.2), (2.3) e (2.4), respectivamente. No entanto, a OP do sistema é expressa de acordo com a técnica de seleção de retransmissor usada, a mesma será abordada no Capítulo 4.

Na Figura 2.5, o transmissor envia as informações ao receptor através de múltiplos retransmissores. Este esquema pode ser aplicado na rede veicular onde existe uma comunicação cooperativa entre mais de três veículos [63]. De igual forma como nos outros esquemas, a SNR, a informação mútua e a OP de cada enlace são expressas com as mesmas equações. A OP do sistema é expressa pela média ponderada do conjunto de três (transmissor, retransmissor, receptor). Como mostra a Figura 2.5, o bloco de

três pode ser o transmissor S , o primeiro retransmissor R_1 e o segundo retransmissor R_2 sendo R_2 um receptor temporário.

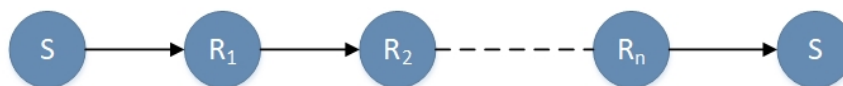


Figura 2.5: Esquema de rede cooperativa com salto sucessivo de retransmissor.

2.1.2 Buffer no Retransmissor

Um *buffer* de dados é um espaço em memória reservado para o armazenamento temporário de informações enquanto espera para ser processado. Pode ser implementado em um local fixo de memória no hardware ou usando um *buffer* de dados virtual no software, apontando para um local na memória física. Entre os problemas de *buffer* mais comuns estão o *overflow* de *buffer* (que ocorre quando o tamanho do *buffer* é insuficiente para armazenar o dado recebido), o *underflow* de *buffer* (é um problema gerado pela falta de informações no *buffer*) e a sobrescrita (geralmente causado por imperfeições na programação do *buffer*).

O *buffer* pode ser aplicado em uma transmissão de dados do tipo streaming (YouTube, Spotify, Netflix). Geralmente, nessas aplicações o *buffer* é utilizado para carregar, por exemplo, os primeiros 20% dos dados transmitidos no *buffer* e depois iniciar a reprodução. Enquanto o streaming é reproduzido, o dispositivo realiza o *download* continuamente dos restante dos dados e os armazena no *buffer*. Esta estratégia permite reprodução continuamente (sem interrupção) ou fornece menor falha na transmissão. Este exemplo é evidenciado em [64], onde os autores desenvolvem um esquema adaptativo baseado em *buffer* de dados em uma transmissão de vídeo móvel em redes sem fio heterogêneas. Além de mostrar os benefícios que o *buffer* proporciona quanto à probabilidade de interrupção, o esquema proposto fornece uma compensação eficiente entre a qualidade da experiência (*do inglês: Quality of Experience, QoE*) do usuário e a ocupação do *buffer* (utilização da memória). Outro exemplo de uso de *buffer* é o chamado *buffer* de tela, onde as placas de vídeo enviam imagens para um *buffer* antes de serem exibidas na tela.

Dentre os benefícios de uso de *buffer* na rede cooperativa incluem-se menor probabilidade de interrupção e melhor gerenciamento da largura de banda disponível. Por exemplo em [20], os autores revisam e comparam os protocolos de retransmissão assistida por *buffer* para várias esquemas de rede cooperativa. Foi demonstrado que os esquemas de uso de *buffer* nas redes cooperativas podem melhorar ainda mais o desempenho em termos da vazão ou da OP em comparação com as redes cooperativas

convencionais. Porém em [65] os autores apresentam os desafios que devem ser enfrentados por exemplo na rede com tolerância ao atraso, em IoT, na codificação de rede e em CR. Os esquemas avaliados ou apresentados nos Capítulos 3 e 4 são baseados na retransmissão assistida por *buffer*.

2.2 Rádio Cognitivo

O rádio cognitivo é uma tecnologia de compartilhamento de frequências onde os usuários não licenciados ou secundários podem fazer uso do espectro dos usuários licenciados ou primários, desde que não prejudicam na transmissão ou recepção dos PUs. De acordo com Haykin, “o rádio cognitivo é um sistema de comunicação sem fio inteligente que tem conhecimento do seu entorno e usa a metodologia de ‘*understanding-by-building*’ para aprender com o entorno e adaptar seu estado interno às variações estatísticas nos estímulos de radiofrequência de entrada fazendo as alterações correspondentes em certos parâmetros operacionais (por exemplo, a potência de transmissão, frequência da portadora e tipo de modulação) em tempo real, com dois objetivos fundamentais: fazer uso eficiente do espectro e fornecer comunicação altamente confiável [66]”. Na Figura 2.6, ilustra-se de forma simples um exemplo de uma rede cognitiva, onde representa-se um esquema de uma rede primária e secundária. Até agora, os protocolos *underlay*, *overlay* e *interweave* são os três protocolos de comunicação para rádio cognitivo mais conhecidos.

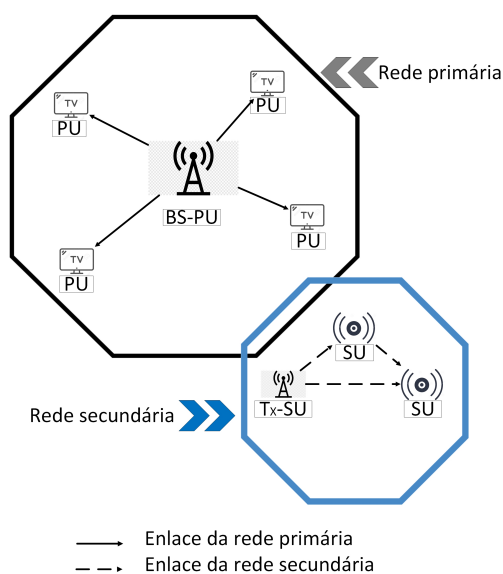


Figura 2.6: Esquema de rádio cognitivo.

No protocolo *underlay*, o usuário secundário (do inglês: *secondary user*, SU) tem

conhecimento da interferência causada pelo transmissor secundário aos PUs [28]. Este conhecimento é obtido através do envio constante de um sinal piloto pelo usuário primário. Desta forma, no protocolo *underlay*, o SU transmite apenas quando a potência de transmissão atenda a seguinte expressão [67]:

$$P_S \leq \frac{I}{|h_{ij}|^2}, \quad (2.6)$$

onde P_S é a potência de transmissão do usuário secundário, I é o limite de interferência aceito pelo usuário primário e $|h_{ij}|^2$ é o ganho do canal entre o transmissor secundário i e o receptor primário j . As duas técnicas avançadas de processamento de sinal eficientes para evitar interferências no protocolo *underlay* [68] são o *Beamforming* e espalhamento espectral. O *Beamforming* consiste em explorar o conceito de superposição de onda para guiar o sinal a um receptor específico por meio de múltiplas antenas. Já a técnica de espalhamento espectral multiplica o sinal secundário por um código de espalhamento para obter um sinal mais fraco com banda mais larga. Esta técnica é executada para causar um nível mais baixo de interferência para os usuários primários. O sinal secundário original é recuperado no receptor multiplicando o sinal de entrada com o mesmo código de espalhamento.

Já com o protocolo *overlay*, os SUs conhecem os ganhos do canal e as mensagens dos transmissores primários. Desta forma, os SUs transmitem simultaneamente com os PUs alocando parte de sua potência de transmissão para auxiliar aos PUs. Basicamente, os usuários secundários da rede escutam constantemente as mensagens do transmissor primário. Essas mensagens podem ser usadas pelo transmissor secundário para melhorar o desempenho, mediando a retransmissão de mensagem não decodificada com sucesso no receptor primário. As duas estratégias de comunicação utilizadas na literatura são: o acesso egoísta e o acesso generoso. No acesso egoísta, toda a potência do transmissor secundário é utilizada para transmitir a informação para o receptor secundário enquanto no acesso generoso parte da potência do transmissor secundário é usada para melhorar a comunicação.

Por fim, no protocolo de *interweave*, os SUs identificam os espectros disponíveis na banda de frequência dos PUs e usam essas brechas de espectro para as transmissões sem causar interferência. Porém, não basta realizar o sensoriamento espectral por parte do SU, também é necessário manter um monitoramento constante e ativo por parte deste SU para liberar o espectro ocupado em caso de detecção de atividade de uso pelo PU. De acordo com [68], existem duas técnicas de seleção de frequência:

- Técnicas de banda estreita: A banda de frequência (banda estreita) da rede secundária é atribuída dinamicamente ou predeterminadamente dependendo da dispo-

nibilidade da banda de frequência da rede primária.

- Técnica de banda larga ou codificação de frequência: A rede secundária realiza um sensoriamento espectral em busca de um vazio espectral para se comunicar oportunisticamente por meio de uma palavra código. Este esquema requer a disponibilidade de canais em todas as diferentes bandas de frequência antes de cada transmissão.

Sintetizando, a partir dos protocolos estudados, o *underlay* não precisa ter conhecimento da mensagem nem do ganho dos canais da rede primária, ao contrário do protocolo *overlay*. Além disso, no protocolo *interweave*, os transmissores secundários transmitem apenas no caso de haver um vazio espectral primário ao contrário dos protocolos de *overlay* e *underlay*. Pode-se concluir que o protocolo *underlay* propõe um esquema mais viável na implementação. No Capítulo 4, será analisado um esquema baseado no protocolo de *underlay*, devido à sua viabilidade.

2.3 Acesso Múltiplo Não Ortogonal (NOMA)

O NOMA é uma técnica que permite que vários usuários usem o mesmo recurso em termos de tempo, frequência e espaço. Na literatura, NOMA no domínio de potência e NOMA no domínio de código são os dois métodos usados na implementação desta técnica. Esta dissertação abordará a técnica NOMA no domínio da potência. Nesta técnica, o transmissor atribui aos usuários da rede diferentes níveis de potência para uma determinada condição de canal, a fim de obter o ganho máximo do sistema. Esses níveis de potência dos usuários são usados para separá-los. De acordo com o princípio NOMA, antes de cada transmissão, o transmissor aloca maior potência de transmissão à informação do destino mais distante e menor à informação do destino mais próximo como mostra a Figura 2.7. Desta forma, a informação transmitida contém um conjunto de informações dos destinos cooperando com a técnica NOMA. Usando a Figura 2.8, o sinal enviado pelo transmissor pode ser escrito como:

$$x(t) = \sqrt{aP_i}x_1(t) + \sqrt{(1-a)P_i}x_2(t), \quad (2.7)$$

onde a é o fator de PA com $0 \leq a \leq 0.5$. $x_1(t)$ e $x_2(t)$ denotam a informação do destino D_1 e D_2 respectivamente. O sinal recebido no destino pode ser escrito pela Equação (2.1). Esta recepção de múltiplas informações força a implementação da técnica de SIC [69]. A técnica cancelamento sucessivo de interferência (*do ingles: Successive interference cancellation, SIC*) é usada por um receptor em uma transmissão de dados sem fio que permite decodificar dois ou mais pacotes que chegam

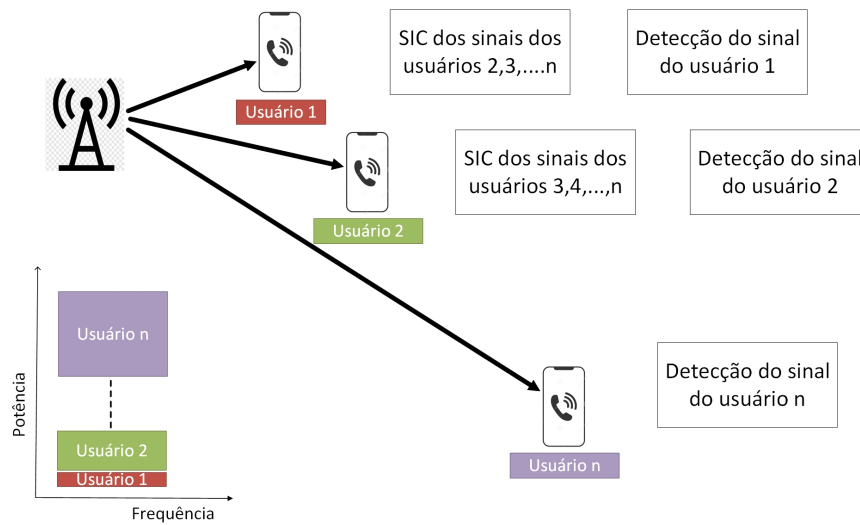


Figura 2.7: Esquema NOMA.

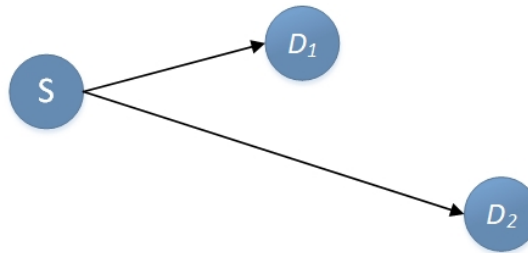


Figura 2.8: Modelo de NOMA.

simultaneamente. A aplicação desta técnica em rede sem fio com NOMA consiste em que o destino mais distante decodifique sua própria informação considerando o restante da informação recebida como interferência. E o destino mais próximo decodifique recursivamente as informações começando pela mensagem do destino mais distante, subtraindo-a do sinal combinado recebido. O mesmo processo é repetido até decodificar sua própria mensagem como mostra a Figura 2.7. Em outras palavras, de acordo com a Figura 2.8, o usuário D_2 irá decodificar sua própria mensagem considerando a mensagem de D_1 como interferência enquanto o usuário D_1 primeiro irá decodificar a mensagem de D_2 , subtrai-la por meio de SIC e finalmente irá decodificar sua própria mensagem. Desta forma, a relação sinal-interferência-ruído (*do inglês: Signal-to-interference-pulse-noise ratio, SINR*) recebida pelos usuários D_1 e D_2 para decodificar a informação do usuário D_2 é escrita da seguinte forma:

$$\gamma_{ij,2} = \frac{a\rho_i |h_{ij}|^2}{(1-a)\rho_i |h_{ij}|^2 + 1}. \tag{2.8}$$

Após D_1 decodificar com sucesso a informação de D_2 e retirar-la por meio do SIC, a SNR recebida pelo D_1 para decodificar a informação de D_1 pode ser escrita como:

$$\gamma_{ij,1} = a\rho_i |h_{ij}|^2. \quad (2.9)$$

Desta forma, a probabilidade de interrupção do enlace $S \rightarrow D_1$ é expressa por:

$$\mathcal{O}_{SD_1} = \mathcal{P}[(\gamma_{SD_1,1} < \mathfrak{R}_i) \cup (\gamma_{SD_1,2} < \mathfrak{R}_i)] \quad (2.10)$$

De igual forma, a probabilidade de interrupção do enlace $S \rightarrow D_2$ é expressa por:

$$\mathcal{O}_{SD_2} = \mathcal{P}(\gamma_{SD_2,2} < \mathfrak{R}_i) \quad (2.11)$$

2.4 Conclusão Parcial

Neste capítulo, foram apresentados alguns esquemas de rede cooperativa em que os esquemas de seleção de retransmissor superam os esquemas convencionais devido à liberdade na seleção do retransmissor que proporcionam e os resultados benéficos obtidos principalmente na OP. Além disso, foram apresentadas as definições de informação mútua e a probabilidade de interrupção para as redes cooperativas investigadas. Ademais, foram apresentados os benefícios do uso de *buffer* de dados na rede cooperativa bem como os conceitos de rádio cognitivo e NOMA de forma resumida. Até a melhor revisão bibliográfica realizada, não foi encontrado um trabalho sobre o uso de *buffer* único ou o uso de *buffer* em todos os nós na rede cooperativa bidirecional. Por esta razão, no próximo capítulo, será analisado um esquema de rede cooperativa bidirecional assistida por *buffer* no transmissor/retransmissor.

Capítulo 3

Análise de Desempenho de Redes Bidirecionais Assistidas por *Buffer* nos Transmissores e Retransmissor

A comunicação cooperativa bidirecional permite transmitir em ambas as direções por meio de um retransmissor, desde que os nós sejam capazes de transmitir e receber [58]. Mostrou-se benéfica em termos de eficiência espectral e energética em comparação com duas comunicações direcionais [70]. Em outras palavras, requer-se menos *time slot* do que duas comunicações direcionais para trocar informações entre dois nós por meio de um retransmissor. Em condição não ideal de canal, os receptores dessa troca de informações podem sofrer perda de informações, tornando menos provável a decodificação com sucesso das informações enviadas. Uma solução frequente encontrada na literatura é o uso de *buffer*. O uso do mesmo permite que os nós capazes de transmitir armazenem temporariamente as informações aguardando melhorias do canal no próximo *time slot* [20]. Com esta solução, o retransmissor pode decidir exclusivamente quando irá transmitir, receber ou permanecer em silêncio. Em [42], os autores combinam a informação do estado do canal e a informação de estado de *buffer* do retransmissor (CSI/BSI) em um esquema de transmissão cooperativa bidirecional. Um melhor desempenho em termo da vazão e da OP foi alcançado.

Neste capítulo, será analisada uma rede cooperativa bidirecional com diferentes estratégias de uso de *buffer* em todos os nós, aproveitando os benefícios que proporcionam os mesmos em termos da OP em um cenário geral onde o sistema é composto por uma cadeia de múltiplos retransmissores. A análise será realizada em um subconjunto da cadeia de múltiplos retransmissores, onde os elementos do subconjunto atuam como um transmissor, um retransmissor e um receptor. Um algoritmo será proposto para o

mecanismo de transmissão/recepção no retransmissor em cada *time slot*. Os cenários propostos são comparados com sistemas sem *buffer* e com *buffer* separado apenas no nó retransmissor.

3.1 Modelo de Sistema

Considera-se uma TWRN com a possibilidade de implementar *buffer* em todos os nós conforme mostra a Figura 3.1. A rede é composta por três nós S_1 , R e S_2 sendo R o retransmissor. Os nós transmissores S_1 e S_2 comunicam-se uns com os outros através do nó retransmissor R . Admite-se que não há enlace direto entre S_1 e S_2 [71]. Os nós S_1 , R e S_2 estão equipados com uma antena omnidirecional e o nó retransmissor opera em modo half-duplex com base no princípio DF [72]. Todos os canais envolvidos são independentes e identicamente distribuídas (*do inglês: independent and identically distributed*, i.i.d) com desvanecimento Rayleigh do tipo não seletivo em frequência e com AWGN. Este desvanecimento é usado para modelar sinais dispersos que chegam a um receptor por meio de múltiplos caminhos. O canal entre o transmissor i e o receptor j é denotado h_{ij} onde $ij \in \{S_1, S_2, R\}$. A potência média é dada por $\lambda_{ij} = d_{ij}^{-\alpha}$ onde α representa o fator de perda de percurso e d_{ij} a distância normalizada do enlace correspondente com referência a S_1 e S_2 . Admite-se que os canais adjacentes são considerados simétricos.

