



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO
MESTRADO ACADÊMICO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO

BRENA KELLY SOUSA LIMA

ALOCAÇÃO ADAPTATIVA DE POTÊNCIA, SELEÇÃO DE *RELAY* E PAREAMENTO
DE USUÁRIOS EM REDES COOPERATIVAS COM MÚLTIPLO ACESSO
NÃO-ORTOGONAL

SOBRAL

2020

BRENA KELLY SOUSA LIMA

ALOCAÇÃO ADAPTATIVA DE POTÊNCIA, SELEÇÃO DE *RELAY* E PAREAMENTO DE
USUÁRIOS EM REDES COOPERATIVAS COM MÚLTIPLO ACESSO NÃO-ORTOGONAL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica e de Computação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica e de Computação. Área de Concentração: Sistemas de Informação

Orientador: Prof. Dr. Daniel Benevides da Costa

SOBRAL

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

L696a Lima, Brena Kelly Sousa.

Alocação Adaptativa de Potência, Seleção de Relay e Pareamento de Usuários em Redes Cooperativas com Múltiplo Acesso Não-Ortogonal / Brena Kelly Sousa Lima. – 2020.
75 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Campus de Sobral, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Sobral, 2020.

Orientação: Prof. Dr. Daniel Benevides da Costa.

1. Múltiplo acesso não-ortogonal. 2. alocação de potência. 3. seleção de relay. 4. pareamento de usuários. 5. análise de desempenho. I. Título.

CDD 621.3

BRENA KELLY SOUSA LIMA

ALOCAÇÃO ADAPTATIVA DE POTÊNCIA, SELEÇÃO DE *RELAY* E PAREAMENTO DE
USUÁRIOS EM REDES COOPERATIVAS COM MÚLTIPLO ACESSO NÃO-ORTOGONAL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Elétrica e de Computação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Elétrica e de Computação. Área de Concentração: Sistemas de Informação

Aprovada em:

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Daniel Benevides da Costa (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Walter da Cruz Freitas Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Charles Casimiro Cavalcante
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Com todo o meu amor, dedico esta dissertação aos meus amados pais Moabe e Cristiane e às minhas irmãs Bruna e Beatriz.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus. Obrigada pela dádiva da vida, por me conceder a saúde, a paciência e o discernimento necessário para a concretização dessa etapa. Agradeço a Deus pelas bênçãos que Ele me concedeu e pelas muitas que virão.

Agradeço aos meus pais Moabe Lima e Cristiane Sousa pelo amor incondicional, cuidados, investimento e educação fornecidos durante toda a minha vida. Agradeço às minhas irmãs Bruna Lima e Beatriz Lima por todo amor, apoio e companheirismo. Com certeza vocês são os alicerces do meu caráter e possuem forte influência em todos os objetivos que já alcancei. Vocês são fundamentais na minha vida.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Daniel Benevides que pacientemente me instruiu durante o curso de mestrado, por me auxiliar na elaboração deste trabalho, pelo incentivo e por todas as oportunidades que ele me ofereceu.

Agradeço ao meu namorado Rui Vigelis pelo companheirismo, incentivo e paciência. Seus cuidados foram reconfortantes nos momentos de dificuldade.

Agradeço aos meus amigos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização desta etapa. Em especial, Arthur Sousa, Carlos David, João Rafael, Joniel Bastos, Márcio Albuquerque, Syllas Rangel e Victória Oliveira. Nossos momentos de descontração, conversas e cafés tornaram essa jornada mais leve e divertida.

Agradeço aos membros da banca Prof. Dr. Walter da Cruz e Prof. Dr. Charles Cavalcante pelo tempo dedicado à avaliação deste trabalho.

Por fim, agradeço à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento (Funcap) pelo financiamento da pesquisa de mestrado via bolsa de estudos.

“Tenho a impressão de ter sido uma criança brincando à beira-mar, divertindo-me em descobrir uma pedrinha mais lisa ou uma concha mais bonita que as outras, enquanto o imenso oceano da verdade continua misterioso diante de meus olhos.”

(Isaac Newton)

RESUMO

Estão previstos diversos serviços e aplicações para os sistemas sem fio além da quinta geração (do inglês, *Beyond fifth-generation* (B5G)) que irão impor requisitos rigorosos aos projetistas de sistemas, como comunicações confiáveis, baixa latência, conectividade contínua e alta eficiência espectral. Em particular, a técnica de múltiplo acesso não-ortogonal (do inglês, *Non-Orthogonal Multiple Access* (NOMA)) tem sido considerada uma tecnologia fundamental para atender a essas demandas heterogêneas devido aos seus ganhos promissores quando comparados à técnica ortogonal. A combinação dos recursos da NOMA e da comunicação cooperativa proporciona ganhos ainda maiores para a rede em termos de cobertura, latência, justiça, capacidade e eficiência espectral. No entanto, o desempenho do sistema ainda pode ser degradado e a confiabilidade da comunicação afetada devido ao profundo desvanecimento. Para aumentar o desempenho de redes cooperativas NOMA, faz-se necessário encontrar estratégias apropriadas de alocação de potência, seleção de *relays* (do inglês, *Relay Selection* (RS)) e pareamento de usuários (do inglês, *User Pairing* (UP)). Nesse contexto, métodos de alocação de potência, RS e UP são propostos nesta dissertação. Especificamente, dois cenários são considerados. No primeiro cenário, projeta-se e avalia-se o desempenho de uma rede *downlink* cooperativa NOMA com múltiplos *relays full-duplex* (do inglês, *Cooperative Full-Duplex Relaying NOMA* (CFR-NOMA)) e dois usuários. Para maximizar a taxa alcançável e garantir justiça de taxa entre os dois usuários, um método de RS é desenvolvido e a solução ótima para alocação de potência é derivada nos *relays*. No segundo cenário, um sistema *downlink* cooperativo com múltiplos *relays half-duplex* NOMA (do inglês, *Cooperative Half-Duplex Relaying NOMA* (CHR-NOMA)) e com múltiplos usuários é projetado. Com base em equidade de taxa, para cada fase do sistema cooperativo um problema de otimização de potência é formulado para maximizar a taxa mínima entre os usuários móveis. Primeiramente, formula-se o problema de otimização na estação base e, logo após, um esquema conjunto de RS e UP é proposto para diminuir a complexidade do sistema. Em seguida, o segundo problema de otimização de potência para os pares de usuários é formulado nos *relays*. O desempenho dos esquemas propostos é validado por meio de simulações numéricas e significantes discussões são fornecidas, comprovando a superioridade das soluções propostas em termos de probabilidade de *outage*, taxa de justiça e taxa alcançável.

Palavras-chave: Múltiplo acesso não-ortogonal, alocação de potência, seleção de *relay*, pareamento de usuários, análise de desempenho.