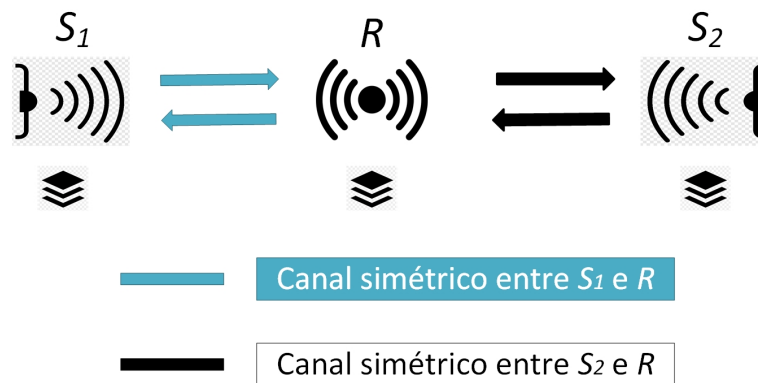


Figura 3.1: Rede bidirecional cooperativa com *buffer* em todos os nós.

Denota-se B_{S_1} e B_{S_2} os *buffers* dos nós S_1 e S_2 , respectivamente. O *buffer* do retransmissor tem duas configurações: a primeira configuração consiste em dois *buffers* separados para cada direção que denota-se B_{S_1R} e B_{S_2R} , enquanto a segunda configuração consiste na implementação de um único *buffer* para ambas as direções denotado por B_{SR} . Na primeira configuração, cada *buffer* possui tamanho L , enquanto na segunda configuração o *buffer* único possui tamanho N . Para comportar as duas

transmissões, o *buffer* único possui o dobro do tamanho dos *buffers* separados. Para simplificar as análises, admite-se que cada unidade de memória dos *buffers* é equivalente ao tamanho dos pacotes. A taxa de transmissão alvo é \mathfrak{R}_i em bit por uso do canal (bpcu).

A transmissão ocorre em três fases de acordo com o protocolo TDBC [60]. A priori, sendo duas fases para a transmissão dos pacotes do transmissor para o retransmissor e uma fase para a sua difusão resumida na Tabela 3.1. No entanto, para os cenários com

Tabela 3.1: Fase de operação

	Fase 1	Fase 2	Fase 3
Operação	S_1 envia para R S_2 fica em silêncio	S_2 envia para R S_1 fica em silêncio	R broadcasts

buffers esta configuração de fase pode ser reconfigurada de acordo com a informação do estado do buffer (*do inglês: buffer state information, BSI*) e a informação do estado do canal (*do inglês: channel state information, CSI*) [73, 74]. A CSI permite adaptar as transmissões às condições atuais do canal para atingir uma comunicação confiável com alta taxa de transmissão. Nesta dissertação obtém-se no início de cada transmissão pelo retransmissor através de métodos de sensoriamento de canais [60]. Foi utilizado a CSI instantânea, o que significa que em cada *time slot* as condições atuais do canal são conhecidas pelo retransmissor. Baseada nessa informação, o retransmissor compara-a com um limiar pré-determinado e determina se os transmissores irão transmitir. Antes de iniciar a transmissão em cada *time slot*, o retransmissor envia um sinal de referência ¹ baseado na decisão tomada a partir da CSI obtida e da BSI. Baseado neste sinal, os nós transmitem, recebem ou ficam em silêncio. Admite-se que em cada *time slot* um novo pacote é gerado pelos nós transmissores.

3.2 Regras de Decisão e Algoritmo de Transmissão/Recepção

Nesta seção, analisam-se diferentes cenários em termos de presença/ausência de *buffer* nos nós, os modos de transmissão de acordo com a BSI/CSI e as regras de decisão no retransmissor. O cenário 1 considera um esquema sem *buffer*. Os cenários 2 e 3 consideram um esquema com uso de *buffer* no retransmissor sendo dois *buffers* separados no cenário 2 e um *buffer* único no cenário 3. Finalmente os cenários 4 e 5 consideram o uso de *buffer* nos transmissores e no retransmissor sendo dois *buffers*

¹O sinal de referência enviado é de curta duração e aproximadamente de 1 bit, de forma que o recurso consumido é insignificante em relação ao recurso necessário para transmitir um pacote na rede.

separados no retransmissor no cenário 4 e um *buffer* único no retransmissor no cenário 5. Os cinco cenários são mostrados na Figura 3.2 com mais detalhes. Conforme discu-

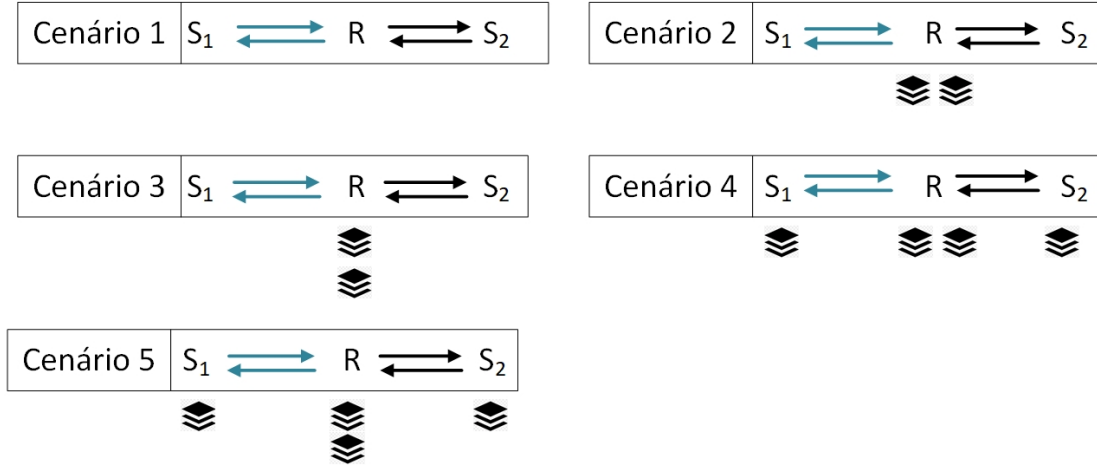


Figura 3.2: Os cinco cenários para avaliar o desempenho do sistema.

tido na Seção 3.1, um pacote é gerado para ser transmitido por cada transmissor. Esse pacote gerado é transmitido, armazenado ou perdido de acordo com o estado do *buffer*, do enlace associado e do algoritmo usado.

No início de cada transmissão, sempre que um pacote é gerado e o enlace associado a este transmissor está disponível, então denota-se NP , caso contrário \overline{NP} ². Em outras palavras, se o enlace $S_1 \rightleftharpoons R$ não está disponível e o enlace $S_2 \rightleftharpoons R$ está disponível, então o novo pacote gerado por S_1 é \overline{NP} e o gerado por S_2 é NP . Quando NP e/ou \overline{NP} entra na fila denota-se SP (pacote armazenado). Denotam-se ψ_T e ψ_R o número do pacote a ser transmitido e o número do pacote a ser recebido pelo retransmissor, respectivamente. Por exemplo, em um *time slot*, o retransmissor pode enviar dois pacotes e receber um, neste caso $\psi_T = 2$ e $\psi_R = 1$. As regras de decisão são modeladas de acordo com o algoritmo que incrementa o número de pacotes recebidos. No próximo segmento, será descrita a modelagem de cada cenário analisado.

3.2.1 Cenário 1: Sem *Buffer* nos Nós

O método usado para modelar o cenário 1 é mostrado nesta subsecção. Os nós são configurados sem *buffers* e quando pelo menos um enlace está indisponível, ocorre um evento de interrupção. A Figura 3.3 mostra o esquema de transmissão dos pacotes transmitidos. Nesta figura, todas as possibilidades válidas para modelar o número total de pacotes do cenário 1 são mostradas. Por exemplo, quando todos os enlaces estão disponíveis, os pacotes chegam com sucesso aos seus destinos.

²Sempre que uma variável-barrada é usada, refere-se ao oposto da variável em questão. Por exemplo, dado ι uma variável, então $\bar{\iota}$ é o oposto de ι .

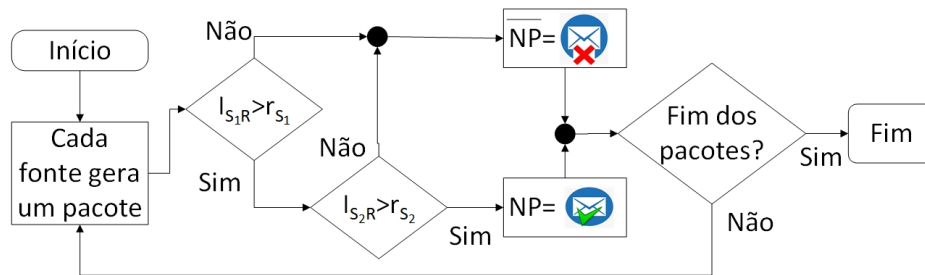


Figura 3.3: Cenário 1: Sem buffer nos nós.

3.2.2 Cenário 2: Dois Buffers Separados no Nó Retransmissor

Devido aos benefícios proporcionados pelo uso de *buffer* no retransmissor, os autores em [73, 74] propõem um modelo de sistema de uma rede cooperativa bidirecional baseado na BSI/CSI. Um melhor desempenho foi encontrado em termo da vazão e da OP. Além disso, foi encontrado um equilíbrio entre o tamanho do *buffer* e o atraso causado. Neste segmento, a técnica utilizada para modelar o cenário 2 é mostrada a fim de comparar com os cenários propostos.

Denota-se Q_T e Q_R o estado do *buffer* do retransmissor pronto para transmitir e o estado do *buffer* do retransmissor pronto para receber, respectivamente. A Figura 3.4 mostra a metodologia utilizada para modelar todas as possibilidades válidas deste cenário. Por meio da BSI do retransmissor e da CSI, o retransmissor envia um sinal de referência para os transmissores conforme comentado na Seção 3.1. A mesma contém a ordem de transmissão dos nós. Este sinal gera as três seguintes possibilidades de decisão nos nós:

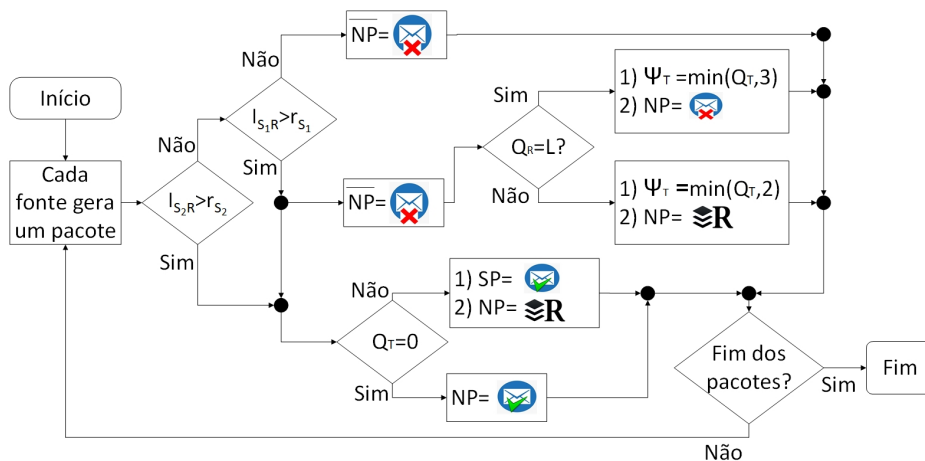


Figura 3.4: Cenário 2: Buffers separados no nó de retransmissão.

- Se os dois enlaces não estiverem disponíveis, tanto o pacote do nó S_1 quanto o do nó S_2 são perdidos.

- Se os dois enlaces estiverem disponíveis, o pacote do nó S_1 é enviado com sucesso para o destino ou é armazenado no nó de retransmissão R de acordo com o estado do *buffer*. Quando os *buffers* do retransmissor estão cheios, então a difusão tem prioridade. Eventos semelhantes ocorrem com o pacote do nó S_2 .
- Quando um dos enlaces estiver disponível e o outro estiver indisponível, dois eventos ocorrem:
 - No enlace disponível, o nó transmissor envia o pacote para o retransmissor quando o *buffer* associado não está cheio, caso contrário é perdido.
 - No enlace indisponível, o pacote gerado pelo transmissor é perdido. Os pacotes no *buffer* do retransmissor são enviados.

Os pacotes são atendidos de acordo com o protocolo de primeiro a entrar primeiro a sair (*do inglês: First In, First Out, FIFO*). Por exemplo, se todos os enlaces estão disponíveis e $Q_R = L$ onde L é a capacidade máxima dos *buffers*, então o retransmissor transmite o pacote na primeira posição, S_1 transmite para B_{S_1R} e S_2 transmite para B_{S_2R} . A ordem de transmissão é ditada pelo retransmissor.

Os algoritmos propostos são utilizáveis quando apenas um dos canais simétricos está disponível fazendo com que o retransmissor comunique apenas com um transceptor. Por exemplo, dado o caso onde o enlace $S_1 \rightleftharpoons R$ está disponível e o enlace $S_2 \rightleftharpoons R$ está indisponível então o retransmissor apenas se comunica com o transmissor S_1 . O Algoritmo 1 mostra a estratégia usada para incrementar o número de transmissões/recepções no retransmissor por *time slot* neste cenário. Um exemplo ilustrativo do uso deste algoritmo é: se o enlace $S_1 \rightleftharpoons R$ estiver disponível, $S_2 \rightleftharpoons R$ estiver indisponível, e ademais o estado de *buffer* pronto para receber está cheio, então este algoritmo permite transmitir e receber no retransmissor um máximo de três pacotes. Na mesma condição da CSI/BSI definida acima, os modelos convencionais da TWRN auxiliados por *buffer* podem transmitir um total de um pacote neste *time slot*.

Diferentemente das propostas em [73, 74], com o uso deste algoritmo é possível incrementar o número de pacotes enviados por *time slot*.

3.2.3 Cenário 3: *Buffer Único no Nó de Retransmissão*

Neste cenário o retransmissor possui um *buffer* único para ambas as transmissões diferentemente do anterior que possui *buffers* separados. Este cenário foi projetado para uma condição de canal ainda mais crítica, onde pode-se incrementar a capacidade de armazenamento sem a necessidade de adicionar novos recursos ao sistema. No caso do uso de *buffer* único no retransmissor, os pacotes armazenados no *buffer* B_{SR} devem

Algoritmo 1: Algoritmo de transmissão do cenário 2.

```

1 se  $Q_R == L$            % Se o buffer receptor esta cheio então
2   |  $\psi_T = \min(3, Q_T)$ ; % O retransmissor transmite um número
   |                               % mínimo de pacote(s) entre 3 e  $Q_T$ ;
3 senão
4   |  $\psi_T = \min(2, Q_T)$ ; % O retransmissor transmite um número
   |                               % mínimo de pacote(s) entre 2 e  $Q_T$ ;
5   |  $\psi_R = 1$ ;           % O retransmissor recebe um pacote;
6 fim
    
```

ser coordenados e, sempre respeitando a ordem de saída. O protocolo de atendimento dos pacotes no *buffer* implementado é o FIFO, o que significa que o primeiro pacote que entra no *buffer* é o primeiro que sai. Desta forma, Q_{TR} é o estado do *buffer* único do retransmissor pronto para transmitir e receber.

Denota-se v_{S_1} , v_{S_2} e v_e a quantidade de pacotes destinados a S_1 em B_{SR} , a quantidade de pacotes destinados a S_2 em B_{SR} e a quantidade de pacotes no *buffer* B_{SR} destinados ao receptor com o enlace indisponível, respectivamente. Por exemplo, em um *time slot* se $S_1 \rightleftharpoons R$ está disponível, $S_2 \rightleftharpoons R$ está indisponível e $Q_{TR} = 5$ sendo três pacotes destinados a S_1 e dois destinados a S_2 então $v_{S_1} = 3$, $v_{S_2} = 2$ e $v_e = 3$. A Figura 3.5 mostra a estratégia e o método usado para modelar todas as possibilidades neste cenário. Com base na BSI/CSI, o retransmissor envia um sinal de referência aos transmissores e são geradas as três possibilidades:

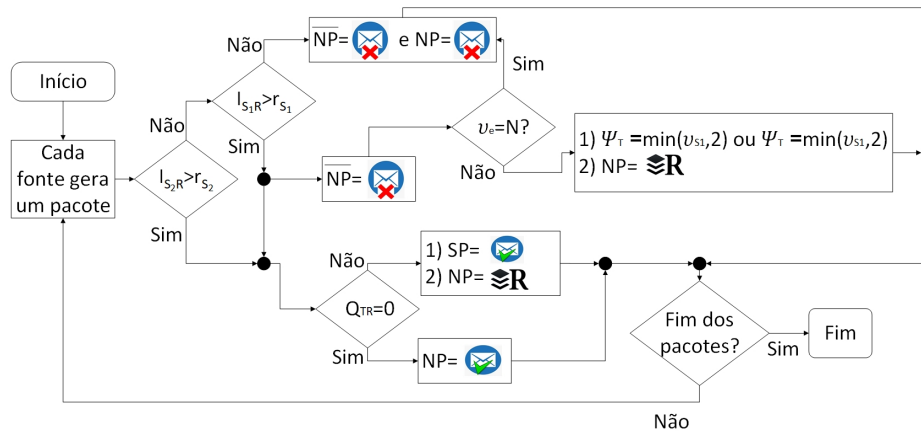


Figura 3.5: Cenário 3: Buffer único no nó de retransmissão.

- Como no cenário 2, se os dois enlaces não estiverem disponíveis, os novos pacotes dos nós S_1 e S_2 serão perdidos.
- Se todos os enlaces estiverem disponíveis, primeiro o retransmissor transmite o pacote codificado se tiver pacotes de ambas as direções, caso contrário, o re-

transmissor recebe os pacotes de cada transmissor e depois transmite.

- Se um dos enlaces estiver disponível e o outro não estiver disponível, então:
 - no enlace disponível: Primeiro, o pacote pronto para ser enviado no retransmissor é transmitido a seu destino, logo depois, o transmissor envia o pacote gerado para o retransmissor se o *buffer* do mesmo não estiver cheio caso contrário o pacote é perdido.
 - No enlace indisponível, o pacote associado é perdido.

Algoritmo 2: Algoritmo de transmissão do cenário 3.

Dados: y vale 1 quando $I_{S_1R} \geq R_{S_1}$ e $I_{S_2R} < R_{S_2}$ ou
 y vale 2 quando $I_{S_1R} < R_{S_1}$ e $I_{S_2R} \geq R_{S_2}$

```
1 se  $v_{S_y} \geq 2$   % Se a quantidade de pacote destinado a  $S_1$  é maior ou  
                  % igual que 2 então  
2   |  $\psi_T = 2$ ;    % O retransmissor transmite dois pacotes;  
3   |  $\psi_R = 1$ ;    % O retransmissor recebe um pacote;  
4 fim
```

Um exemplo das três possibilidades é quando todos os enlaces estão disponíveis e $Q_{TR} = 0$ então S_1 transmite para R , S_2 transmite para R e R difunde. O sinal de referência enviado pelo retransmissor contém as informações desta ordem de transmissão. Como no cenário 2, o Algoritmo 2 proposto é capaz de incrementar o número de pacotes transmitidos apenas quando um dos canais simétricos está disponível. Por exemplo, usando o Algoritmo 2 quando o enlace $S_1 \rightleftharpoons R$ está disponível e o enlace $S_2 \rightleftharpoons R$ está indisponível e ademais o número de elementos no *buffer* único destinados a S_1 é maior ou igual a 2, então o retransmissor envia dois pacotes e recebe um.

3.2.4 Cenário 4: *Buffers* Separados no Retransmissor e um *Buffer* em cada Nó Transmissor

O uso de *buffer* nos transmissores permitiria que nas piores condições do canal os transmissores pudessem armazenar temporariamente as informações à esperar de melhoria do canal nos próximos *time slots*. Por exemplo, Admite-se que em um *time slot* os dois enlaces do modelo de sistema não estão disponíveis, neste caso o uso de *buffer* no transmissor nos permitiria armazenar temporariamente as informações geradas no *buffer* fonte. Outro caso de uso de *buffer* nos transmissores poderia ser em uma rede composta por múltiplos retransmissores, onde a análise estatística poderia ser simplificada apenas no momento em que um retransmissor atua como transmissor, outro como retransmissor e o último como destino. Formando assim um sistema de transmissor,

retransmissor e destino com uso de *buffer* em todos os nós. Neste segmento, mostra-se os procedimentos usados para modelar o cenário 4. Denota-se K_S e $\overline{K_S}$ o estado do *buffer* fonte associado ao enlace disponível e o estado do *buffer* fonte associado ao enlace indisponível, respectivamente. Em outra palavra, neste cenário se o enlace $S_1 \Rightarrow R$ estiver disponível e o enlace $S_2 \Rightarrow R$ estiver indisponível, então o estado de B_{S_1} é K_S , o estado de B_{S_2} é $\overline{K_S}$.

A Figura 3.6 mostra o fluxograma de todas as possibilidades que existem do cenário 4. Baseado na CSI/BSI, o retransmissor envia um sinal de referência possibilitando os seguintes eventos:

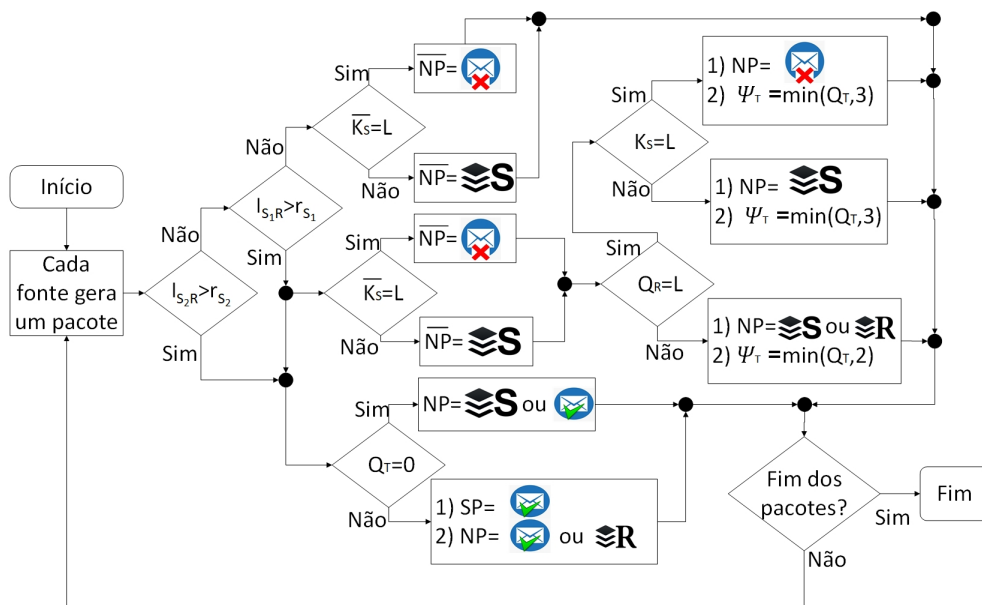


Figura 3.6: Cenário 4: Buffer separado no retransmissor e buffer na fonte.

- Se os dois enlaces não estiverem disponíveis, os pacotes gerados são armazenados no *buffer* fonte (S_1 ou S_2) ou são perdidos de acordo com o estado do *buffer* fonte.
- Se os dois enlaces estiverem disponíveis, o pacote gerado por S_1 é enviado ao destino, ou é enviado ao retransmissor para ser armazenado, ou é armazenado em S_1 de acordo com as capacidades dos *buffers* de S_1 e de R . O mesmo acontece com os pacotes que são gerados no nó S_2 .
- Se um dos enlaces estiver indisponível e o outro estiver disponível então:
 - O pacote gerado associado ao enlace indisponível é armazenado no *buffer* fonte ou é perdido dependendo do estado do *buffer* fonte.
 - O pacote gerado no enlace disponível é armazenado no *buffer* fonte correspondente ou é enviado ao nó retransmissor ou é perdido. Os pacotes do

buffer do retransmissor são enviados de acordo com a disponibilidade do *time-slot*.

Por exemplo, se todo os enlaces estão indisponíveis, ao contrário do cenário 2 e 3, os novos pacotes de S_1 e S_2 são armazenados em B_{S_1} e B_{S_2} respectivamente quando os *buffers* fonte não estão cheios caso contrário serão perdidos.

O Algoritmo 3 mostra o mecanismo usado para incrementar o número de transmissões por *time slot* quando apenas um dos enlaces está indisponível. Com este algoritmo, é possível transmitir até três pacotes quando apenas um canal está disponível o que não acontece quando o algoritmo não é usado. De acordo com o Algoritmo 3, quando o *buffer* do receptor não está cheio, se o *buffer* de origem associado ao enlace disponível estiver vazio, o retransmissor pode enviar até dois pacotes e receber o novo pacote gerado na fonte. Quando o *buffer* do receptor está cheio, o retransmissor só pode transmitir até três pacotes, dependendo da quantidade de pacotes armazenados no *buffer* transmissor. Isso porque neste *time slot*, estando o *buffer* do receptor cheio, o retransmissor decide não receber o pacote por falta de espaço no *buffer*. Com esses exemplos é possível aumentar o número de pacotes transmitidos por *time slot*.

3.2.5 Cenário 5: *Buffer* Único no Retransmissor e *Buffer* em cada Nó Transmissor

Este cenário combina os cenários 3 e 4, aproveitando um conjunto de benefícios obtidos em termos da OP. O mesmo implementa *buffer* único no retransmissor e *buffers* nos transmissores. Com a implementação do *buffer* único no retransmissor, neste cenário, espera-se melhorar ainda mais os resultados dos cenários 3 e 4.

A Figura 3.7 apresenta as diferentes possibilidades (casos) do cenário em questão. Em cada *time slot* o retransmissor envia um sinal de referência baseada na BSI/CSI. Este sinal possibilita as três seguintes eventos de ocorrência.

- Da mesma forma que o cenário 4, se os dois enlaces não estiverem disponíveis, o pacote gerado é armazenado (no transmissor) ou é perdido de acordo com o estado do *buffer source*.
- Se todos os enlaces estiverem disponíveis, o novo pacote S_1 é enviado ao seu destino, ou é enviado ao retransmissor para ser armazenado, ou é armazenado no S_1 de acordo com a capacidade do S_1 e a disponibilidade do slot time. O mesmo acontece com os pacotes que são gerados no nó S_2 . A organização dos pacotes de ambas as direções ocorre em um único *buffer*.
- Se um dos enlaces está disponível e o outro não então:

Algoritmo 3: Algoritmo de transmissão do cenário 4.

Dados: y vale 1 quando $I_{S_1R} \geq R_{S_1}$ e $I_{S_2R} < R_{S_2}$ ou
 y vale 2 quando $I_{S_1R} < R_{S_1}$ e $I_{S_2R} \geq R_{S_2}$

```

1 se  $Q_R == L$                                % Se o buffer receptor esta cheio então
2 |  $\psi_T = \min(3, Q_T)$ ; % O relay envia um número mínimo entre 3 e  $Q_T$ ;
3 senão
4 | se  $K_S == 0$  % Se o buffer fonte com o enlace disponível não tem pacote
5 |   então
6 |   |  $\psi_T = \min(2, Q_T)$  ;
7 |   |  $\psi_R = 1$ ; % O retransmissor recebe um pacote;
8 |   senão se  $K_S == 1$  % Se o buffer fonte com enlace
9 |   | disponível tem 1 pacote então
10 |   | se  $Q_R == L - 1$  % Se o buffer receptor tem 1 espaço então
11 |   | |  $\psi_T = \min(2, Q_T)$ ;  $\psi_R = 1$ ;
12 |   | senão
13 |   | |  $\psi_T = 1$ ;  $\psi_R = 2$ ; % O retransmissor transmite 1 e recebe 2;
14 |   | fim
15 |   senão se  $K_S == 2$  então
16 |   | se  $Q_R == L - 1$  então
17 |   | |  $\psi_T = \min(2, Q_T)$ ;  $\psi_R = 1$ ;
18 |   | senão se  $Q_R == L - 2$  então
19 |   | |  $\psi_T = 1$ ;  $\psi_R = 2$ ;
20 |   | senão
21 |   | | se  $Q_T == L$  então
22 |   | | |  $\psi_T = 2$ ;  $\psi_R = 1$ ;
23 |   | | senão
24 |   | | |  $\psi_T = 1$ ;  $\psi_R = 2$ ;
25 |   | | fim
26 |   | fim
27 |   senão se  $K_S \geq 3$  então
28 |   | se  $Q_R == L - 1$  então
29 |   | |  $\psi_T = \min(2, Q_T)$ ;  $\psi_R = 1$ ;
30 |   | senão se  $Q_R == L - 2$  então
31 |   | |  $\psi_T = 1$ ;  $\psi_R = 2$ ;
32 |   | senão
33 |   | | se  $Q_T == 0$  então
34 |   | | |  $\psi_T = 3$ ; % O retransmissor transmite três pacote;
35 |   | | senão
36 |   | | |  $\psi_T = 1$ ;  $\psi_R = 2$ ;
37 |   | | fim
38 |   | fim
39 |   fim
40 fim

```

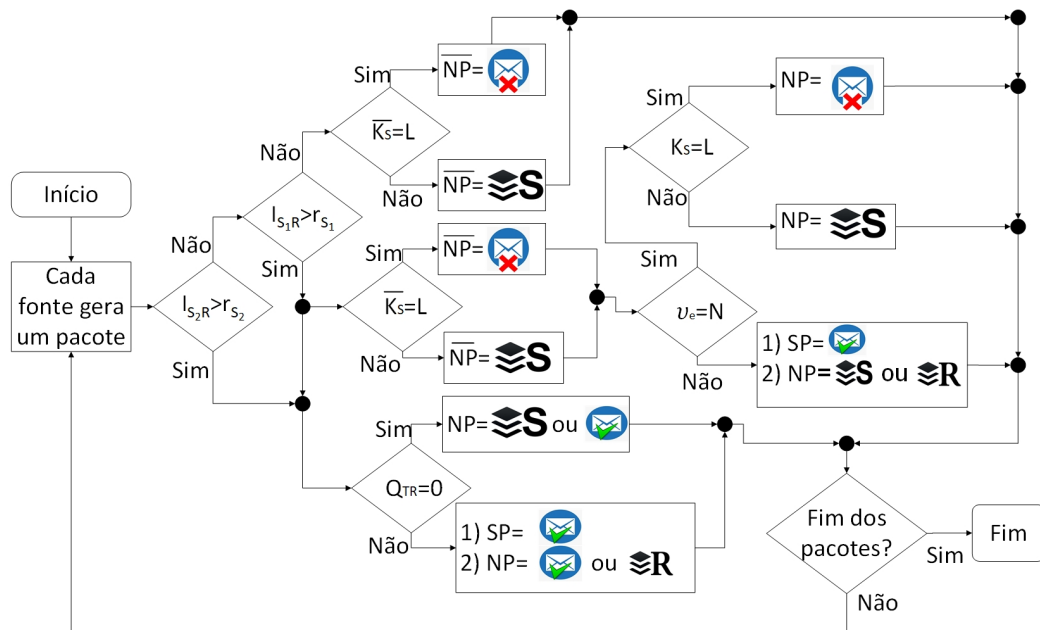


Figura 3.7: Cenário 5: Buffer único no nó de retransmissão e buffer no nó transmissor.

- No enlace disponível: O pacote no retransmissor pronto para ser enviado é transmitido ao seu destino de acordo com o Algoritmo 4, o novo pacote gerado ou é armazenado no *buffer* de retransmissão ou é armazenado no *buffer* fonte ou é perdido.
- No enlace indisponível, o pacote gerado pelo transmissor é perdido ou armazenado no dito *buffer* fonte.

Ao igual que no cenário 4, quando os dois enlaces estão indisponíveis, este cenário também possibilita armazenar o pacote no *buffer* fonte, desde que não esteja cheio.

O Algoritmo 4 mostra o mecanismo usado para incrementar o número de transmissões por *time slot*. Por exemplo, se o enlace $S_1 \rightleftharpoons R$ está disponível, o enlace $S_2 \rightleftharpoons R$ está indisponível e $v_{S_1} > 1$ então o retransmissor envia duas unidades de pacote e recebe um do transmissor S_1 . Esta estratégia permite liberar o *buffer* único de uma unidade, garantindo disponibilidade do *buffer* para os próximos *time slots*. Ademais, permitiu incrementar até três o número total de pacotes enviados/recebido usando o Algoritmo 4.

Em geral, o uso dos algoritmos podem permitir liberar espaço nos *buffers* garantindo disponibilidade dos *buffer* nos próximos *time slots*. Ademais, podem reduzir o atraso de pacotes no sistema aproveitando os três *sub time slots* disponíveis. Na próxima sessão, analisa-se o modelo analítico dos cenários.

Algoritmo 4: Algoritmo de transmissão do cenário 5.

Dados: y vale 1 quando $I_{S_1R} \geq R_{S_1}$ e $I_{S_2R} < R_{S_2}$ ou
 y vale 2 quando $I_{S_1R} < R_{S_1}$ e $I_{S_2R} \geq R_{S_2}$

```

1 se  $v_{S_y} == 0$            % Se o número do pacote destinado ao transmissor
                           % com o enlace disponível for 0 então
2   se  $Q_{TR} = N - 2$        % Se o buffer do retransmissor tiver 2
                           % espaços de memória então
3      $\psi_R = \min(2, K_S)$ ;   % O retransmissor recebe um número
                           % mínimo de pacote(s) entre 2 e  $K_S$ 
4   senão se  $Q_{TR} \leq N - 3$  % Se o buffer do retransmissor tiver ao
                           % menos 3 espaços de memória então
5      $\psi_R = \min(3, K_S)$ ;   % O retransmissor recebe um número
                           % mínimo de pacote(s) entre 3 e  $K_S$ 
6   fim
7 senão se  $v_{S_y} == 1$      % Se o número do pacote destinado ao transmissor
                           % com a enlace disponível for 1 então
8   se  $Q_{TR} < N$            % Se o buffer do retransmissor
                           % não está cheio então
9      $\psi_T = 1$ ;             % O retransmissor transmite um pacotes;
10     $\psi_R = \min(2, K_S)$ ;   % O retransmissor recebe um número
                           % mínimo de pacote(s) entre 2 e  $K_S$ 
11   fim
12 senão
13     $\psi_T = 2$ ;             % O retransmissor transmite dois pacotes;
14     $\psi_R = 1$ ;           % O retransmissor recebe um pacote
15 fim

```

3.3 Modelos Analíticos dos Cenários

3.3.1 Modelo Analítico sem Buffer

Nesta sessão, expressa-se a probabilidade de interrupção individual e a probabilidade de interrupção do sistema do cenário 1. De acordo com [60, 75], a probabilidade de S_1 falhar em se comunicar com S_2 é dada por:

$$\begin{aligned}
\mathcal{O}_{S_1} &= \mathcal{P}(\min\{I_{S_1R}, I_{RS_2}\} < \mathfrak{R}_i) \\
&= \mathcal{P}\left[|h_{S_1R}|^2 < \frac{a_{S_1} - 1}{\rho_i}\right] + \mathcal{P}\left[|h_{S_1R}|^2 \geq \frac{a_{S_1} - 1}{\rho_{S_1}}\right] \mathcal{P}\left[|h_{RS_2}|^2 < \frac{a_{S_1} - 1}{\rho_R}\right] \\
&= \left(1 - e^{-\frac{1}{\lambda_{S_1R}} \frac{a_{S_1} - 1}{\rho_{S_1}}}\right) + \left(e^{-\frac{1}{\lambda_{S_1R}} \frac{a_{S_1} - 1}{\rho_i}} \left(1 - e^{-\frac{1}{\lambda_{RS_2}} \frac{a_{S_1} - 1}{\rho_R}}\right)\right),
\end{aligned} \tag{3.1}$$

onde $\rho_R = P_R/N_0$, $\rho_{S_1} = P_{S_1}/N_0$, $a_i = 2^{3\alpha_i}$ e \mathfrak{A}_i é a taxa de transmissão alvo nos nós S_1 e S_2 . Da mesma forma, a probabilidade de interrupção individual do transmissor S_2 é expressa pela Equação (3.1) substituindo S_1 por S_2 e S_2 por S_1 .

A probabilidade de interrupção do sistema representa a união da probabilidade de falha na comunicação dos dois transmissores e é dada por:

$$\mathcal{O}_{Pair} = \mathcal{O}_{S_1} \cup \mathcal{O}_{S_2}. \quad (3.2)$$

3.3.2 Modelos de Markov dos Cenários com *Buffer* no Retransmissor

Nesta subseção, são descritas por meio da MC as soluções propostas para modelar os cenários que implementam *buffer*. Na Figura 3.8 modela-se o cenário 2 usando a MC onde representam-se os possíveis estados de transições. A modelagem é realizada para expressar a probabilidade de interrupção individual de S_1 . O diagrama de estado de transição é projetado para um tamanho máximo de *buffer* igual a três. O mesmo descreve o comportamento dos pacotes na fila do *buffer* do retransmissor quanto ao aumento, a diminuição ou a permanência no mesmo estado de acordo com a disponibilidade ou não do enlace e do espaço no *buffer*. Em cada estado, o primeiro elemento do conjunto representa o estado do *buffer* B_{S_1} e o segundo, o estado do *buffer* B_{S_2} . Dada a natureza complexa do sistema, para derivar a expressão que calcula a OP de S_1 , modelam-se todos os eventos que levam a uma interrupção do enlace usando a Tabela 3.2. Esta tabela descreve todos os eventos possíveis que levam a uma interrupção.