ABSTRACT

Diverse services and applications ranging are foreseen for beyond fifth-generation (B5G) wireless systems which will impose strict requirements to the system designers, such as reliable communications, low latency, seamless connectivity, and high spectral efficiency. In particular, non-orthogonal multiple access (NOMA) has been regarded as a key technique to attend these heterogeneous demands due to its promising gains when compared to the orthogonal counterpart. The combination of the resources of NOMA and cooperative communication techniques can provide even greater gains for the network in terms of coverage, latency, fairness, capacity and spectral efficiency. However, system performance can still be degraded and the communication reliability affected due to the deep fading. In order to increase the performance of NOMA cooperative networks, it is necessary to find appropriate strategies for power allocation, relay selection (RS), and user pairing (UP). In this context, methods of the power allocation, RS and UP are proposed in this dissertation. Specifically, two scenarios are considered. In the first scenario, a downlink cooperative full-duplex relaying NOMA (CFR-NOMA) with multiple relays and two users is projected and evaluated. In order to maximize the achievable rate and ensure rate fairness between the two users, an RS method is developed and the optimal solution for power allocation is derived at the relays. In the second scenario, a cooperative half-duplex relaying NOMA (CHR-NOMA) with multiple relays and multiple users is designed. Based on rate fairness, for each phase of the cooperative system a power optimization problem is formulated to maximize the minimum rate among mobile users. Firstly, the optimization problem is formulated at the base station and then a joint RS and UP scheme is proposed to reduce the complexity of the system. Finally, the second problem of power optimization for user pairs is formulated at the relays. The performance of the proposed schemes is validated through numerical simulations and significant discussions are provided, which proves the superiority of the proposed solutions in terms of outage probability, rate fairness and achievable rate.

Keywords: Non-orthogonal multiple access, power allocation, relay selection, user pairing, performance analysis

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Sistema NOMA em um cenário <i>downlink</i> com dois usuários.	24
Figura 2 – Processo de codificação por superposição de dois símbolos.	25
Figura 3 – Retransmissão em um sistema cooperativo NOMA.	31
Figura 4 – Modelo do sistema CFR-NOMA com múltiplos <i>relays</i> e dois usuários.	36
Figura 5 – Sequência de passos do esquema proposto para o sistema CFR-NOMA com múltiplos <i>relays</i> e dois usuários.	44
Figura 6 – Probabilidade de <i>outage</i> versus <i>Signal-to-Noise Ratio</i> (SNR) transmitida para diferentes números de <i>relays</i>	45
Figura 7 – Índice de justiça de taxa versus SNR transmitida ($N = 2$ <i>relays</i>).	46
Figura 8 – Taxa média alcançável (<i>Bits Per Channel Use</i> (BPCU)) versus a SNR de transmissão para $N = 2$ <i>relays</i>	47
Figura 9 – Taxa média alcançável (BPCU) do sistema versus SNR transmitida para $N = 2$ <i>relays</i>	47
Figura 10 – Taxa alcançável em (BPCU) de U_2 versus a distância entre o <i>relay</i> e o usuário fraco para $N = 2$ <i>relays</i>	48
Figura 11 – Modelo de sistema CHR-NOMA com múltiplos <i>relays</i> e múltiplos usuários.	51
Figura 12 – Índice de Jain em função da SNR de transmissão para $N = 2$ <i>relays</i> e $M = 4$ usuários.	61
Figura 13 – Probabilidade de <i>outage</i> em função da SNR de transmissão para diferentes números de <i>relays</i> e com $M = 4$ usuários.	62
Figura 14 – Taxa média alcançável (BPCU) em função da SNR de transmissão para diferentes números de usuários e com $N = 4$ <i>relays</i>	64
Figura 15 – Taxa média alcançável (BPCU) do sistema em função da SNR para $N = 2$ <i>relays</i> e com $M = 4$ usuários.	64

LISTA DE ALGORITMOS

Algoritmo 1 – Alocação dos coeficientes de potência na BS para o m -ésimo usuário no n -ésimo <i>relay</i>	58
--	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1G	<i>First-generation</i>
2G	<i>Second-generation</i>
3G	<i>Third-generation</i>
3GPP	<i>3rd generation partnership project</i>
4G	<i>Fourth-generation</i>
AF	<i>Amplify-and-Forward</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
B5G	<i>Beyond Fifth-generation</i>
BPCU	<i>Bits Per Channel Use</i>
BS	<i>Base Station</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CFR-NOMA	<i>Cooperative Full-Duplex Relaying NOMA</i>
CHR-NOMA	<i>Cooperative Half-Duplex Relaying NOMA</i>
CSI	<i>Channel State Information</i>
DF	<i>Decode-and-Forward</i>
FD	<i>Full-Duplex</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
GSM	<i>Global Mobile Communications</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>
HD	<i>Half-Duplex</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
KKT	<i>Karush-Kuhn-Tucker</i>
LTE-A	<i>Long-term Evolution Advanced</i>
NOMA	<i>Non-Orthogonal Multiple Access</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
OMA	<i>Orthogonal Multiple Access</i>
PRS	<i>Partial Relay Selection</i>
Q-PSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RB	<i>Resource Block</i>

RS	<i>Relay Selection</i>
SC	<i>Superposition Coding</i>
SIC	<i>Successive Interference Cancellation</i>
SINR	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>
SMS	<i>Short Message Service</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SWIPT	<i>Simultaneous Wireless Information and Power Transfer</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>
UP	<i>User Pairing</i>
W-CDMA	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	Contexto do Problema e Motivação	15
1.2	Trabalhos Relacionados	19
1.3	Produção Científica	22
1.4	Estrutura da Dissertação	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
2.1	Múltiplo Acesso Não-Ortogonal (NOMA)	24
2.1.1	<i>Codificação por Superposição (SC)</i>	25
2.1.2	<i>Cancelamento Sucessivo de Interferência (SIC)</i>	26
2.1.3	<i>Principais Vantagens da NOMA</i>	27
2.2	Comunicação Cooperativa	29
2.2.1	<i>Protocolos de Retransmissão</i>	29
2.2.2	<i>Modo de Retransmissão</i>	30
2.3	Redes Cooperativas NOMA	31
2.3.1	<i>Principais Vantagens das Redes Cooperativas NOMA</i>	32
2.3.2	<i>Controle de Potência em Redes Cooperativas NOMA</i>	33
3	ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA E SELEÇÃO DE <i>RELAY</i> EM SISTE- MAS CFR-NOMA	35
3.1	Contribuições	35
3.2	Modelo do Sistema	36
3.2.1	<i>Método de Seleção de Relays</i>	38
3.2.2	<i>Taxa Alcançável</i>	39
3.3	Alocação Adaptativa de Potência nos <i>Relays</i>	39
3.3.1	<i>Formulação do Problema de Otimização</i>	39
3.3.2	<i>Solução Ótima para o Problema de Otimização</i>	41
3.4	Resultados de Simulação e Discussões	43
3.5	Resumo do Capítulo	49
4	ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA, SELEÇÃO DE <i>RELAY</i> E PAREAMENTO DE USUÁRIOS EM SISTEMAS CHR-NOMA	50
4.1	Contribuições	50