Tabela 3.2: *Eventos de interrupção*

Estado do enlace \ Estado de buffer	00	01	10
00	Sim	Sim	Não
10	Sim	Sim	Não
01	Sim	Sim	Não
11	Sim	Sim	Não
20	Sim	Sim	Não
02	Sim	Sim	Não
30	Sim	Sim	Sim
03	Sim	Sim	Não

Por exemplo, na condição de *buffer* vazio, basta ter o enlace $S_1 \Rightarrow R$ indisponível para ter um evento de interrupção. De forma geral são observados oito eventos possíveis que levam à interrupção por indisponibilidade do enlace e um evento que leva à interrupção por indisponibilidade de espaço no *buffer*. Levando em consideração as oito possibili-

dades do estado de transição da MC, a OP de S_1 para S_2 é dado por:

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{S_1} &= \frac{1}{8} [8\mathcal{O}_{S_1R} + (1 - \mathcal{O}_{S_1R}) (\mathcal{O}_{RS_2})] \\ &= \left(1 - e^{-\frac{1}{\lambda_{S_1R}} \frac{a_{S_1} - 1}{\rho_{S_1}}} \right) + \frac{1}{8} e^{-\frac{1}{\lambda_{S_1R}} \frac{a_{S_1} - 1}{\rho_{S_1}}} \left(1 - e^{-\frac{1}{\lambda_{RS_2}} \frac{a_R - 1}{\rho_R}} \right). \end{aligned} \quad (3.3)$$

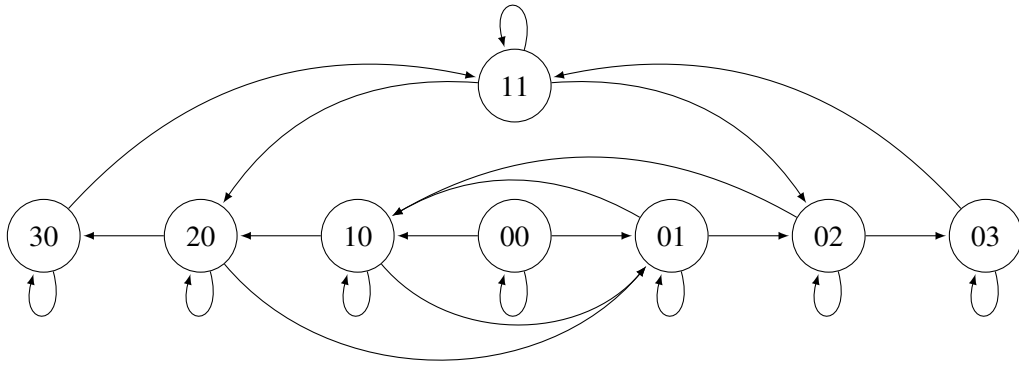


Figura 3.8: Diagrama de estado de transição do Cenário 2.

Na Figura 3.9 são ilustrados os sete níveis dos estados possíveis do cenário 3 onde descreve-se a evolução dos possíveis estados da MC. É importante notar que por ter um único *buffer*, implica que a capacidade de armazenamento torna-se o dobro do cenário 2. Cada estado do diagrama de transição descreve o estado atual do *buffer* e a quantidade total de pacotes de cada destino armazenado no *buffer*. Em outras palavras, seja $A_1A_2A_3$ o estado de *buffer*. A_1 representa o estado atual do *buffer*, A_2 representa a quantidade de elementos do destino S_2 e A_3 representa a quantidade de elementos do destino S_1 . Um exemplo ilustrativo é o estado 312, onde há 3 pacotes armazenados no *buffer*, sendo 1 do destino S_2 e 2 do destino S_1 . As transições de um estado para outro ocorrem quando um enlace está disponível e o outro não está disponível e ademais que o *buffer* tenha espaço disponível. O estado permanece igual quando em sete tentativas consecutivas, as amostras apresentam exatamente a mesma condição do canal. Portanto, para uma capacidade de *buffer* igual a seis, temos sete estados possíveis. Como no cenário 2, a expressão para OP é derivada de forma semelhante, exceto para a OP causada pela indisponibilidade de espaço de armazenamento do retransmissor. Bem, neste caso do cenário 3, essa interrupção ocorre apenas se um enlace estiver disponível e o outro não estiver disponível em sete ou mais *time slot* simultâneos. Desta forma, a expressão da probabilidade de interrupção é dada por:

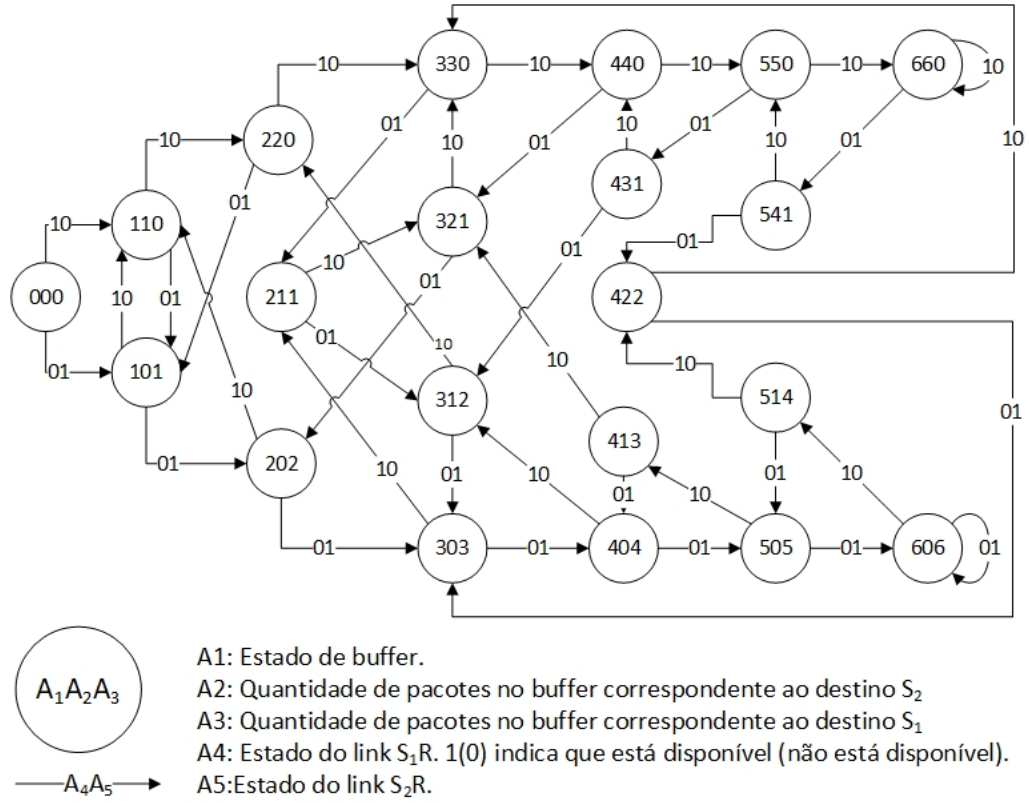


Figura 3.9: Diagrama de estado de transição do Cenário 3.

$$\begin{aligned}
 \mathcal{O}_{S_1} &= \frac{1}{7} [7\mathcal{O}_{S_1R} + (\mathcal{O}_{RS_2} (1 - \mathcal{O}_{S_1R}))^7] \\
 &= \left(1 - e^{-\frac{1}{\lambda_{S_1R}} \frac{\alpha_{S_1}-1}{\rho_{S_1}}}\right) + \left[\frac{1}{7} e^{-\frac{1}{\lambda_{S_1R}} \frac{\alpha_{S_1}-1}{\rho_{S_1}}} \left(1 - e^{-\frac{1}{\lambda_{RS_2}} \frac{\alpha_R-1}{\rho_R}}\right)\right]^7.
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Em relação aos Cenários 4 e 5, nos limitamos apenas aos modelos numéricos desenvolvidos nas subseções 3.2.4 e 3.2.5 devido à complexidade da máquina de estado da Cadeia de Markov de quatro ou três *buffers* com um tamanho mínimo de três para cada um.

3.4 Simulações e Resultados Numéricos

Nesta seção, são apresentados os resultados numéricos para avaliar o desempenho dos cinco (05) cenários em termos da OP. A Tabela 3.3 mostra os parâmetros usados neste capítulo exceto quando for dito o contrário. Inicialmente, todos os *buffers* estão vazios e as distâncias são normalizadas com referência a $d_{S_1S_2}$. Para simplificar as análises assume-se que as potências de transmissão dos três nós são iguais e denote-se

P , ou seja $P_{S_1} = P_{S_2} = P_R = P$ e $\rho_{S_1} = \rho_{S_2} = \rho_R = \rho$. As simulações são realizadas no software MATLAB com um milhão eventos de Monte Carlo.

Tabela 3.3: *Parâmetro do sistema do Capítulo 3*

Parâmetro	Símbolo	Valor
Número de amostra de pacote	Sample	10^6
Número de sorteio de canal	Sample channel	2×10^6
Posição do retransmissor	d_{S_1R}	0.5
Expoente de perda de percurso	α	4
Potência de ruído	N_0	1
Tamanho máximo do <i>buffer</i> separado	L	3
Tamanho máximo do <i>buffer</i> único	N	6
Taxa de transmissão alvo	\mathfrak{R}_i	1 bpcu
Potência de transmissão	P	10 dB
Relação sinal-ruído	ρ	10 dB

A Figura 3.10 mostra a taxa de perda de pacote com diferentes número de amostra de pacotes nos cenários de uso de *buffers* com diferentes SNRs. Observa-se que na Figura 3.10a para setecentos mil pacotes analisados com uma SNR igual a -10 dB aproximadamente 95% são perdidos para os quatro cenários avaliados. O mesmo acontece para uma amostra de pacote igual a novecentos mil onde aproximadamente 94% dos pacotes analisados são perdidos. Por outro lado, na Figura 3.10c, para setecentos mil pacotes analisados com uma SNR igual a 10 dB, aproximadamente 5% são perdidos no cenário 2, 4.16% nos cenários 3 e 4, e 2.28% no cenário 5. Desta forma, pode-se concluir parcialmente que com uma SNR igual a -10 dB, os cenários com uso de *buffer* perdem aproximadamente a mesma quantidade de pacotes e quase todos os pacotes analisados são perdidos. Porém, com uma SNR igual a 10 dB, não só a taxa de perda de pacotes diminui, mas também a estratégia do uso de *buffer* em todos os nós do cenário 5 (a barra ciano) apresenta menor taxa de perda de pacotes do que os outros cenários.

Adicionalmente, na Figura 3.10d, para uma amostra de novecentos mil pacotes, as barras vermelha e verde dos cenários de uso de *buffer* apenas no retransmissor mostram que aproximadamente 0.50% e 0.44% pacotes são perdidos, respectivamente. No entanto, as barras magenta e ciano dos cenários com *buffer* em todos os nós apresentam aproximadamente 0.42% e 0.28% pacotes perdidos, respectivamente. A mesma análise é observada na Figura 3.10c. Pode-se concluir parcialmente que a estratégia de uso de *buffer* único no retransmissor permite obter menor taxa de perda de pacotes em comparação com o uso de dois *buffers* separados no retransmissor. Além disso, a proposta de uso de *buffer* nos transmissores e o *buffer* único no retransmissor mostra menos perda de pacotes em comparação com a proposta de uso de *buffer* nos trans-

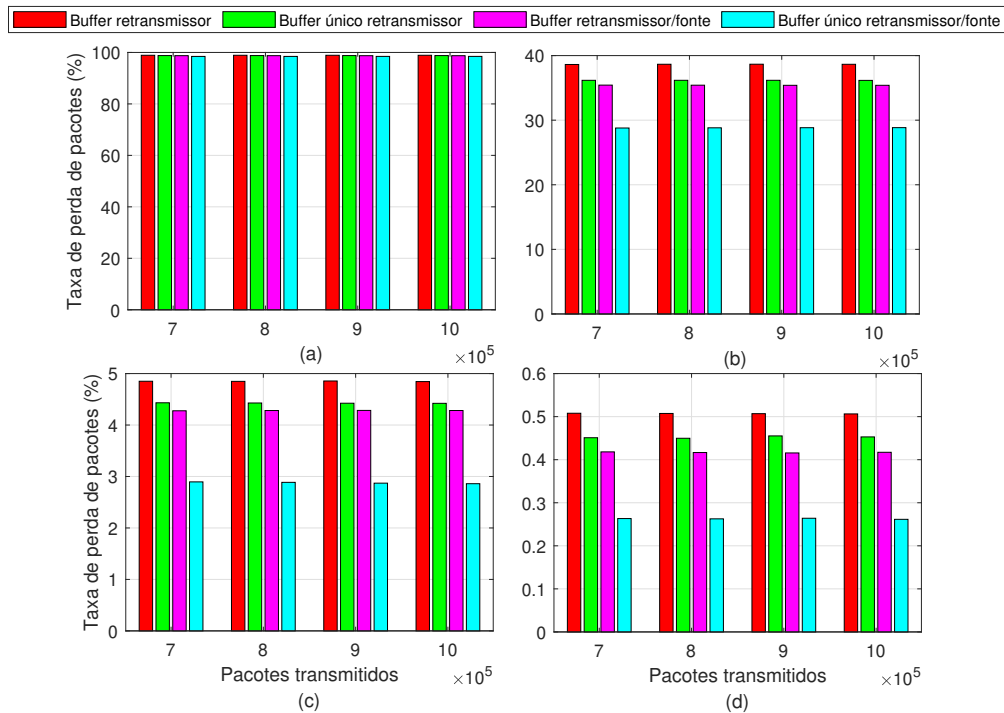


Figura 3.10: Figura comparativa do número de pacotes transmitidos em relação à taxa de perda de pacotes para diferentes valores de SNR: (a) $\rho = -10$ dB, (b) $\rho = 0$ dB, (c) $\rho = 10$ dB, (d) $\rho = 20$ dB.

missores e o *buffer* separado no retransmissor, reiterando ainda mais os benefícios que proporcionam o uso de *buffer* único.

Sintetizando, o uso de *buffer* único mostra que em média menos pacotes são perdidos em comparação com a estratégia de uso de *buffer* separados no retransmissor. Além disso, o uso de um *buffer* único no retransmissor em conjunto com o uso de *buffer* nos transmissores apresentou melhores resultados em termos da taxa de perda de pacotes.

3.4.1 Resultados Numéricos e Analíticos da Probabilidade de Interrupção Individual

A Figura 3.11 mostra o resultado da simulação de Monte Carlo e analítica das Equações (3.1), (3.3), (3.4) dos modelos sem *buffer*, com *buffers* separado no retransmissor, e com *buffer* único no retransmissor, respectivamente. Primeiramente, observa-se que as simulações numéricas coincidem com as simulações analíticas, o que valida o modelo de sistema. Também pode-se ver que o uso de *buffer* único e separados no retransmissor traz um benefício significativo para o modelo de sistema, já que nos fornece menor OP em comparação com o modelo sem *buffer*. Por exemplo, para uma

SNR igual a 0 dB, a curva azul do cenário 1 mostra uma OP de 0.583 enquanto as curvas vermelha e verde dos cenários 2 e 3 mostram uma OP de 0.389 e 0.345, respectivamente. Da mesma forma, com uma SNR igual a 10 dB obtém-se uma OP de 0.083 no cenário 1, e para os cenários 2 e 3 da curva vermelha e verde são alcançados uma OP de 0.047 e 0.042, respectivamente. Representando assim uma diferença de 0.04 entre os cenários com *buffer* e sem *buffer*.

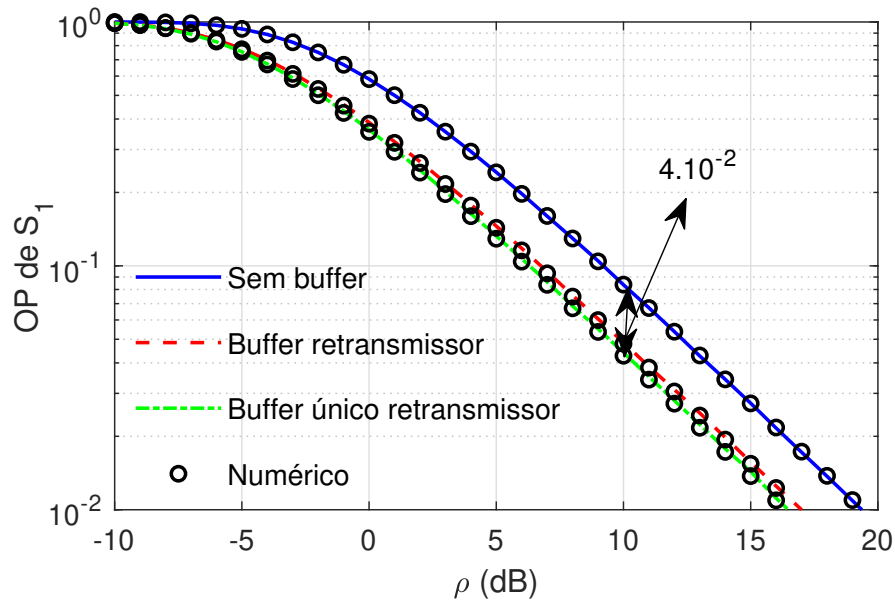


Figura 3.11: A probabilidade de interrupção de S_1 em função da SNR para os Cenários 1, 2 e 3.

Além disso, quando uma probabilidade de interrupção de 0.1 é exigida no sistema, o esquema sem *buffer* alcançará com uma SNR de 8.5 dB enquanto os dois esquemas de uso de *buffer* no retransmissor alcançarão com uma SNR aproximadamente de 6.5 dB.

Outros dados a serem destacados são os valores da OP obtidos nos cenários 2 e 3. Por exemplo, para uma SNR igual a 5 dB, a curva vermelha mostra uma OP de 0.143 enquanto a curva verde mostra uma OP de 0.129, o que representa aproximadamente uma diferença de 11.08%. Embora essa diferença da OP entre o cenário 2 e 3 não seja significativa, para os pacotes não tolerantes ao atraso, o uso de *buffer* único (os resultados da curva verde) pode ser eficiente em comparação com o uso de um *buffer* separado no retransmissor. Ademais o uso de *buffer* único nos fornece um uso eficiente de hardware. Isso ocorre porque no cenário 3 precisa-se de menos estados de transições do que no cenário 2.