4.2	Modelo do Sistema	51
4.3	Método de Pareamento de Usuários e de Seleção de Relay	52
4.4	Alocação Adaptativa de Potência com Equidade de Taxa	54
4.4.1	<i>Primeira Fase</i>	54
4.4.1.1	<i>Formulação e Solução do Problema de Otimização</i>	54
4.4.2	<i>Segunda Fase</i>	57
4.4.2.1	<i>Formulação e Solução do Problema de Otimização</i>	58
4.5	Resultados de Simulação e Discussões	60
4.6	Resumo do Capítulo	65
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	66
	REFERÊNCIAS	69

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto do Problema e Motivação

Impulsionado pelo aumento das demandas e aplicações impostas pelos sistemas de multimídias, bem como pela crescente conectividade de pessoas e objetos, os sistemas de comunicação sem fio tem requerido progressivamente altas taxas de transmissão [1]. Com isso, as próximas gerações dos sistemas sem fio enfrentarão desafios em termos de suporte ao tráfego de dados em larga escala. Desde as chamadas telefônicas analógicas até os serviços de comunicação e de multimídia mais atuais, cada transição entre as gerações foi incentivada pela necessidade de atender aos requisitos da futura geração de tecnologia móvel.

A primeira geração (do inglês, *First-generation (1G)*) foi a pioneira no serviço de voz, com taxa de dados de até 2,4 kbps. Quase todos os sistemas eram analógicos e usavam a técnica de múltiplo acesso por divisão de frequência (do inglês, *Frequency Division Multiple Access (FDMA)*) para transmissão de rádio com capacidade de canal de 30 KHz e banda de frequência de 824 a 894 MHz. As necessidades de melhor qualidade de transmissão, capacidade do sistema, cobertura, mais serviços e melhor eficiência espectral abriram o caminho para sistemas da segunda geração (do inglês, *Second-generation (2G)*). Os sistemas 2G foram lançados comercialmente no padrão *Global Mobile Communications (GSM)*. Os principais benefícios dessa geração em relação aos seu antecessor foram: conversas telefônicas criptografadas digitalmente, melhora significativa da eficiência espectral e adição de serviços de dados para celular, como o serviço de mensagens curtas (do inglês, *Short Message Service (SMS)*) e *e-mails*, com taxa de dados de até 64 kbps e operando na faixa de frequência de 850 a 1900 MHz. Nessa geração, dois esquemas de modulação digital são usados: Múltiplo Acesso por Divisão de Tempo (do inglês, *Time Division Multiple Access (TDMA)*) e Múltiplo Acesso por Divisão de Código (do inglês, *Code Division Multiple Access (CDMA)*). Na terceira geração (do inglês, *Third-generation (3G)*) dos sistemas móveis foi proposto o *Universal Mobile Telecommunication System (UMTS)* ou *Wideband Code Division Multiple Access (W-CDMA)* como o sucessor do GSM. Com isso, foi possível combinar o acesso móvel de alta velocidade com serviços baseados em protocolo de internet. Os principais recursos da tecnologia 3G incluem acesso à base da *web* sem fio, serviços de multimídia, *e-mail* e videoconferência. Comparado aos sistemas 2G, os sistemas 3G oferecem melhor eficiência espectral, taxas de dados de até 2 Mbps, mais de 5 MHz de canal dependendo da mobilidade/velocidade, e operam na faixa de frequência de 1,8

a 2,5 GHz. A quarta geração (do inglês, *Fourth-generation (4G)*) dos sistemas móveis, além da voz e outros serviços usuais da 3G, fornece acesso à internet de banda larga à dispositivos móveis. A técnica de múltiplo acesso por divisão de frequência ortogonal (do inglês, *Orthogonal Frequency-Division Multiple Access (OFDMA)*) foi adotada para as redes 4G. As potenciais aplicações dessa geração incluem melhoria do acesso *web* móvel, telefonia *Internet Protocol (IP)*, serviços de jogos, televisão móvel de alta definição, videoconferência, computação em nuvem e etc. As taxas de dados suportadas por redes sem fio 4G variam de acordo com a mobilidade do dispositivo, podendo alcançar 1 Gbps para baixa mobilidade e até 100 Mbps para alta mobilidade [2, 3, 4].

No futuro, espera-se que as pessoas sejam cercadas por objetos inteligentes em suas casas, escritórios, ruas, cidades e, então, vivam em um mundo inteligente onde todos e tudo vão interagir uns com os outros [5, 6]. Para suprir essas demandas heterogêneas, os mais diversos requisitos serão exigidos aos sistemas sem fio, como por exemplo comunicações confiáveis, conectividade massiva, baixa latência, baixo consumo de energia e alta eficiência espectral [7]. Para atender a essas demandas, diversas estratégias e tecnologias foram desenvolvidas, incluindo novas técnicas de múltiplo acesso para serem integradas às redes além da quinta geração (do inglês, *Beyond Fifth-generation (B5G)*) dos sistemas de comunicações móveis. Em particular, as técnicas de múltiplo acesso podem ser amplamente categorizadas em duas abordagens, nomeadamente, múltiplo acesso ortogonal (do inglês, *Orthogonal Multiple Access (OMA)*) e múltiplo acesso não-ortogonal (do inglês, *Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA)*)[8]. As técnicas de múltiplo acesso mencionadas anteriormente (FDMA, TDMA, CDMA e OFDMA) são alguns exemplos da abordagem OMA, pois permitem que apenas um único usuário seja atendido no mesmo bloco de recursos (do inglês, *Resource Block (RB)*) de tempo/frequência, ou no caso da CDMA, permite que vários usuários sejam suportados em um mesmo RB por meio de sequências de códigos ortogonais.

Ao contrário da OMA, a NOMA permite que um transmissor atenda a vários usuários simultaneamente em um único canal de frequência via multiplexação no domínio da potência ou no domínio do código, e oferece serviços para garantir que a próxima rede de comunicações móveis possa suportar as funcionalidades da internet das coisas (do inglês, *Internet of Things (IoT)*), como alta confiabilidade, baixa latência, alta conectividade e alta eficiência espectral [9]. Dentre essas e outras características, a NOMA tem sido amplamente reconhecida como uma tecnologia de forte potencial para as próximas gerações dos sistemas de comunicações móveis

[10]. Devido ao reconhecimento e às possíveis melhorias obtidas, a NOMA foi incluída no *3rd generation partnership project (3GPP) Long-term Evolution Advanced (LTE-A)* [11, 12].