A Figura 3.12 mostra a OP em função da SNR. Um maior benefício em termos de OP é alcançado quando implementa-se *buffer* em todos os nós transmissores. Por

exemplo, quando a SNR é igual a 0 dB, a curva magenta atinge uma OP de 0.315, enquanto a curva ciano atinge uma OP igual a 0.294. Resultados semelhantes são obtidos para uma SNR igual a 10 dB, onde uma OP de 0.036 e 0.029 são alcançadas para as curvas magenta e ciano dos cenários 4 e 5, respectivamente. Pode-se concluir

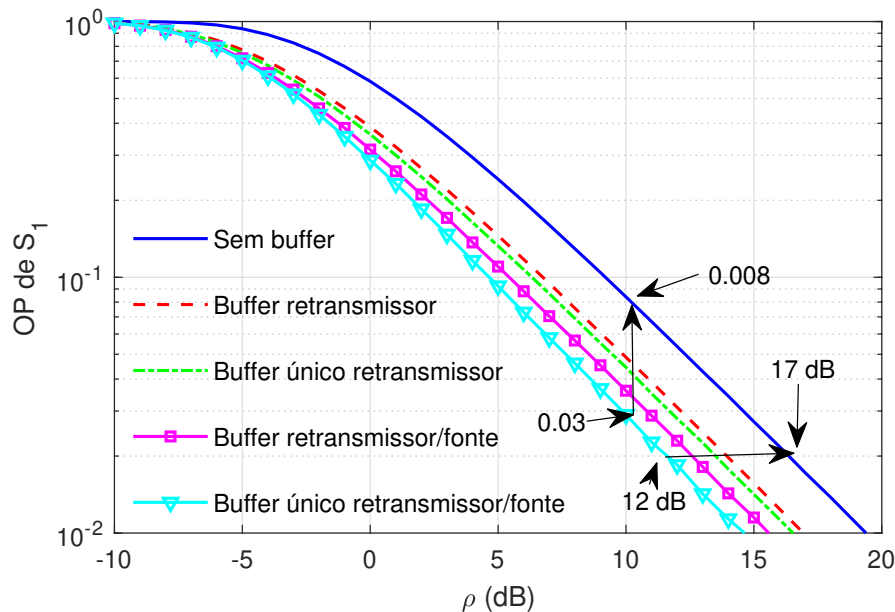


Figura 3.12: A probabilidade de interrupção de S_1 em função da SNR com $\mathfrak{R}_i = 1\text{bpcu}$.

parcialmente que o cenário de *buffer* único no retransmissor junto com o uso de *buffer* no transmissor proporcionam melhor benefício principalmente na OP em relação aos outros cenários discutidos.

Além disso, quando uma OP de 0.02 é necessário no sistema, o cenário 4 alcançará com uma SNR igual a 11.5 dB enquanto o cenário 5 o alcançará com 12.5 dB, representando assim um ganho de 1 dB. Ademais, com os mesmo requisito do sistema, os cenários 2 e 3 as alcançaram com uma SNR igual a 14 dB enquanto o cenário 1 com 16.5 dB. Deduzindo que nossa proposta requer menos SNR em comparação com as existentes para atingir um requisito da probabilidade de interrupção predeterminada.

A Figura 3.13 mostra a OP em função da taxa de transmissão alvo nos cinco cenários investigadas. Pode-se ver que a taxa de transmissão alvo tem um impacto na OP do sistema em todos os cenários discutidos. Por exemplo, com a SNR igual a 10 dB, uma OP de 0.1 é alcançada com uma taxa de 1.1 bpcu no cenário 1, 1.3 bpcu no cenário 2, 1.35 bpcu no cenário 3, 1.4 bpcu no cenário 4 e finalmente 1.6 bpcu no cenário 5. Além disso, com uma mesma SNR e com uma taxa de transmissão alvo igual a 1.5bpcu, a curva azul do cenário 1 atinge uma OP de 0.237, enquanto para uma taxa de transmissão alvo igual a 2bpcu, a mesma curva atinge uma OP de 0.544

representando assim um incremento de 122,9%.

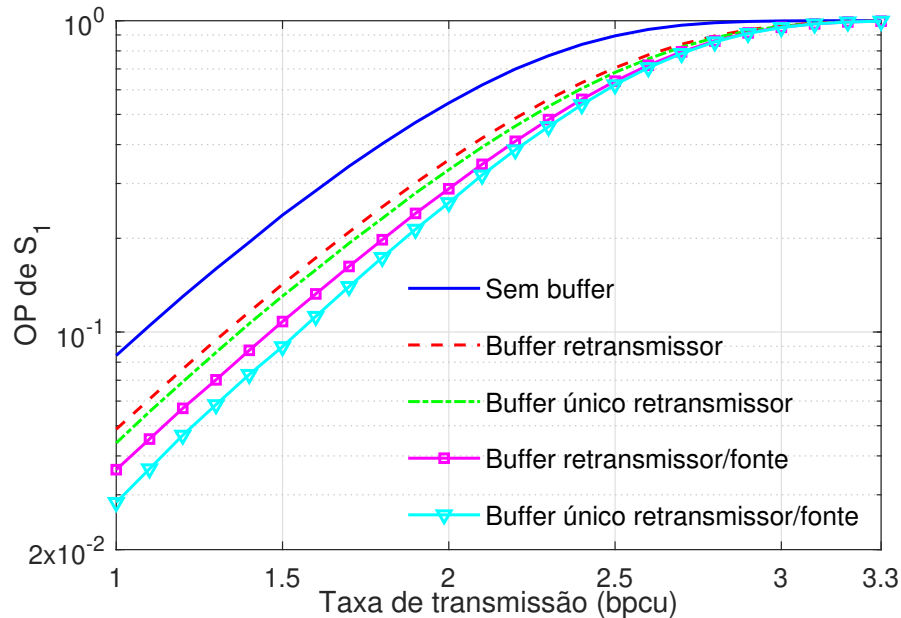


Figura 3.13: A probabilidade de interrupção de S_1 em função da taxa de transmissão alvo com uma SNR igual a 10 dB.

Ademais, com uma SNR igual a 10 dB e com uma taxa de transmissão alvo igual a 2bpcu, a curva ciano alcança uma OP de 0.260, enquanto para uma taxa de transmissão alvo igual a 2.5bpcu a OP incrementa até 0.622. Os cenários 2, 3 e 4 também mostram um aumento na OP sempre que as taxa de transmissão alvo aumentam.

Quando o modelo do sistema requer uma OP mais baixa, nossos esquemas alcançam com uma taxa de transmissão alvo mais baixa. Além disso, para uma taxa de transmissão alvo igual a 3bpcu, os cinco cenários investigados apresentam piores resultados.

A Figura 3.14 mostra a OP individual dos transmissores S_1 e S_2 dos 5 cenários analisados quando varia-se a distância d_{S_1R} com diferentes tamanhos de *buffer*. Em cada um dos cenários investigados, observa-se a distância ideal que proporciona melhor OP individual para os transmissores S_1 e S_2 . Por exemplo, na Figura 3.14a, as distâncias ótimas que melhoram o desempenho da OP individual do transmissor S_1 dos cenário 4 e 5 são aproximadamente igual a 0.51 e 0.416, respectivamente. Enquanto na Figura 3.14b, as distâncias ótimas da OP individual do transmissor S_2 dos cenário 4 e 5 são aproximadamente igual a 0.490 e 0.584, respectivamente. Outro resultado esperado é a simetria refletida das curvas nas Figuras 3.14a e 3.14b. Esta simetria deve-se às condições e configurações idênticas dos dois nós transmissores, já que o retransmissor só pode estar em um ponto fixo entre os dois transmissores.

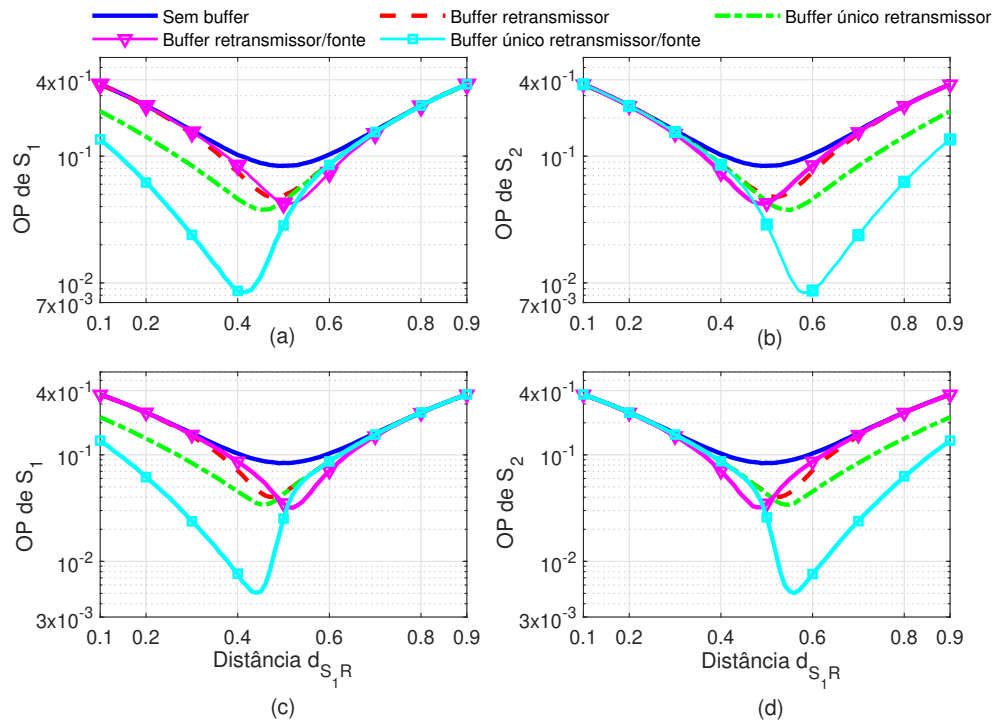


Figura 3.14: A probabilidade de interrupção de S_1 e S_2 em função da distância d_{S_1R} : **a)** de S_1 com uma capacidade de buffer igual a 3, **b)** de S_2 com uma capacidade de buffer igual a 3, **c)** de S_1 com uma capacidade de buffer igual a 6 e **d)** de S_2 com uma capacidade de buffer igual a 6. $\mathfrak{R}_i = 1$ e $SNR = 10$ dB.

Adicionalmente, pode-se observar também que para todos os cenários investigados, a OP individual converge para o mesmo desempenho quando o nó retransmissor está mais afastado do nó transmissor ou quando sua posição é maior que a distância ótima. Por exemplo, na Figura 3.14a e 3.14c, para uma distância igual a 0.8, a OP individual de S_1 dos cinco cenários investigados apresenta o mesmo resultado. O mesmo acontece na Figura 3.14b e 3.14d com uma distância igual a 0.2 neste caso para uma OP individual de S_2 . Pode-se concluir parcialmente que para essas distâncias, os modelos com *buffer* seriam uma opção inadequada para o modelo de sistema devido aos mesmos resultados obtidos que o modelo sem *buffer*.

Além disso, pode-se ver que para um intervalo de distância d_{S_1R} entre 0.2 e 0.4, os cenários 2 e 4 mostram aproximadamente o mesmo desempenho em termos da OP de S_1 , enquanto nos cenários 3 e 5 observa-se diferentes desempenho em termos de OP de S_1 . Por exemplo, na Figura 3.14c, para uma distância igual a 0,3, observa-se que a OP de S_1 da curva verde é 0.074 enquanto a curva ciano apresenta 0.023 representando assim um ganho de 6 dB. Ademais, para a mesma distância, as curvas vermelha e magenta dos cenários 2 e 4 mostram aproximadamente uma OP de S_1 igual a 0.154 na mesma figura. As mesmas constatações foram realizadas na Figura 3.14d. Finalmente, pode-se ver que o uso de *buffer* único no retransmissor mostra melhores resultados

quando o retransmissor está mais próximo do transmissor. Além disso, quanto maior é a capacidade dos *buffers* do sistema, melhor é o resultado obtido em termos de OP individual.

Na Figura 3.15 mostra-se o resultado da OP quando usa-se a distância ótima do Cenário 5. Observa-se que com o uso da distância ótima, um melhor resultado é obtido

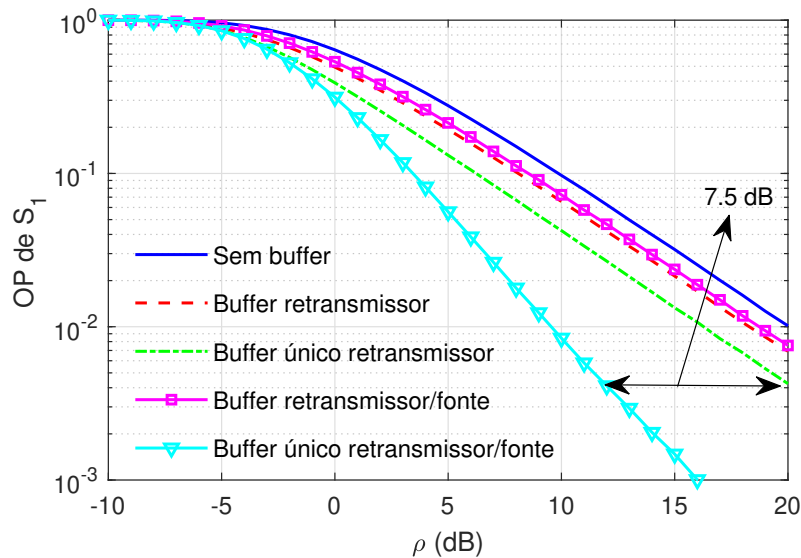


Figura 3.15: Probabilidade de interrupção de S_1 para S_2 em função da SNR com $\mathfrak{R}_i = 1$ e a distância ótima do Cenário 5.

em termos da OP. Por exemplo, usando esta distância ótima com uma SNR igual a 10 dB obtêm-se uma OP igual a 0.008. Isto representa uma melhoria em termos de OP de aproximadamente quatro vezes menor em relação ao obtido na Figura 3.12 ao colocar o retransmissor no centro dos dois transmissores. Esse bom resultado é imperceptível em uma SNR abaixo de 0 dB. Embora a distância ideal para o Cenário 5 é aproximadamente igual a 0,416, não significa que seja a distância ideal para o restante dos cenários. Por exemplo, nesta distância ótima do cenário 5, o cenário 4 tem pior desempenho no sistema em comparação com o analisado na Figura 3.12. Por outro lado, quando o sistema requer uma probabilidade de interrupção de 0.004, então o cenário 5 da curva ciano alcança com 12.5 dB enquanto o cenário 3 da curva verde atinge com 20 dB. Isso representa um ganho de 7.5 dB aproximadamente.

Pode-se deduzir que se configurarmos o nó de retransmissão com essa distância ótima, pode-se observar um resultado satisfatório para SNR maior que 0 dB. Também nesta distância, o cenário a ser implementado no modelo do sistema deve ser escolhido de forma a não prejudicar o desempenho do sistema.

3.4.2 Resultados Numéricos e Analíticos da Probabilidade de Interrupção do Sistema

Assim como na Figura 3.14, na Figura 3.16 mostra-se o comportamento da OP do sistema variando a posição do retransmissor com diferentes valores de tamanho do *buffer*. Nota-se que na Figura 3.16a ao implementar uma capacidade de *buffer* igual a dois menor que as três fases de transmissão disponíveis, o cenário 3 mostra melhor resultado do que o cenário 4. Por exemplo, para uma distância igual a 0.5, a curva magenta

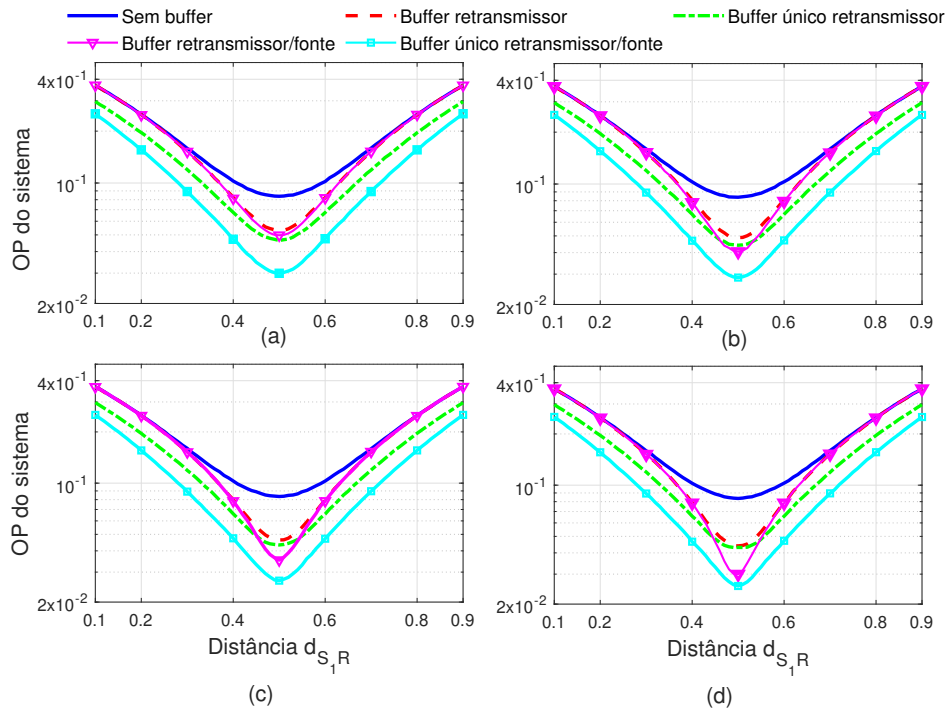


Figura 3.16: Probabilidade de interrupção do sistema em função de $d_{S_1,R}$ com diferentes capacidades de *buffer*: **a)** com a capacidade igual a duas, **b)** com a capacidade igual a três, **c)** com a capacidade igual a quatro, **d)** com a capacidade igual a seis. $\mathfrak{R}_i = 1$ e $SNR = 10$ dB.

do cenário 4 atinge 0.046 de OP do sistema enquanto a curva verde do cenário 3 atinge 0.049 de OP do par. Isso porque, para uma capacidade de *buffer* igual a 2, o cenário 4 não aproveita totalmente os três *time slots* disponíveis em determinado momento da transmissão devido à sua baixa capacidade de armazenamento; enquanto no cenário 3 o uso do *buffer* único permite dobrar a capacidade do *buffer* para 4 proporcionando maior uso do espectro disponível no retransmissor. O oposto é observado quando o tamanho mínimo dos *buffers* é igual às três fases de transmissão. Tomando o exemplo anterior, na Figura 3.16b, observam-se que as OP do sistema das curvas verde e magenta dos cenários 3 e 5 é 0.044 e 0.040, respectivamente.

Adicionalmente, pode-se observar também que a OP do sistema entre os cenários 2 e 4 (curva vermelha e magenta) apresenta pouca variação nas quatro sub-figuras

analisadas na Figura 3.14. O contrário acontece com as curvas dos cenários 3 e 5 (curva verde e ciano), pois observa-se que para um tamanho de *buffer* maior, melhor desempenho é obtido em termos de OP do sistema como mostram as Figuras 3.16b e 3.16c.