Especificamente, as investigações realizadas nesta dissertação são baseadas em NOMA no domínio da potência [13, 14]. A ideia principal dessa variação é garantir que vários usuários possam ser atendidos dentro do mesmo RB de tempo/frequência a partir de coeficientes de potências distintos, com o auxílio das técnicas de codificação por superposição (do inglês, *Superposition Coding (SC)*) no transmissor e cancelamento sucessivo de interferência (do inglês, *Successive Interference Cancellation (SIC)*) no receptor. De forma sucinta, uma estação base (do inglês, *Base Station (BS)*) sobrepõe as mensagens de cada usuário através da SC atribuindo diferentes coeficientes de potência entre os usuários, enquanto no lado do receptor cada usuário recupera sua mensagem empregando a SIC.

Além dos requisitos já citados, a escalabilidade da rede é um fator importante no projeto de redes da B5G, pois será necessário suportar um aumento relativamente elevado de dispositivos móveis que se conectam à rede. Para melhorar a conectividade em uma rede, a cobertura e a eficiência na transferência de dados devem ser aperfeiçoadas. Particularmente, a comunicação cooperativa é uma técnica atraente por oferecer ganhos de diversidade cooperativa, ampliando a cobertura da rede e melhorando a capacidade dos sistemas de comunicação [15]. A ideia principal dessa técnica é o compartilhamento de recursos entre vários nós em uma rede por meio de retransmissores, comumente conhecidos por *relays*. Em redes cooperativas é implantado um ou mais *relays*, que não são fontes de dados nem destinos, para introduzir um canal de retransmissão auxiliar no processo de comunicação entre a fonte e o destino. Essa técnica ganhou muita atenção devido à capacidade de oferecer ganhos para atenuar o desvanecimento, enquanto resolve as dificuldades de montar várias antenas em pequenos terminais de comunicação [16, 17].

A ação conjunta dos recursos das técnicas NOMA e comunicação cooperativa pode efetivamente aprimorar o desempenho dos sistemas de comunicações móveis em termos de capacidade e de confiabilidade [18, 19, 20]. Basicamente existem duas formas de categorizar o retransmissor em uma rede cooperativa NOMA, podendo ser do tipo *relay* dedicado ou do tipo usuário atuando como *relay*, nomeado de usuário-assistente. O *relay* dedicado consiste no princípio convencional da comunicação cooperativa, em que um terminal de pequeno porte auxilia o processo de comunicação entre a BS e o destino. O sinal recebido pelo *relay* é decodificado, pode ser melhorado e, em seguida, retransmitido para o receptor final. Quanto ao tipo usuário-assistente, os usuários com melhores condições de canal decodificam as mensagens

para os outros e, portanto, esses usuários atuam como *relays* para melhorar a confiabilidade da recepção para usuários com condições ruins de canal em relação à BS.

Para explorar os benefícios de uma rede cooperativa NOMA e obter melhor desempenho de taxa de transferência, faz-se necessário utilizar de forma eficiente os recursos de potência disponíveis. Mais especificamente, é necessária uma diferença de cerca de 8 dB na perda de propagação para parear um usuário da borda de célula com um usuário do centro de célula [21]. Como já mencionado, para acomodar um conjunto diversificado de requisitos de tráfego, os sistemas da B5G devem ser capazes de suportar altas taxas de dados com latência muito baixa e de maneira confiável. No entanto, essa é uma tarefa muito difícil, pois os recursos são limitados, a alta mobilidade pode dificultar o estabelecimento de uma boa comunicação e a interferência causada pelos múltiplos dispositivos pode prejudicar a confiabilidade do sistema. Com isso, as tendências de pesquisa para melhorar o desempenho em redes cooperativas NOMA incluem diversos tópicos, por exemplo, métodos de análise de desempenho, seleção de *relays* (do inglês, *Relay Selection (RS)*), análise de justiça e pareamento de usuários (do inglês, *User Pairing (UP)*) [14, 22].

O número possível de pares de usuários em um esquema NOMA típico é limitado, o que eventualmente reduz o ganho de capacidade da NOMA. Encontrar a estratégia apropriada de UP e de alocação de potência é uma questão importante para fornecer melhor desempenho aos usuários e ampliar a cobertura para aumentar a quantidade de dispositivos conectados à rede. As estratégias de UP são soluções promissoras para reduzir consideravelmente a complexidade do sistema. Por outro lado, as estratégias ideais de alocação de potência podem garantir que potência desnecessária não seja alocada aos usuários mais fortes, que a rede suporte um número maior de dispositivos e que a justiça de taxa entre os usuários seja maximizada [23, 24, 25]. Outra característica importante em redes cooperativas NOMA é a seleção de um único *relay* dedicado dentre um conjunto de *relays* para aumentar a confiabilidade e a flexibilidade do sistema. Estudos na área mostram que a grande parte dos benefícios da cooperação podem ser atingidos com mínima sobrecarga quando apenas o melhor *relay* é selecionado, sendo possível usufruir da diversidade espacial fornecida pelas comunicações cooperativas [26]. Portanto, desenvolver métodos eficientes de RS em conjunto com estratégias de alocação de potência e UP tem um importante impacto sobre o desempenho do sistema.

Dadas as motivações mencionadas, esta dissertação tem como objetivo estudar e propor estratégias para melhorar o desempenho de redes cooperativas NOMA por meio de

estratégias conjuntas de RS, alocação de potência e também estratégias de UP quando múltiplos usuários são considerados no sistema. As principais contribuições desse trabalho são organizadas em dois capítulos. No Capítulo 3 é desenvolvido um novo método de alocação dos coeficientes de potência em conjunto com uma estratégia de RS para redes cooperativas NOMA com *relays* operando em modo *Full-Duplex* (FD) (do inglês, *Cooperative Full-Duplex Relaying NOMA* (CFR-NOMA)), com protocolo de retransmissão decodifica-e-encaminha (do inglês, *Decode-and-Forward* (DF)) e dois usuários. No Capítulo 4 é desenvolvido um método conjunto de UP, RS e alocação dos coeficientes de potência para uma rede cooperativa NOMA com *relays* operando em modo *Half-Duplex* (HD) (do inglês, *Cooperative Half-Duplex Relaying NOMA* (CHR-NOMA)) com protocolo de retransmissão DF em um cenário com múltiplos usuários. Devido a forte interferência causada pelos múltiplos usuários, a segunda parte das contribuições foi implementada com *relays* HD. Com isso, surge novas linhas de investigações para trabalhos futuros, tais como o estudo e proposição de métodos de redução de interferência em redes CFR-NOMA com estratégias eficientes de UP, RS e alocação de potência. Os detalhes específicos sobre as contribuições são melhores descritos nos respectivos capítulos mencionados. A seguir, é apresentada uma revisão bibliográfica dos trabalhos relacionados mais relevantes.