Além disso, o cenário 3 melhora mais rápido o desempenho em termos de OP do sistema com o aumento do tamanho do *buffer* do que o cenário 5 como observado nas Figuras 3.14a e 3.14d. Isso ocorre porque o conceito de *buffer* único se aplica no *buffer* do retransmissor, e conforme a capacidade do *buffer* aumenta, reflete diretamente no tamanho do *buffer* único no retransmissor.

Pode-se concluir parcialmente que melhor desempenho pode-se obter se configurarmos os *buffers* com um tamanho mínimo igual às 03 fases de transmissão disponíveis. Ademais, para melhorar o desempenho do sistema em termos da OP do sistema, o retransmissor deve ser definido entre 0.4 e 0.6 mas de preferência a uma distância de 0.5.

3.5 Conclusão Parcial

Este capítulo propôs diferentes estratégias de uso de *buffer* em uma rede bidirecional assistida pelo estado de *buffer* e de canal. Os resultados mostram que melhor desempenho do sistema é obtido quando implementa-se *buffer* único no retransmissor e *buffer* nos transmissores. Além disso, foi possível determinar a posição ideal do retransmissor e o tamanho do *buffer* adequado que fornece melhor desempenho em termos de probabilidade de interrupção. Por outro lado, o uso de *buffer* único e a codificação das mensagens de ambas as direções no retransmissor não só nos proporciona maior uso dos recursos disponíveis, mas também permite atingir um melhor resultado em termo de OP individual e do sistema. Entretanto, o uso de *buffer* em todos os nós nos permitiu melhorar ainda mais o desempenho em termos de probabilidade de interrupção, uma vez que o transmissor tem a capacidade de armazenar temporariamente as informações quando necessário. Apesar dos bons resultados obtidos, seria importante avaliar os benefícios que proporcionam a seleção de retransmissor em um esquema de rede cooperativa. Para isso, será investigado no próximo capítulo o desempenho da probabilidade de interrupção em uma rede de CR *underlay* com a técnica NOMA com seleção de retransmissor baseada no estado do *buffer*.

Capítulo 4

Análise de Desempenho de Rede CR *Underlay* com a Técnica NOMA com Seleção de Retransmissor baseada no Estado do *Buffer*

O rápido desenvolvimento no campo dos serviços de comunicação sem fio aumentou a demanda de recursos de espectro, tornando a tecnologia de rádio cognitivo a solução mais promissora para aumentar a reutilização de espectro [76]. Por outro lado, o NOMA, é considerado uma das tecnologias capaz de atender aos requisitos de alta velocidade, conectividade massiva e baixa latência em 5G, Internet das coisas (IoT) e 6G [77–79]. Isso porque NOMA usa codificação de sobreposição e cancelamento sucessivo de interferência (SIC), permitindo que usuários com condições de canal significativamente diferentes compartilhem o mesmo bloco de recursos. Este capítulo discorre sobre desempenho da probabilidade de interrupção da rede CR *underlay* com a técnica NOMA com seleção de retransmissor baseado no estado do *buffer*.

4.1 Modelo de Sistema

Considera-se uma rede CR *underlay* com a técnica NOMA cooperativa *downlink* e um esquema de seleção de retransmissor (SR) baseado no estado do *buffer* como mostrado na Figura 4.1. Essa figura, apresenta os diferentes cenários que foram considerados para avaliar o desempenho do sistema. O modelo do sistema considera um destino primário D_p , um único transmissor secundário S , dois retransmissores secundários R_k onde k é o índice do retransmissor e $k \in \{1, 2\}$, cada nó retransmissor R_k está equi-

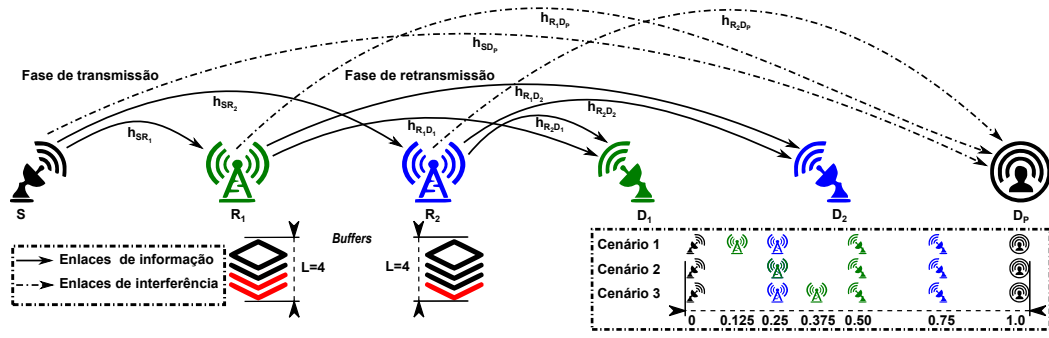


Figura 4.1: Modelo de sistema: sistema CR-NOMA cooperativo auxiliado por buffer de dois saltos sujeito à restrição de energia de interferência de PU. Descrição de três cenários operacionais para avaliar o desempenho do sistema.

pado com um *buffer* de dados de tamanho finito com L de capacidade e finalmente dois destinos secundários D_q onde q é o índice dos destinos secundários e $q \in \{1, 2\}$. Todos os nós estão equipados com uma única antena. Admite-se que não existe um enlace direto entre os nós de origem e de destino. Os retransmissores operam no modo HD com base no princípio de DF. Todos os canais envolvidos são i.i.d com desvanecimento Rayleigh do tipo não seletivo em frequência e com AWGN.

O canal entre o transmissor i e o receptor j é denotado h_{ij} , com potência média $\lambda_{ij} = d_{ij}^{-\alpha}$ com $i \in \{S, R_k\}$, $j \in \{R_k, D_l\}$ e $l \in \{q, p\}$, α representa o fator de perda de percurso e d_{ij} a distância do enlace correspondente. Admite-se que o transmissor primário está longe da rede secundária de forma que a interferência pode ser vista como ruído. A taxa de transmissão alvo é \mathfrak{R}_i [bpcu]. Considera-se duas fases de operação, a de transmissão ($S \rightarrow R_k$) e a de retransmissão ($R_k \rightarrow D_q$). A estratégia SR é baseada no estado do *buffer* de retransmissão, conforme mostra em [48].

De acordo com o cenário da rede CR *underlay*, as transmissões dos SUs são permitidas apenas quando a interferência causada por S ou R_k a D_p atende ao nível mínimo de interferência estabelecido. Assim, a potência de transmissão de S e do nó retransmissor selecionado R_k podem ser expressos respectivamente como:

$$P_S \leq \frac{I}{|h_{SD_p}|^2}, \tag{4.1}$$

$$P_{R_k} \leq \frac{I}{|h_{R_k D_p}|^2}, \tag{4.2}$$

onde I é o limite de interferência aceito por D_p .

4.1.1 Fase de Transmissor-Retransmissor

Na fase de transmissão, a técnica NOMA não foi utilizada e as informações para cada SU são enviadas em canais ortogonais no tempo ou seja o modo de divisão de tempo. A SNR correspondente a cada retransmissor é expressa como:

$$\gamma_{SR_k} = \frac{I |h_{SR_k}|^2}{|h_{SD_p}|^2 N_0}. \quad (4.3)$$

Portanto, a probabilidade de interrupção do enlace $S \rightarrow R_k$ é:

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{SR_k} &= \mathcal{P}(\gamma_{SR_k} < \epsilon_S) \\ &= \int_0^\infty \int_0^{y^\mu} \frac{e^{-\frac{x}{\lambda_{SR_k}}}}{\lambda_{SR_k}} \frac{e^{-\frac{y}{\lambda_{SD_p}}}}{\lambda_{SD_p}} dx dy \\ &= 1 - \frac{\lambda_{SR_k}}{\lambda_{SR_k} + \mu \lambda_{SD_p}}, \end{aligned} \quad (4.4)$$

onde $\mu = \left(\frac{\epsilon_S N_0}{I}\right)$, $\epsilon_S = 2^{4\mathfrak{R}_i} - 1$. A taxa de transmissão alvo deve ser duplicada em cada fase, pois os retransmissores operam no modo half-duplex, $2\mathfrak{R}_i$. Além disso, na fase de transmissão, o modo de divisão de tempo exige que seja multiplicado pelo número do usuário de destino resultando em $4\mathfrak{R}_i$. N_0 é a potência de ruído.

4.1.2 Fase de Retransmissor-Destino Baseado em NOMA

Na fase de retransmissão, utiliza-se a técnica NOMA e o sinal retransmitido pode ser obtido pela seguinte equação:

$$x(t) = \sqrt{aP_{R_k}}x(t)_1 + \sqrt{(1-a)P_{R_k}}x(t)_2, \quad (4.5)$$

onde a é o fator de PA com $0 \leq a \leq 0.5$. x_1 e x_2 denotam a informação para o destino correspondente D_q com a restrição de potência de $E[|x_q|^2] = 1$. Portanto, a informação recebida em D_q é:

$$y_q = h_{R_k D_q}x + w_q, \quad (4.6)$$

onde w_q indica o componente do AWGN em D_q . Admite-se que D_2 está relativamente mais longe de R_k do que D_1 , então o enlace $R_k \rightarrow D_1$ é mais forte do que o canal $R_k \rightarrow D_2$. Assim, de acordo com o princípio NOMA, o retransmissor selecionado aloca mais potência de transmissão para a informação de destino distante. Consequen-

temente, a SINR instantânea de D_2 percebida por D_q é:

$$\gamma_{R_k D_q, D_2} = \frac{(1-a)I |h_{R_k D_q}|^2}{aI |h_{R_k D_q}|^2 + N_0 |h_{R_k D_p}|^2}. \quad (4.7)$$

Então, após o processo SIC, D_1 detecta seu próprio sinal, onde sua SNR é dado por:

$$\gamma_{R_k D_1, D_1} = \frac{aI |h_{R_k D_1}|^2}{N_0 |h_{R_k D_p}|^2}. \quad (4.8)$$

Portanto, a probabilidade de interrupção do enlace $R_k \rightarrow D_1$ é

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{R_k D_1} &= \mathcal{P}((\gamma_{R_k D_1, D_2} < \epsilon_{R_k}) \cup (\gamma_{R_k D_1, D_1} < \epsilon_{R_k})) \\ &= \int_0^\infty \int_0^{y\kappa} \frac{e^{-\frac{x}{\lambda_{R_k D_1}}}}{\lambda_{R_k D_1}} \frac{e^{-\frac{y}{\lambda_{R_k D_p}}}}{\lambda_{R_k D_p}} dx dy \\ &= \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{R_k D_1}}{\kappa \lambda_{R_k D_p}}}, \end{aligned} \quad (4.9)$$

Com $\kappa = \left(\frac{\epsilon_{R_k} N_0}{I \theta_{R_k}}\right)$ onde $\theta_{R_k} \cong \min(a, (1 - a(1 - \epsilon_{R_k})))$ e $\epsilon_{R_k} = 2^{2R_k} - 1$. Enquanto a probabilidade de interrupção do enlace $R_k \rightarrow D_2$ é:

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{R_k D_2} &= \mathcal{P}(\gamma_{R_k D_2, D_2} < \epsilon_{R_k}) \\ &= \int_0^\infty \int_0^{y\varpi} \frac{e^{-\frac{x}{\lambda_{R_k D_2}}}}{\lambda_{R_k D_2}} \frac{e^{-\frac{y}{\lambda_{R_k D_p}}}}{\lambda_{R_k D_p}} dx dy \\ &= \frac{1}{1 + \frac{\lambda_{R_k D_2}}{\varpi \lambda_{R_k D_p}}}, \end{aligned} \quad (4.10)$$

onde $\varpi = \left(\frac{\epsilon_{R_k} N_0}{I(1 - a(1 - \epsilon_{R_k}))}\right)$.

Para garantir a qualidade de serviço (*do inglês: Quality of Service, QoS*) para ambos os destinos, avalia-se a OP do par do enlace $R_k \rightarrow D_q$. A métrica é definida como a probabilidade de que pelo menos um usuário não decodifique corretamente seu próprio sinal, que pode ser escrito como:

$$\mathcal{O}_{R_k D} = 1 - (1 - \mathcal{O}_{R_k D_1})(1 - \mathcal{O}_{R_k D_2}). \quad (4.11)$$

4.2 Algoritmo de Seleção de enlace

Esta seção é uma extensão das análises apresentadas em [48], com adaptação no esquema de seleção de enlaces. Assim, para esse trabalho considera-se um cenário mais geral onde, no início de cada *time slot*, S , D_1 e D_2 transmitem sinais de referência curtos. De acordo com esses sinais de referência, cada R_k estima seus respectivos estados de canal, assumindo um modelo de canal simétrico para a fase de retransmissão. Com base nessas informações juntamente com os respectivos estados do *buffers*, cada retransmissor será capaz de determinar a possibilidade de transmissão e/ou recepção a cada *time slot*, seguindo a lógica descrita na Tabela 4.1 de [48]. Por exemplo, no primeiro caso, observa-se que quando o retransmissor não tem pacotes para transmitir e o enlace h_{SR_k} não está disponível, então o retransmissor permanece em silêncio. Outro exemplo ilustrativo é o quinto caso, onde o retransmissor decide receber, devido à disponibilidade de ambos enlaces, já que possui apenas um ou nenhum pacote no buffer.

Tabela 4.1: Método de Seleção

Casos	L_k	enlace SR_k	enlace R_kD_q	Decisão
1	$L_k = 0$	indisponível		Silêncio
2	$L_k = L$		indisponível	
3		indisponível	indisponível	
4	$L_k < L$	disponível	indisponível	Recebe
5	$L_k \leq 1$	disponível	disponível	
6	$L_k > 0$	indisponível	disponível	transmite
7	$L_k \geq 2$	disponível	disponível	

Denota-se \mathcal{T} e \mathcal{R} o conjunto que contém os retransmissores capazes de transmitir e receber, respectivamente, ϕ denota o conjunto vazio. Na próxima etapa é selecionado o melhor retransmissor de acordo com cada situação: i) quando $\{\mathcal{R} = \phi, \mathcal{T} \neq \phi\}$, o retransmissor com mais pacotes em *buffer* dentro do conjunto dos retransmissores prontos para transmitir é selecionado para transmitir; ii) quando $\{\mathcal{R} \neq \phi, \mathcal{T} = \phi\}$, o retransmissor com menos pacotes no *buffer* dentro do conjunto dos retransmissores prontos para receber é selecionado para receber; iii) quando $\{\mathcal{R} = \phi, \mathcal{T} = \phi\}$ todos os enlaces disponíveis estão em indisponível, portanto, nenhum retransmissor é selecionado; finalmente quando $\{\mathcal{R} \neq \phi, \mathcal{T} \neq \phi\}$ o retransmissor de \mathcal{T} com mais pacotes no *buffer* (denota-se L_{\max}) e o retransmissor de \mathcal{R} com menos pacotes no *buffer* (denota-se L_{\min}) são selecionados a fim de definir a ação a ser executada. Com base nesses elementos, ele decide se transmite ou recebe de acordo com a Tabela 4.2 [48]. Denota-se TX e RX a decisão de transmitir e receber, respectivamente.

Agora, estende-se o algoritmo de [48] para um cenário mais geral em que os retrans-

Tabela 4.2: Método de Seleção de Ação

Casos	L_{\max}	L_{\min}	Decisão
1	$L_{\max} = L$		TX
2	$L_{\max} < L$	$L_{\min} = 0$	RX
3	$2 \leq L_{\max} < L$	$L_{\min} > 0$	TX
4	$L_{\max} = 1$	$L_{\min} > 0$	RX

missores estão em posições diferentes na rede, diferentemente do algoritmo original que considera os nós dos retransmissores a uma mesma distância de todos os nós. O objetivo principal é minimizar a interferência causada pelos SUs para D_p e aproveitar o melhor canal disponível para transmitir na rede. No algoritmo original de [48], quando todos os retransmissores possuem a mesma quantidade de dados, decidem receber os dados e os enlaces correspondentes estão disponíveis então o transmissor envia com igual probabilidade para o retransmissor correspondente $P = 1/2$. Diferente de [48], aqui é decidido enviar para o retransmissor com melhor ganho de canal dentro dos canais transmissor-retransmissor. A probabilidade de escolher este canal é mostrada abaixo:

$$\begin{aligned}
\mathcal{O}_{R_2}^{link} &= \mathcal{P}(|h_{SR_2}|^2 > |h_{SR_1}|^2) \\
&= \int_0^\infty \int_x^\infty \frac{e^{-\frac{x}{\lambda_{SR_1}}}}{\lambda_{SR_1}} \frac{e^{-\frac{y}{\lambda_{SR_2}}}}{\lambda_{SR_2}} dy dx \\
&= \frac{\lambda_{SR_2}}{\lambda_{SR_2} + \lambda_{SR_1}}, \tag{4.12}
\end{aligned}$$

Onde $\mathcal{O}_{R_1}^{link} = 1 - \mathcal{O}_{R_2}^{link}$.