1.2 Trabalhos Relacionados

A junção dos recursos da técnica de comunicação cooperativa com a NOMA permite segmentos para suportar diversas aplicações requisitadas pelas próximas gerações das comunicações móveis, atraindo consideráveis interesses de pesquisas acadêmicas e industriais. A combinação das técnicas foi inicialmente implementada por Ding *et al* em [18]. Os autores propuseram um esquema de transmissão cooperativa NOMA do tipo usuário-assistente, ou seja, o usuário forte atua como *relay* para melhorar a confiabilidade da recepção dos usuários com piores condições de canal em relação à BS. As expressões em forma fechada da probabilidade de *outage* e da ordem de diversidade alcançada são derivadas, e esses resultados demonstram a eficácia da combinação de NOMA com comunicação cooperativa. Em [19], os autores investigaram uma rede cooperativa NOMA composta por uma BS, múltiplos usuários pareados em grupos e um *relay* HD dedicado para auxiliar no processo de comunicação. As expressões da probabilidade de *outage* são derivadas e o limite superior da taxa ergódica é obtido. Uma rede cooperativa NOMA com *relays* dedicados foi proposta em [27]. Nesse trabalho, os autores propuseram um esquema sub-ótimo de alocação de alocação de potência e derivaram as expressões exatas e

assintóticas da taxa média alcançável para canais do tipo Rayleigh de desvanecimento independentes. Em [28], um sistema cooperativo NOMA composto por um *relay* FD dedicado para auxiliar a transmissão das informações para o usuário com piores condições de canal é proposto. Pressupondo cancelamento imperfeito de auto-interferência, os autores investigaram e derivaram as expressões exatas da probabilidade de *outage* dos usuários e da taxa ergódica. Os autores em [29] investigaram uma rede cooperativa NOMA na qual o usuário mais forte atuava como *relay* FD, propuseram um esquema para minimizar a probabilidade de *outage* e para maximizar a taxa mínima alcançável pelos usuário, eles desenvolveram uma estratégia de alocação de potência com base na justiça de taxa entre os usuários.

A formulação de estratégias de RS em redes NOMA tem recebido bastante atenção nos últimos anos. Em [26] foi proposto o esquema max-min RS com protocolo DF para redes cooperativa NOMA com dois usuários e alocação fixa de potência. O esquema consiste em duas etapas. Na primeira etapa, seleciona-se os *relays* que satisfazem os requisitos de taxa do usuário mais fraco. No segundo estágio, dentre os *relays* selecionados na primeira etapa, seleciona-se o *relay* capaz de maximizar a taxa de dados do usuário mais forte. No trabalho [30] os autores propuseram dois esquemas de RS, o *two-stage* DF e *two-stage* amplifica-e-encaminha (do inglês, *Amplify-and-Forward* (AF)). Ao contrário de [26], os autores de [30] relacionaram os coeficientes de alocação de potência dos usuários aos canais BS-*relay* na retransmissão DF e os transformaram em funções dos canais BS-usuários na retransmissão AF. Em [31], os autores propuseram dois esquemas ótimos de RS, o *Two-Stage Weighted-Max-Min* de alocação fixa de potência nos *relays* e *Max-Weighted-Harmonic-Mean* de alocação dinâmica de potência nos *relays*. Em [32], os autores investigaram um sistema cooperativo NOMA com *relays* AF com o método de RS seleção parcial de *relay* (do inglês, *Partial Relay Selection* (PRS)) e derivaram as expressões exatas da probabilidades de *outage* de dois usuários. Recentemente, estratégias de RS para sistemas CHR-NOMA sob canal de desvanecimento correlacionado foram investigados em [33], onde foi proposto um método de seleção de três estágios. No primeiro estágio, os *relays* que podem decodificar as mensagens de todos os usuários são selecionados. No segundo, as mensagens são processadas e os *relays* ativos que podem decodificar a mensagem do usuário mais fraco são selecionados. Finalmente, entre os *relays* selecionados no segundo estágio, é selecionado o apenas o que maximiza a relação sinal-ruído (do inglês, *Signal-to-Noise Ratio* SNR) do usuário mais forte.

O impacto de duas políticas de alocação de potência em redes cooperativas NOMA

foi investigado em [34]. A primeira análise foi realizada com base em alocação fixa de potência enquanto a segunda consistiu na análise em redes de rádio cognitivo baseada em NOMA. No trabalho [35], os autores propuseram um esquema de otimização de alocação de potência híbrido com transmissão direta e cooperativa. O sistema é constituído por uma BS, dois usuários e um *relay* dedicado, que alterna entre os modos HD e FD, para auxiliar a comunicação entre a BS e o usuário mais fraco. Com base nisso, as políticas de alocação de potência foram formuladas para melhorar o compartilhamento dos recursos de potência do sistema. Em [36], os autores formularam um problema de otimização para maximizar a eficiência energética de um sistema CFR-NOMA com protocolo AF e dois usuários e, então, a solução para o problema foi obtida por meio de dupla decomposição Lagrangiana. Estratégias de alocação de potência em NOMA com base em equidade de taxa são estudadas em [37, 38], enquanto em [39] o objetivo é a maximização da taxa alcançável. Com base em planejamento proporcional de justiça entre dois usuários, o autor do trabalho [37] encontrou uma política de alocação de potência para maximizar a taxa mínima normalizada, que fornece não apenas justiça proporcional mas também pequenas variações nas taxas de transmissão. Os autores em [38] investigaram um rede cooperativa NOMA com um único *relay* HD/FD e múltiplos usuários. As políticas ótimas de alocação de potência para dois usuários em uma rede CFR-NOMA e múltiplos usuários em CHR-NOMA são obtidas. O autor de [39] desenvolve dois algoritmos para solucionar problemas de alocação de potência em sistemas multiportadoras NOMA, mais precisamente, um algoritmo para *uplink* e o outro para *downlink*.

Buscando diminuir a complexidade em sistemas NOMA com múltiplos usuários, diversos autores investigaram estratégias de UP. Em [40], os autores investigaram o problema de maximização da taxa para o sistema NOMA em um canal de desvanecimento seletivo em frequência, com os usuários pareados de acordo com as potências de seus canais. No trabalho [41], os autores realizaram um estudo sobre a otimização conjunta de UP e alocação de potência para maximizar de forma proporcional a justiça de taxa do sistema. Sujeito à restrições de potência de transmissão, um esquema de alocação de potência multiusuário de baixa complexidade foi proposto em [42]. Além disso, os autores derivaram as soluções para um problema de alocação de potência para maximizar a taxa alcançável para dois e para quatro usuários. Considerando uma rede *downlink* NOMA, em [43] foi proposto um algoritmo distribuído com o objetivo de otimizar o UP e a alocação de potência entre usuários fracos e usuários fortes, sujeito aos requisitos de taxa dos usuários. Além disso, os autores projetaram um esquema prático de modulação

codificada para a rede investigada, que é capaz de adaptar-se à taxa de código e ao modo de modulação com base nas condições instantâneas do canal. Em [44], os autores consideraram um sistema cooperativo NOMA do tipo usuário-assistente que alterna entre os modos HD/FD e investigaram a probabilidade de cobertura e a taxa média de dados dos pares de usuários. Os limites inferiores da probabilidade de cobertura e da taxa média de dados são obtidos de forma aproximada usando geometria estocástica e quadratura de Gauss-Chebyshev.

1.3 Produção Científica

1. **LIMA, B. K. S.;** COSTA, D. B.; OLIVEIRA, R.; DIAS, UGO S. "Power Allocation, Relay Selection, and User Pairing for Cooperative NOMA Systems with Rate Fairness." In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020 (Submetido).
2. **LIMA, B. K. S.;** COSTA, D. B.; LIMA, F. R. M.; OLIVEIRA, R.; DIAS, UGO S. "Adaptive Power Factor Allocation for Cooperative Full-Duplex NOMA Systems with Rate Fairness." In: IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020 (Submetido).
3. **LIMA, B. K. S.;** COSTA, D. B.; DIAS, UGO S. "Sistemas UAV-NOMA com Alocação Adaptativa dos Coeficientes de Potência." In: XXXVIII Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais, 2020 (Submetido).

1.4 Estrutura da Dissertação

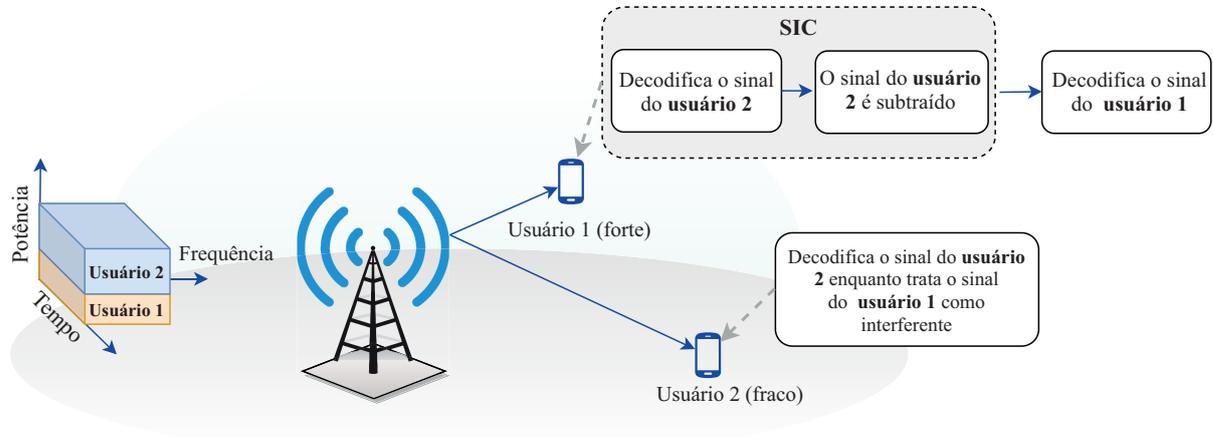
O restante da dissertação está organizada da seguinte forma:

- **Capítulo 2** - Apresenta os principais conceitos das técnicas utilizadas no decorrer deste trabalho. As principais características da NOMA são descritas, bem como o detalhamento das técnicas SC e SIC, e as principais vantagens da NOMA. Em seguida, é realizado uma revisão teórica da técnica de comunicação cooperativa, em que as diferenças entre as principais abordagens do modo de cooperação e protocolos de retransmissão são introduzidas.
- **Capítulo 3** - A primeira parte das contribuições desta dissertação é apresentada. Projeta-se um sistema *downlink* CFR-NOMA com dois usuários e formula-se estratégias para solucionar problemas de RS e de alocação dos coeficientes de potência para as mensagens dos usuários nos *relays*. Os resultados de simulação e significantes discussões validam a solução proposta e demonstram a eficácia do esquema proposto.

- **Capítulo 4** - Provê a segunda parte das contribuições deste trabalho. Investiga-se um sistema *downlink* CHR-NOMA com múltiplos usuários e múltiplos *relays*. Soluções para a alocação dos coeficientes de potências na BS e nos *relays* são derivadas, bem como a proposição do método conjunto de RS e UP. Os resultados são apresentados e demonstram a superioridade de desempenho do esquema proposto.
- **Capítulo 5** - Fornece um resumo das principais contribuições deste trabalho, as considerações finais e as perspectivas futuras.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Figura 1 – Sistema NOMA em um cenário *downlink* com dois usuários.



Fonte: elaborada pela autora.

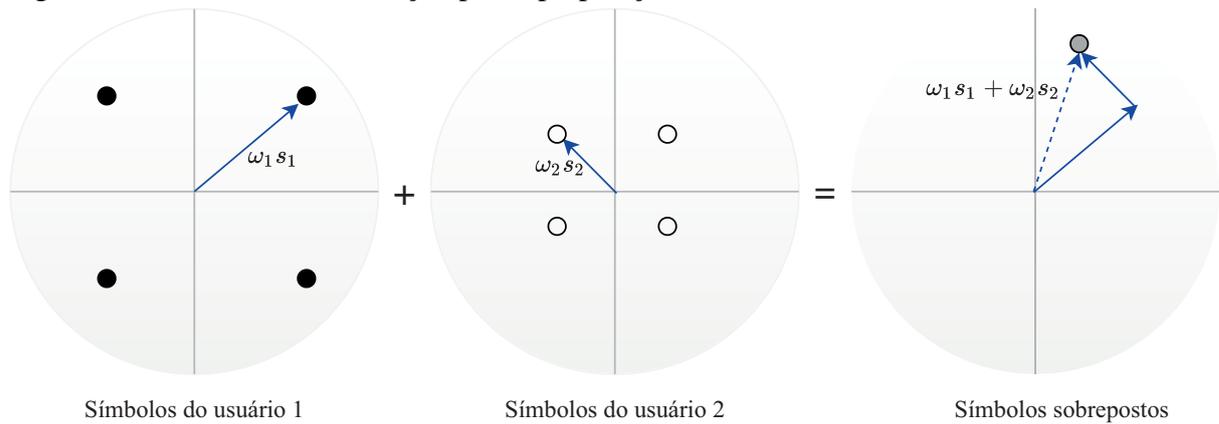
Neste capítulo serão apresentados os conceitos fundamentais das técnicas e estratégias relacionadas ao desenvolvimento desta dissertação. A Seção 2.1 destaca as principais características e vantagens da NOMA no domínio da potência, e apresenta os princípios da SC e da SIC. Na Seção 2.2 são descritos os princípios do funcionamento das comunicações cooperativas, além de apresentar os modos e os principais protocolos de retransmissão. Por fim, a Seção 2.3 fornece os conceitos fundamentais da combinação da NOMA com comunicações cooperativas.