Em [48], quando todos os retransmissores possuem o mesmo número de pacotes na *buffer* e os enlaces correspondentes estão disponíveis, a seleção do retransmissor é feita assumindo a mesma probabilidade para todos os retransmissores considerados. Ao contrário de [48], aqui é selecionado o retransmissor com a melhor relação entre os enlaces $R_k \rightarrow D_f$ e $R_k \rightarrow D_p$. D_f é o destino mais distante do retransmissor k . Esta seleção é feita com o objetivo de maximizar o ganho do canal para o destino distante e minimizar a interferência para D_p . Portanto, a probabilidade de escolha o retransmissor R_1 é:

$$\mathcal{O}_{R_1}^{link*} = \mathcal{P}\left(\frac{|h_{R_1 D_1}|^2}{|h_{R_1 D_p}|^2} > \frac{|h_{R_2 D_2}|^2}{|h_{R_2 D_p}|^2}\right). \tag{4.13}$$

Para $g_1 = \frac{|h_{R_1 D_2}|^2}{|h_{R_1 D_p}|^2}$ e $g_2 = \frac{|h_{R_2 D_2}|^2}{|h_{R_2 D_p}|^2}$ então a função densidade de probabilidade (do

inglês: *probability density function*, PDF) de g_1 é $f_1(x) = \frac{\lambda_{R_1 D_2} \lambda_{R_1 D_p}}{(\lambda_{R_1 D_2} + x \lambda_{R_1 D_p})^2}$ e a PDF de g_2 é $f_2(y) = \frac{\lambda_{R_2 D_2} \lambda_{R_2 D_p}}{(\lambda_{R_2 D_2} + y \lambda_{R_2 D_p})^2}$.

$$\begin{aligned} \mathcal{O}_{R_1}^{link*} &= 1 - \int_0^\infty \int_0^y f_1(x) f_2(y) dx dy \\ &= 1 - \frac{\lambda_{R_1 D_2} \lambda_{R_2 D_p} + \frac{\lambda_{R_1 D_2} \lambda_{R_2 D_p}}{\lambda_{R_1 D_p} \lambda_{R_2 D_2}} \log \left(\frac{\lambda_{R_1 D_2} \lambda_{R_2 D_p}}{\lambda_{R_1 D_p} \lambda_{R_2 D_2}} \right)}{\left(1 - \frac{\lambda_{R_1 D_2} \lambda_{R_2 D_2}}{\lambda_{R_1 D_p} \lambda_{R_2 D_2}} \right)^2}, \end{aligned} \quad (4.14)$$

para $\lambda_{R_1 D_1} \neq \lambda_{R_2 D_1}$ e $\lambda_{R_1 D_2} \neq \lambda_{R_2 D_2}$. Caso contrário, a probabilidade de interrupção que seleciona $\mathcal{O}_{R_2}^{link*}$ é dado por:

$$\mathcal{O}_{R_2}^{link*} = 1 - \mathcal{O}_{R_1}^{link*}. \quad (4.15)$$

4.3 Matriz de Transição de Estado da Cadeia de Markov

Nesta seção, mostra-se a probabilidade de interrupção do esquema proposto com base nas análises da Cadeia de Markov. Primeiro, define-se \mathbf{A} como a matriz de transmissão de estado da cadeia de Markov de pacotes de dados armazenados em cada *buffer*, Ψ_n^s é o conjunto de enlace de sucesso do estado S_n e Ψ_n é o conjunto de enlaces disponíveis do estado S_n . Com base em [48], as probabilidades de transitar do estado S_n para o estado S_m são descritas por:

$$A_{mn} = \sum_{\Psi_n^s \subset \Psi_n} \mathcal{P}(\Psi_n^s) \mathcal{P}(S_n \rightarrow S_m | \Psi_n^s), \quad (4.16)$$

A probabilidade de permanecer no mesmo estado é:

$$A_{nn} = \prod_{l_{ij} \in \Psi_n} P_{ij}, \quad (4.17)$$

onde $\mathcal{P}(\Psi_n^s) = \prod_{h_{ij} \in \Psi_n^s} (1 - P_{ij}) \prod_{h_{ij} \in \Psi_n, l_{ij} \notin \Psi_n^s} P_{ij}$ é a probabilidade de que um subconjunto Ψ_n^s do enlace disponível Ψ_n possa entregar um pacote com sucesso. As probabilidades de estado estacionário de acordo com [80] são dadas por:

$$\boldsymbol{\pi} = (\mathbf{A} - \mathbf{I} + \mathbf{B})^{-1} \mathbf{b}, \quad (4.18)$$

onde \mathbf{B} é a $(L+1)^K \times (L+1)^K$ matriz com todos os elementos sendo um, $\boldsymbol{\pi} = [\pi_1, \dots, \pi_{(L+1)^K}]$, $\mathbf{b} = [1, \dots, 1]^T$, \mathbf{I} é a matriz de identidade. Finalmente, a probabilidade média de interrupção é:

$$\mathcal{O} = \text{diag}(\mathbf{A})\boldsymbol{\pi}. \quad (4.19)$$

4.4 Resultados Numéricos

Nesta seção apresentam-se os resultados numéricos, a fim de avaliar o desempenho do esquema CR-NOMA proposto em termos de OP. Avalia-se a OP para os três cenários particulares apresentados na Figura 4.1. Em todos os casos, considera-se o Cenário 1 (ver Figura 4.1) com dois retransmissores e duas capacidades de pacote no *buffer* ($L = 2$), exceto quando o oposto for dito. No total, há nove estados da cadeia de Markov para representar os estados do *buffer*, conforme mostrado na Tabela 4.3. O diagrama de transição de estado para o cenário particular é mostrado na Figura 4.2 [48].

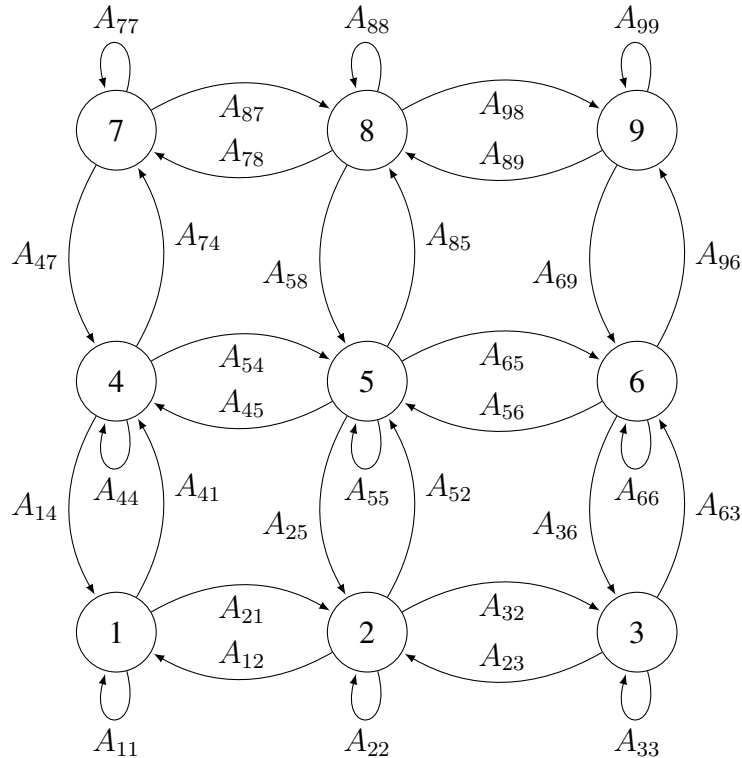


Figura 4.2: Diagrama de transição de estado para o cenário com dois retransmissores e $L = 2$

Considera-se a taxa de transmissão alvo $\mathfrak{R}_i = 1$ bpcu, potência do ruído $N_0 = 1$, o expoente de perda de percurso $\alpha = 4$ e o fator de alocação de potência $a = 0.2$. O limite de interferência aceito por D_p é $I = 10$ [dB]. Inicialmente, todos os *buffers*

Tabela 4.3: Estados do sistema de retransmissor com dois retransmissores e $L=2$

Estado	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9
$L_1 L_2$	00	01	02	10	11	12	20	21	22

estão vazios e todas as distâncias são normalizadas com referência a d_{SD_p} .

A Figura 4.3 mostra a probabilidade de interrupção em função do limite de interferência aceito por D_p , enquanto a Figura 4.4 mostra a OP em função do fator de alocação de potência, em ambos os casos para diferentes capacidades de *buffer*, $L = \{0, 1, 2, 3\}$. Considera-se o esquema Max-Min SR para o caso sem *buffer*, $L = 0$.

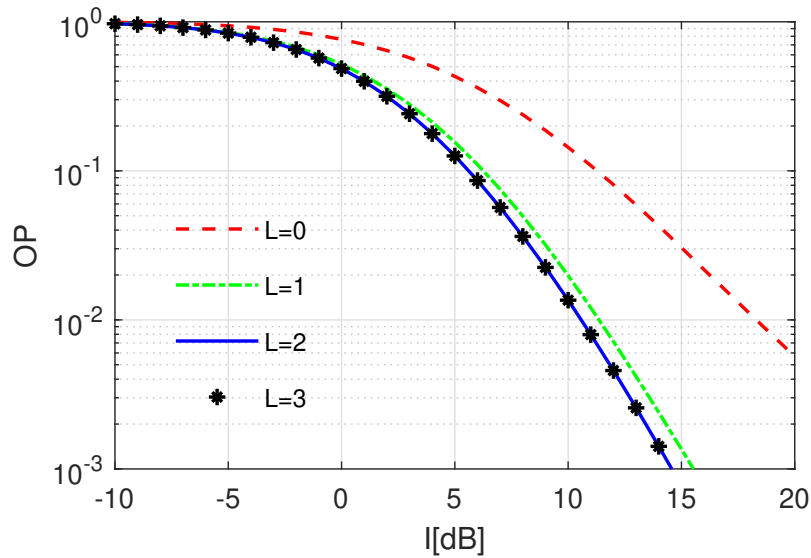


Figura 4.3: Probabilidade de interrupção em função de I com $a = 0.2$ para diferentes capacidades de *buffer*.

Observe que para o cenário específico, o desempenho em termos da OP melhora com o incremento na capacidade do *buffer*. Para $L \geq 2$ o desempenho do sistema converge para a mesma OP. Conclusões semelhantes podem ser obtidas na Figura 4.4 quando o impacto do fator de alocação de potência a é investigado. Observe que a OP melhora à medida que I aumenta, veja a Figura 4.3, enquanto o valor ótimo de a está próximo de 0.1 para todas as capacidades consideradas, veja a Figura 4.4.

A Figura 4.5 mostra a probabilidade de interrupção em função do limite de interferência aceito por D_p , enquanto a Figura 4.6 mostra a OP em função do fator de alocação de potência, de acordo com o retransmissor(es) ativo(s) no Cenário 1 (ver Figura 4.1). Observe que o desempenho do sistema melhora quando o retransmissor ativo está no meio da distância d_{SD_1} , mas um benefício maior é alcançado em termos de OP quando o número de retransmissores ativos aumenta. Como se pode verificar, há

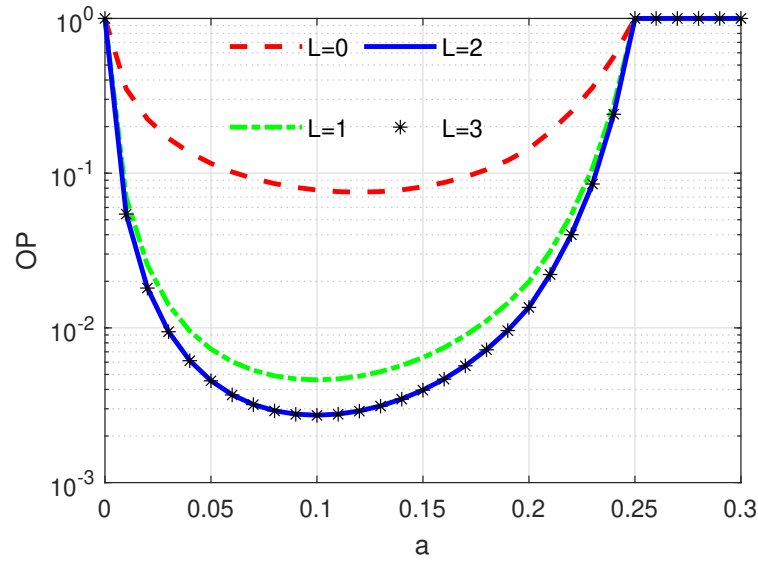


Figura 4.4: Probabilidade de interrupção em função de a com $I = 10$ dB para diferentes capacidades de buffer.

uma correspondência entre os resultados numéricos e teóricos, o que mostra a validade do trabalho realizado. Da Figura 4.6, pode-se ver que o valor ótimo é $a = 0,1$ para o

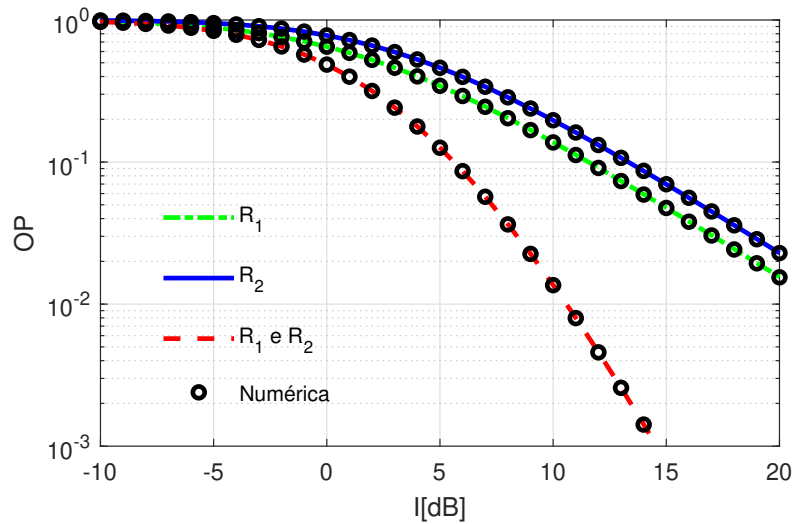


Figura 4.5: Probabilidade de interrupção em função de I com $a = 0,2$ para diferentes retransmissores operacionais.

cenário com ambos os retransmissores ativos, o que permite atingir um OP de 0,003.

A Figura 4.7 mostra a probabilidade de interrupção em função do limite de interferência aceito por D_p , enquanto a Figura 4.8 mostra OP em função do fator de alocação de potência, para os três propostos cenários. Observe que quando ambos os retransmissores estão ativos, o uso de buffers encontra um benefício maior ao se aproximar dos nós de destino para garantir a entrega com sucesso na fase de retransmissão.

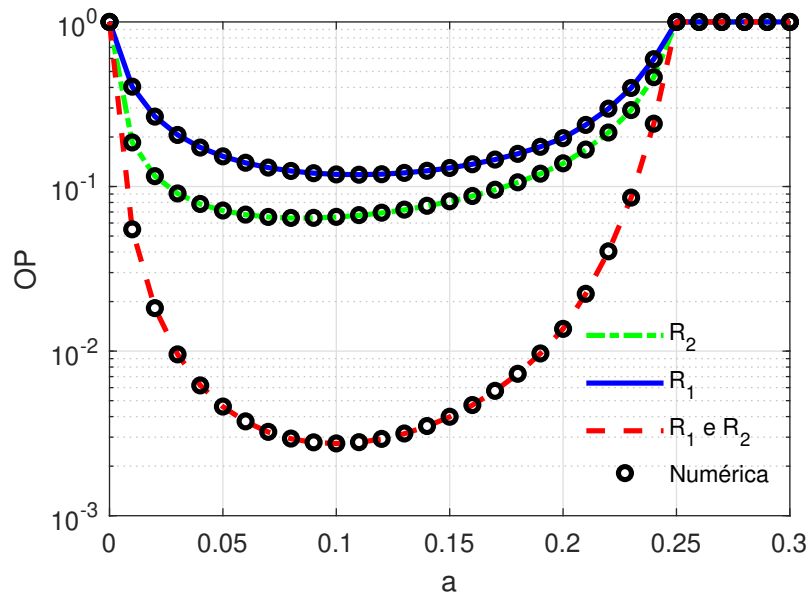


Figura 4.6: Probabilidade de interrupção em função de a com $I = 10$ dB para diferentes retransmissores operacionais.

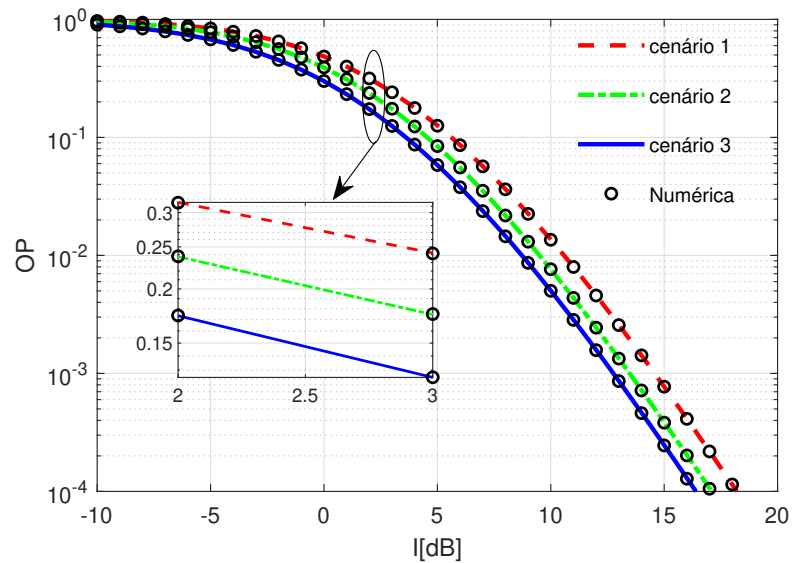


Figura 4.7: Probabilidade de interrupção em função de I com $a = 0.2$ para os três cenários considerados.

Além disso, esse fato melhora o desempenho do esquema CR-NOMA, aumentando a probabilidade de decodificação com sucesso. Observe que o fator PA diminui à medida que R_1 se aproxima dos destinos, ver Figura 4.8.

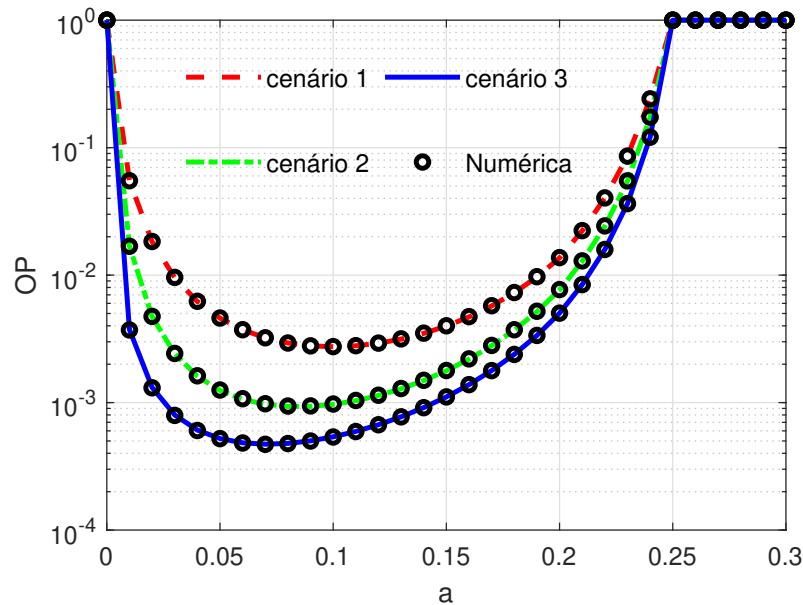


Figura 4.8: Probabilidade de interrupção em função de a com $I = 10$ dB para os três cenários considerados.

4.5 Conclusão Parcial

Neste capítulo, foi realizada uma análise sobre a seleção de retransmissor baseada no estado do *buffer* em uma rede CR *underlay* com a técnica NOMA. As análises mostraram que um melhor resultado é obtido para o cenário onde um dos retransmissores está mais próximo da rede NOMA. Além disso, um maior benefício em termos de OP é alcançado quando o número de retransmissores ativos aumenta. Por outro lado, um melhor desempenho do sistema pode ser obtido com uma escolha adequada da capacidade do *buffer* em cada retransmissor e do fator de alocação de potência na fase de retransmissão.

Capítulo 5

Conclusões e Propostas para Novas Pesquisas

5.1 Conclusões

Nesta dissertação, foi proposto um modelo de uso de *buffer* mais generalizado em termos de dispositivos com *buffer* e uma estratégia de uso do mesmo em redes cooperativas. Os esquemas propostos foram analisados em termos da probabilidade de interrupção.