2.1 Múltiplo Acesso Não-Ortogonal (NOMA)

Como já mencionado no Capítulo 1, o conceito fundamental da NOMA no domínio da potência é facilitar o suporte a vários usuários em um mesmo RB de tempo/frequência a partir de distintos coeficientes de potência. Essa característica permite que o sistema de comunicação alcance alta eficiência espectral e baixa latência, que são requisitos fundamentais para dar suporte ao grande número de conexões esperadas nos próximos anos. Isso faz com que a NOMA seja amplamente reconhecida como uma tecnologia candidata a fazer parte das próximas gerações dos sistemas de comunicações móveis.

Para descrever melhor a técnica NOMA no domínio da potência, a Figura 1 ilustra a transmissão e recepção de uma rede *downlink* NOMA com dois usuários. A figura apresenta um cenário constituído por dois usuários que devem ser servidos por uma BS em um mesmo

Figura 2 – Processo de codificação por superposição de dois símbolos.



Fonte: elaborada pela autora.

RB de tempo/frequência, mas com diferentes níveis de potência. Especificamente, o transmissor sobrepõe as mensagens de todos os usuários da rede e encaminha para todos os dispositivos. Nos receptores, a mensagem é decodificada seguindo os princípios da SIC no usuário mais forte, enquanto o receptor mais fraco decodifica a sua mensagem de interesse considerando o sinal referente ao usuário mais forte como interferente.

Apesar de que a aplicação da NOMA em sistemas móveis seja considerada relativamente nova, os conceitos essenciais relacionados à NOMA existem há várias décadas e são amplamente conhecidos e estudados com base na teoria da informação [45]. Para entender melhor como os usuários são multiplexados em NOMA no domínio da potência, a seguir será apresentado uma explicação sobre as tecnologias SC e SIC.

2.1.1 Codificação por Superposição (SC)

A estratégia de SC, que foi inicialmente proposta em [45], tem como característica fundamental a capacidade de sobrepor vários símbolos atribuindo diferentes níveis de potência, em que convencionalmente, mais potência é alocada para usuários com piores condições de canal e menos potência para aqueles com boas condições de canal. A Figura 2 ilustra o funcionamento da estratégia de SC para o caso simples em que dois símbolos *Quadrature Phase-Shift Keying* (Q-PSK) destinados a dois usuários diferentes são sobrepostos. Para um cenário de dois usuários, a constelação do usuário mais forte é sobreposta à do usuário mais fraco. Especificamente, o transmissor deverá conter dois codificadores ponto a ponto que mapeiam suas respectivas entradas gerando sequências de valor complexo. Com isso, a técnica SC é considerada um dos elementos fundamentais dos esquemas de codificação para alcançar a capacidade dos canais

de transmissão Gaussiano. Particularmente, esses resultados foram demonstrados em [46, 47]. Além disso, em [48] foi introduzido sobre boas estratégias para a SC e foi projetado uma técnica para SC usando blocos prontos de codificação e decodificação para uso individual. Um exemplo de comunicação sobreposta é a transmissão do sinal de televisão para vários receptores ao mesmo tempo [13].

2.1.2 Cancelamento Sucessivo de Interferência (SIC)

Para decodificar as informações sobrepostas em cada receptor, a estratégia de SIC foi inicialmente proposta em [45]. Considerando um cenário *downlink*, enquanto a SC é realizada pela BS, a SIC é realizada nos dispositivos dos usuários móveis. A decodificação por meio da SIC ocorre através da exploração sobre as diferenças na intensidade dos sinais de interesse. Como o próprio nome já representa, o princípio básico dessa estratégia consiste em decodificar os sinais dos usuários sucessivamente. Depois que o sinal de um usuário é decodificado, ele é subtraído do sinal combinado antes que o próximo sinal do usuário seja decodificado. Para o procedimento de SIC, os usuários são ordenados de acordo com a intensidade do sinal e então, os usuários primeiro decodificam o sinal que possui a maior potência (o sinal destinado ao usuário mais fraco) enquanto tratam os sinais de menor potência como interferência. Então, os dados decodificados durante a primeira fase de decodificação são subtraídos do sinal sobreposto recebido. O mesmo procedimento é realizado para o sinal com a segunda potência mais alta e também para os sinais seguintes. O procedimento se repete até que o usuário atual decodifique seu sinal de interesse [9, 13].

A Figura 1 também ilustra o funcionamento da estratégia SIC para um sistema com dois usuários. Como mostra a figura, o usuário 1 está localizado mais próximo à BS e, conseqüentemente, possui melhores condições de canal. Situado na borda da célula, o usuário 2 é considerado como o usuário fraco pois devido à distância apresenta piores condições de canal. O sinal recebido pelo usuário 1 e pelo usuário 2 pode ser representado respectivamente por $y_1 = h_1(\omega_1 s_1 + \omega_2 s_2)$ e $y_2 = h_2(\omega_1 s_1 + \omega_2 s_2)$, em que h_i denota o ganho de canal, ω_i denota os coeficientes de potência e s_i representa o sinal de interesse, com $i = 1, 2$. Desde que $|h_1|^2 > |h_2|^2$, então a BS aloca os coeficientes de potência de forma que $\omega_1 < \omega_2$, restrito a $\omega_1 + \omega_2 = 1$. Considerando um modelo de sinal sem ruído, o processo específico envolvido na decodificação dos sinais sobrepostos pode ser resumido da seguinte maneira [48]:

- **Decodificação no usuário 1:**

1. Decodifica s_2 de y_1 tratando s_1 como interferência.
2. Subtrai de y_1 o sinal detectado no passo anterior, como por exemplo: $y_1 - h_1 \omega_2 s_2$.
3. Desde que o passo 2 seja realizado com perfeição, o usuário 1 detecta seu sinal de interesse s_1 sem qualquer interferência.