Após uma revisão bibliográfica, pôde-se perceber que os atuais modelos de redes cooperativas não consideram o uso de *buffer* em todos os nós. No Cap. 3 foi analisada uma rede cooperativa bidirecional. Foi possível concluir que o uso de *buffer* único no retransmissor não só nos proporciona melhores benefícios em termos de probabilidade de interrupção, mas também na utilização do espectro disponível em cada *time slot* em relação aos modelos existentes. Além disso, foi possível evitar a saturação do *buffer* único e reduzir o atraso de pacote através de codificação de mensagem no retransmissor quando o *buffer* único contém mensagem de ambas as direções. Por outro lado, em uma condição de canal não ideal, a proposta de uso de *buffer* em todos os nós envolvidos permite alcançar menor probabilidade de interrupção, uma vez que o nó transmissor pode armazenar temporariamente a informação enquanto aguarda uma melhor condição de canal. Entretanto, com o algoritmo de transmissão/recepção implementado na rede cooperativa bidirecional se alcançou incrementar o número de pacotes recebidos. Em particular, para esta rede investigada um melhor desempenho do sistema pode ser obtido com uma escolha adequada da capacidade do *buffer* em cada nó.

No Cap. 4 foi analisada uma rede de rádio cognitiva *underlay* com a técnica

NOMA. As análises mostraram que um melhor resultado é obtido para o cenário em que um dos retransmissores está mais próximo da rede NOMA. Além disso foi possível concluir que uma escolha adequada do fator de alocação de potência e do número de retransmissores pode oferecer uma maior diversidade na seleção do retransmissor e consequentemente melhorar o desempenho do sistema em termos da probabilidade.

De forma geral, para as redes cooperativas investigadas, foi possível determinar a posição do(s) retransmissor(es) que melhora consideravelmente o desempenho do sistema, e com uma escolha adequada da mesma é possível melhorar ainda mais o desempenho do sistema.

5.2 Sugestões de Trabalhos Futuros

Após a realização desta pesquisa, os seguintes trabalhos são propostos como novas pesquisas no futuro: Analisar o impacto do atraso dos pacotes nos diferentes cenários avaliados para garantir a QoS nos cenários não tolerante ao atraso visto que o uso de *buffer* nos dispositivos pode incrementar o atraso de pacote e causar um descarte de pacote no receptor. Incorporar a tecnologia de *energy harvesting* (EH) ao retransmissor da rede cooperativa bidirecional investigada, aproveitando os tempos de inatividade do retransmissor para coletar energia. Essa coleta de energia pode ser de rádio frequência. Realizar uma proposta baseada na seleção de retransmissor para os cenários discutidos no Capítulo 3. Implementar um modelo semi-Markov para otimizar os esquemas propostos e estimar o tempo de espera em cada estado do diagrama dos cenários com uso de *buffer* nas redes cooperativas investigadas. Isso porque o modelo semi-Markov permite ao processo “lembrar” não apenas o estado atual, mas também há quanto tempo ele está no estado atual.

Referências Bibliográficas

- [1] E. Ezhilarasan and M. Dinakaran, “A Review on Mobile Technologies: 3G, 4G and 5G,” in *2017 Second International Conference on Recent Trends and Challenges in Computational Models (ICRTCCM)*, 2017, pp. 369–373.
- [2] J.-Z. Sun, J. Sauvola, and D. Howie, “Features in future: 4G visions from a technical perspective,” in *GLOBECOM’01. IEEE Global Telecommunications Conference (Cat. No.01CH37270)*, vol. 6, 2001, pp. 3533–3537 vol.6.
- [3] S. Frattasi, H. Fathi, F. Fitzek, R. Prasad, and M. Katz, “Defining 4G technology from the users perspective,” *IEEE Network*, vol. 20, no. 1, pp. 35–41, 2006.
- [4] A. Gohil, H. Modi, and S. K. Patel, “5G technology of mobile communication: A survey,” in *2013 International Conference on Intelligent Systems and Signal Processing (ISSP)*, 2013, pp. 288–292.
- [5] X. Ge, S. Tu, G. Mao, C.-X. Wang, and T. Han, “5G Ultra-Dense Cellular Networks,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 23, no. 1, pp. 72–79, 2016.
- [6] Ericsson, “Ericsson Mobility Report,” November 2020. [Online]. Available: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report>
- [7] M. Shafi, A. F. Molisch, P. J. Smith, T. Haustein, P. Zhu, P. De Silva, F. Tufvesson, A. Benjebbour, and G. Wunder, “5G: A Tutorial Overview of Standards, Trials, Challenges, Deployment, and Practice,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 6, pp. 1201–1221, 2017.
- [8] ITU-R, “Minimum requirements related to technical performance for IMT-2020 radio interface(s),” *Technical Report M.[IMT-2020.TECH PERF REQ]*, October 2016.
- [9] T. Huang, W. Yang, J. Wu, J. Ma, X. Zhang, and D. Zhang, “A Survey on Green 6G Network: Architecture and Technologies,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 175 758–175 768, 2019.
- [10] P. Yang, Y. Xiao, M. Xiao, and S. Li, “6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques,” *IEEE Network*, vol. 33, no. 4, pp. 70–75, 2019.

- [11] S. Chen, Y.-C. Liang, S. Sun, S. Kang, W. Cheng, and M. Peng, “Vision, Requirements, and Technology Trend of 6G: How to Tackle the Challenges of System Coverage, Capacity, User Data-Rate and Movement Speed,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 2, pp. 218–228, 2020.
- [12] B. Zong, C. Fan, X. Wang, X. Duan, B. Wang, and J. Wang, “6G Technologies: Key Drivers, Core Requirements, System Architectures, and Enabling Technologies,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 14, no. 3, pp. 18–27, 2019.
- [13] T. Hewa, G. Gür, A. Kalla, M. Ylianttila, A. Bracken, and M. Liyanage, “The Role of Blockchain in 6G: Challenges, Opportunities and Research Directions,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–5.
- [14] S. Ariyanti and M. Suryanegara, “Visible Light Communication (VLC) for 6G Technology: The Potency and Research Challenges,” in *2020 Fourth World Conference on Smart Trends in Systems, Security and Sustainability (WorldS4)*, 2020, pp. 490–493.
- [15] H. Huang, S. Hu, T. Yang, and C. Yuan, “Full Duplex Non-orthogonal Multiple Access with Layers-based Optimized Mobile Relays Subsets Algorithm in B5G/6G Ubiquitous Networks,” *IEEE Internet of Things Journal*, pp. 1–1, 2020.
- [16] A. Nosratinia, T. Hunter, and A. Hedayat, “Cooperative communication in wireless networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 74–80, 2004.
- [17] K. J. R. Liu, A. K. Sadek, W. Su, and A. Kwasinski, *Cooperative communications*. Cambridge University Press, 2008, p. 117–392.
- [18] D. Tse and P. Viswanath, *The Wireless Channel*. Cambridge University Press, 2005, ch. 2, p. 21–53.
- [19] ———, *Capacity of Wireless Channels*. Cambridge University Press, 2005, ch. 5, p. 195–253.
- [20] N. Zlatanov, A. Ikhlef, T. Islam, and R. Schober, “Buffer-aided cooperative communications: opportunities and challenges,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 52, no. 4, pp. 146–153, 2014.
- [21] D. Tse and P. Viswanath, *Multiuser Capacity and Opportunistic Communication*. Cambridge University Press, 2005, ch. 6, p. 266–326.
- [22] K. HIGUCHI and A. BENJEBBOUR, “Non-orthogonal Multiple Access (NOMA) with Successive Interference Cancellation for Future Radio Access,” *IEICE Transactions on Communications*, vol. E98.B, no. 3, pp. 403–414, 2015.
- [23] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, and K. Higuchi,

- “Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for Cellular Future Radio Access,” in *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2013, pp. 1–5.
- [24] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen, and L. Hanzo, “A Survey of Non-Orthogonal Multiple Access for 5G,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 20, no. 3, pp. 2294–2323, 2018.
- [25] Z. Ding, X. Lei, G. K. Karagiannidis, R. Schober, J. Yuan, and V. K. Bhargava, “A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 10, pp. 2181–2195, 2017.
- [26] L. Zhu, Z. Xiao, X.-G. Xia, and D. Oliver Wu, “Millimeter-Wave Communications With Non-Orthogonal Multiple Access for B5G/6G,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116 123–116 132, 2019.
- [27] B. Wang and K. R. Liu, “Advances in cognitive radio networks: A survey,” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 5, no. 1, pp. 5–23, 2011.
- [28] A. Goldsmith, S. A. Jafar, I. Maric, and S. Srinivasa, “Breaking Spectrum Gridlock With Cognitive Radios: An Information Theoretic Perspective,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 894–914, 2009.
- [29] B. Wang and K. R. Liu, “Advances in cognitive radio networks: A survey,” *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing*, vol. 5, no. 1, pp. 5–23, 2011.
- [30] F. Hu, B. Chen, and K. Zhu, “Full Spectrum Sharing in Cognitive Radio Networks Toward 5G: A Survey,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 15 754–15 776, 2018.
- [31] J. Laneman, D. Tse, and G. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, 2004.
- [32] A. Kumar and K. Kumar, “Multiple access schemes for Cognitive Radio networks: A survey,” *Physical Communication*, vol. 38, p. 100953, 2020. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490719301417>
- [33] B. Xia, Y. Fan, J. Thompson, and H. V. Poor, “Buffering in a Three-Node Relay Network,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 11, pp. 4492–4496, 2008.
- [34] V. Jamali, N. Zlatanov, and R. Schober, “Bidirectional Buffer-Aided Relay Networks With Fixed Rate Transmission—Part I: Delay-Unconstrained Case,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 3, pp. 1323–1338,

- 2015.
- [35] —, “Bidirectional Buffer-Aided Relay Networks With Fixed Rate Transmission—Part II: Delay-Constrained Case,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 3, pp. 1339–1355, 2015.
- [36] B. Anyugu Francis Lin, X. Ye, and S. Hao, “Adaptive protocol for full-duplex two-way systems with the buffer-aided relaying,” *IET Communications*, vol. 13, no. 1, pp. 54–58, 2019.
- [37] B. A. F. Lin, “Throughput maximization for full-duplex two-way relay with finite buffers,” *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*, vol. 20, no. 2, pp. 854–862, 2020.
- [38] S. Zhang, S. C. Liew, and P. P. L. Lam, “Hot Topic: Physical-Layer Network Coding,” in *Proceedings of the 12th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking*. New York, NY, USA: Association for Computing Machinery, 2006, p. 358–365.
- [39] W. Ni, J. A. Zhang, Z. Fang, M. Abolhasan, R. P. Liu, and Y. J. Guo, “Analysis of Finite Buffer in Two-Way Relay: A Queueing Theoretic Point of View,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 4, pp. 3690–3694, 2018.
- [40] S. Shi, S. Li, and J. Tian, “Performance Analysis for Practical XOR Two-Way Relay Under Finite Relay Buffer,” vol. 23, no. 2, pp. 112–121, 2016.
- [41] S. Shi, S. Li, and J. Tian, “Markov Modeling for Practical Two-Way Relay With Finite Relay Buffer,” *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 4, pp. 768–771, 2016.
- [42] R. Kumar and A. Hossain, “Performance of Random Access Markov Modelling for Two-Way Buffer-Aided Relaying Networks with Wireless Assisted Links,” *Wireless Personal Communications*, vol. 108, no. 3, pp. 1995–2015, 2019.
- [43] G. Nauryzbayev *et al.*, “Performance of Cooperative Underlay CR-NOMA Networks over Nakagami-m Channels,” in *IEEE ICC*, 2018.
- [44] S. Arzykulov *et al.*, “Outage Performance of Underlay CR-NOMA Networks,” in *IEEE WCSP*, 2018, pp. 1–6.
- [45] C. Li *et al.*, “Outage Performance of Partial Relay Selection in Underlay CR-NOMA Networks,” in *WOCC*, 2019.
- [46] A. Ikhlef, D. S. Michalopoulos, and R. Schober, “Buffers Improve the Performance of Relay Selection,” in *2011 IEEE Global Telecommunications Conference - GLOBECOM 2011*, 2011, pp. 1–6.

- [47] I. Krikidis, T. Charalambous, and J. S. Thompson, “Buffer-Aided Relay Selection for Cooperative Diversity Systems without Delay Constraints,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 5, pp. 1957–1967, 2012.
- [48] S. Luo and K. C. Teh, “Buffer State Based Relay Selection for Buffer-Aided Cooperative Relaying Systems,” *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 10, pp. 5430–5439, 2015.
- [49] T. Cover and A. Gamal, “Capacity theorems for the relay channel,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 25, no. 5, pp. 572–584, 1979.
- [50] K. B. Letaief and W. Zhang, “Cooperative Communications for Cognitive Radio Networks,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 878–893, 2009.
- [51] W. Fang, F. Liu, F. Yang, L. Shu, and S. Nishio, “Energy-efficient cooperative communication for data transmission in wireless sensor networks,” *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 56, no. 4, pp. 2185–2192, 2010.
- [52] Z. Behdad, M. Mahdavi, and N. Razmi, “A New Relay Policy in RF Energy Harvesting for IoT Networks—A Cooperative Network Approach,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 4, pp. 2715–2728, 2018.
- [53] B. Talha and M. Pätzold, “Channel Models for Mobile-to-Mobile Cooperative Communication Systems: A State of the Art Review,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 6, no. 2, pp. 33–43, 2011.
- [54] J. Laneman, G. Wornell, and D. Tse, “An efficient protocol for realizing cooperative diversity in wireless networks,” in *Proceedings. 2001 IEEE International Symposium on Information Theory (IEEE Cat. No.01CH37252)*, 2001, pp. 294–.
- [55] “Regimes de transmissão cooperativa para relés de decodificador e avançado,” in *2007 IEEE 18o Simpósio Internacional sobre Pessoal, Comunicações de rádio internas e móveis*.
- [56] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, “User cooperation diversity. Part I. System description,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 11, pp. 1927–1938, 2003.
- [57] T. Hunter, S. Sanayei, and A. Nosratinia, “Outage analysis of coded cooperation,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 2, pp. 375–391, 2006.
- [58] M. Rizinski and V. Kafedziski, “Outage probability of AF, DF and CF cooperative strategies for the slow fading relay channel,” in *2013 11th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS)*, vol. 02, 2013, pp. 609–612.
- [59] A. K. Gurung, F. S. Al-Qahtani, Z. M. Hussain, and H. Alnuweiri, “Performance

- analysis of amplify-forward relay in mixed Nakagami-m and Rician fading channels,” in *The 2010 International Conference on Advanced Technologies for Communications*, 2010, pp. 321–326.
- [60] S. J. Kim, N. Devroye, P. Mitran, and V. Tarokh, “Achievable Rate Regions and Performance Comparison of Half Duplex Bi-Directional Relaying Protocols,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 57, no. 10, pp. 6405–6418, 2011.
- [61] S. J. Kim, P. Mitran, and V. Tarokh, “Performance Bounds for Bidirectional Coded Cooperation Protocols,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 54, no. 11, pp. 5235–5241, 2008.
- [62] S. Abdulhadi, M. Jaseemuddin, and A. Anpalagan, “A Survey of Distributed Relay Selection Schemes in Cooperative Wireless Ad hoc Networks,” *Wireless Personal Communications*, vol. 63, no. 4, pp. 917–935, Apr 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11277-010-0174-6>
- [63] O. Rehman and M. Ould-Khaoua, “A hybrid relay node selection scheme for message dissemination in VANETs,” *Future Generation Computer Systems*, vol. 93, pp. 1–17, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167739X18320417>
- [64] P. Zhao, W. Yu, X. Yang, D. Meng, and L. Wang, “Buffer Data-Driven Adaptation of Mobile Video Streaming Over Heterogeneous Wireless Networks,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 5, no. 5, pp. 3430–3441, 2018.
- [65] N. Nomikos, T. Charalambous, I. Krikidis, D. N. Skoutas, D. Vouyioukas, M. Johansson, and C. Skianis, “A Survey on Buffer-Aided Relay Selection,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1073–1097, 2016.
- [66] S. Haykin, “Cognitive radio: brain-empowered wireless communications,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005.
- [67] J. Lee, H. Wang, J. G. Andrews, and D. Hong, “Outage probability of cognitive relay networks with interference constraints,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 2, pp. 390–395, 2011.
- [68] A. Goldsmith, S. A. Jafar, I. Maric, and S. Srinivasa, “Breaking Spectrum Gridlock With Cognitive Radios: An Information Theoretic Perspective,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 894–914, 2009.
- [69] A. Benjebbour, Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Li, A. Harada, and T. Nakamura, “Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (NOMA) for future radio access,” in *2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, 2013, pp. 770–774.

- [70] C. Sun and C. Yang, “Energy efficiency analysis of one-way and two-way relay systems,” *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, vol. 2012, no. 1, p. 46, Feb 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2012-46>
- [71] A. Bletsas, A. Khisti, D. Reed, and A. Lippman, “A simple Cooperative diversity method based on network path selection,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 659–672, 2006.
- [72] Q. F. Zhou, Y. Li, F. C. M. Lau, and B. Vucetic, “Decode-and-Forward Two-Way Relaying with Network Coding and Opportunistic Relay Selection,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 58, no. 11, pp. 3070–3076, 2010.
- [73] W. Ni, J. A. Zhang, Z. Fang, M. Abolhasan, R. P. Liu, and Y. J. Guo, “Analysis of Finite Buffer in Two-Way Relay: A Queueing Theoretic Point of View,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 4, pp. 3690–3694, 2018.
- [74] S. Shi, S. Li, and J. Tian, “Performance Analysis for Practical XOR Two-Way Relay Under Finite Relay Buffer,” vol. 23, no. 2, pp. 112–121, 2016.
- [75] S. J. Kim, P. Mitran, C. John, R. Ghanadan, and V. Tarokh, “Coded Bi-Directional Relaying in Combat Scenarios,” in *MILCOM 2007 - IEEE Military Communications Conference*, 2007, pp. 1–7.
- [76] S. Haykin, “Cognitive Radio: Brain-empowered Wireless Communications,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, 2005.
- [77] X. Liu, H. Ding, and S. Hu, “Uplink Resource Allocation for NOMA-based Hybrid Spectrum Access in 6G-enabled Cognitive Internet of Things,” *IEEE Internet of Things Journal*, pp. 1–1, 2020.
- [78] L. Zhu, Z. Xiao, X.-G. Xia, and D. Oliver Wu, “Millimeter-Wave Communications With Non-Orthogonal Multiple Access for B5G/6G,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116 123–116 132, 2019.
- [79] Y. Huang *et al.*, “Signal Processing for MIMO-NOMA: Present and Future Challenges,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 32–38, 2018.
- [80] I. Krikidis, T. Charalambous, and J. S. Thompson, “Buffer-Aided Relay Selection for Cooperative Diversity Systems without Delay Constraints,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 5, pp. 1957–1967, 2012.