- **Decodificação no usuário 2:**

1. Decodifica s_2 de y_2 tratando s_1 como interferência.

2.1.3 Principais Vantagens da NOMA

Como a SC e a SIC continuam amadurecendo em termos de aspectos teóricos e práticos, a NOMA tem se consolidado como uma técnica promissora para as redes B5G por oferecer atraentes vantagens. Especificamente, as principais vantagens da NOMA em comparação com a OMA podem ser resumidas da seguinte forma [9, 12, 22, 49, 50]:

- **Baixa latência de transmissão:** na convencional OMA, independentemente de quantos bits um usuário deseja transmitir, o dispositivo deve esperar até que um RB não ocupado esteja disponível, gerando uma alta latência de transmissão e uma alta sobrecarga de sinalização. Essa característica torna a aplicação da OMA inviável diante dos requisitos de latência nos sistemas B5G. Por outro lado, a NOMA possui um agendamento flexível, pois pode acomodar um número variável de dispositivos em um mesmo RB, dependendo da aplicação que está sendo usada e da qualidade de serviço (do inglês, *Quality of Service* (QoS)) percebida no dispositivo. Dessa forma, a NOMA alcança uma notável redução na latência de transmissão.
- **Conectividade massiva:** o número de usuários atendidos em todas as técnicas OMA é limitado pelo número de RB disponíveis. Todavia, ao explorar as características não-ortogonais da NOMA, torna-se possível servir muitos usuários em um mesmo RB através da sobreposição de seus sinais. Nesse sentido, a NOMA pode ser adaptada para aplicações típicas da IoT, onde um grande número de dispositivos tentam esporadicamente transmitir pacotes pequenos. Com isso, a NOMA permite um relevante aumento de conexões simultâneas utilizando menos RB.
- **Alta eficiência espectral:** em NOMA todos usuários desfrutam de toda a largura de banda disponível, enquanto os usuários da OMA são limitados a uma fração menor do espectro, que é inversamente proporcional ao número de usuários. A NOMA permite que cada RB seja compartilhado de maneira não-ortogonal entre todos os usuários através

da sobreposição dos seus sinais, resultando em alta eficiência de largura de banda e, conseqüentemente, melhora significativa na taxa de transferência do sistema.

- **Justiça entre os usuários:** definitivamente as técnicas tipo OMA não são eficientes em fornecer justiça entre os usuários. Na OMA, independentemente das condições do canal, todo um RB é concedido a cada usuário. Enquanto isso, a NOMA permite que todos os usuários sejam servidos paralelamente em um mesmo RB mas com diferentes coeficientes de potência. Esse importante recurso da NOMA permite a alocação de mais potência aos usuários com piores condições de canal. Ao fazer isso, a NOMA é capaz de garantir um balanceamento atraente em termos de taxa de transferência, garantindo justiça entre os usuários por meio de estratégias de alocação de potência. Além disso, aumenta o desempenho do sistema em termos da taxa de transferência média. Isso ocorre pois apesar das altas taxas dos usuários fortes serem reduzidas, é possível manter a taxa média do sistema alta ao mesmo tempo em que os usuários fracos são atendidos com a mesma taxa dos usuários fortes por meio da justiça. Dessa forma, faz-se necessário o desenvolvimento de estratégias sofisticadas e políticas de alocação de potência inteligentes para assegurar justiça entre todos usuários.
- **Ganho de desempenho em cenários de alta mobilidade:** em cenários de alta mobilidade, a informação do estado do canal (do inglês *Channel State Information (CSI)*) se torna desatualizada para as técnicas OMA que necessitam de constante conhecimento de canal. Enquanto isso, a técnica NOMA no domínio da potência não necessita da obtenção precisa das informações do canal, pois o *feedback* da CSI é usado apenas para alocação de potência. Portanto, independentemente do suporte a usuários móveis ou fixos, ter um *feedback* desatualizado de precisão limitada do canal, associado a uma certa imprecisão e atrasos máximos, não prejudicará gravemente o desempenho do sistema.
- **Compatibilidade:** devido ao fato da NOMA explorar uma nova dimensão, como por exemplo o domínio da potência, a NOMA é considerada como uma técnica complementar e compatível com a atual tecnologia empregada nos sistemas de comunicação móvel. Do ponto de vista teórico, pode ser aplicada sobre outras técnicas de múltiplo acesso existentes, inclusive pode trabalhar em cooperação com técnicas convencionais de OMA, como TDMA e OFDMA.

2.2 Comunicação Cooperativa

As comunicações cooperativas permitem a utilização eficiente dos recursos de comunicação, permitindo que nós ou terminais em uma rede de comunicação colaborem entre si na transmissão de informações, sendo capaz de explorar a diversidade espacial sem a necessidade de utilizar múltiplas antenas no transmissor e/ou no receptor [51]. Essa estratégia pode ser utilizada para melhorar consideravelmente a conectividade da rede, a confiabilidade da comunicação, a eficiência energética e a eficiência espectral. Além disso, podem contribuir diretamente na redução de custos e de infraestrutura na implantação do sistema. Essas atrativas vantagens consolidam a estratégia de comunicação cooperativa como uma das técnicas promissoras para os sistemas e aplicações da B5G.

Os esquemas de processamento dos sinais recebidos pelos *relays* são considerados aspectos fundamentais em comunicações cooperativas. Esses esquemas de processamento resultam em diferentes protocolos de comunicação e podem ser geralmente categorizados como esquemas de retransmissão fixa e de retransmissão adaptativa [52]. Os esquemas de retransmissão fixa tem fácil implementação e seu funcionamento consiste na divisão fixa dos recursos do canal entre fonte e o *relay*, o que pode causar baixa eficiência em termos de largura de banda. Enquanto isso, na retransmissão adaptativa os recursos são divididos dinamicamente, superando a ineficiência produzida pela retransmissão fixa à custa de maior complexidade de implementação.

Devido à baixa complexidade de implementação, os protocolos do tipo retransmissão fixa AF e DF são comumente designados como os dois principais protocolos das comunicações cooperativas [15, 16]. Com base nisso, um detalhamento teórico sobre os protocolos AF e DF será apresentado a seguir.

2.2.1 Protocolos de Retransmissão

- **Amplifica-e-encaminha (AF):** esse protocolo é de fácil implementação e não modifica a informação presente no sinal, classificando-o como um protocolo de retransmissão transparente. Ao utilizar o protocolo AF, o *relay* transmite uma versão amplificada do sinal para o terminal de destino. O *relay* aplica um ganho no sinal, o que também conduz à amplificação do ruído. No receptor, cada usuário recebe uma versão ruidosa do sinal transmitido pelo *relay* e dependendo do ganho de amplificação usado, um *relay* do tipo

AF pode ser categorizado como relay de ganho fixo ou de ganho variável. Um *relay* com ganho fixo amplifica o sinal partir de um valor constante, sendo calculado em função do valor médio dos coeficientes do canal entre a BS e o *relay*. Considerando um *relay* com ganho variável, o fator de amplificação é calculado em função dos valores instantâneos dos coeficientes dos canais, se adaptando constantemente as mudanças do estado do canal entre a BS e o *relay* [52].

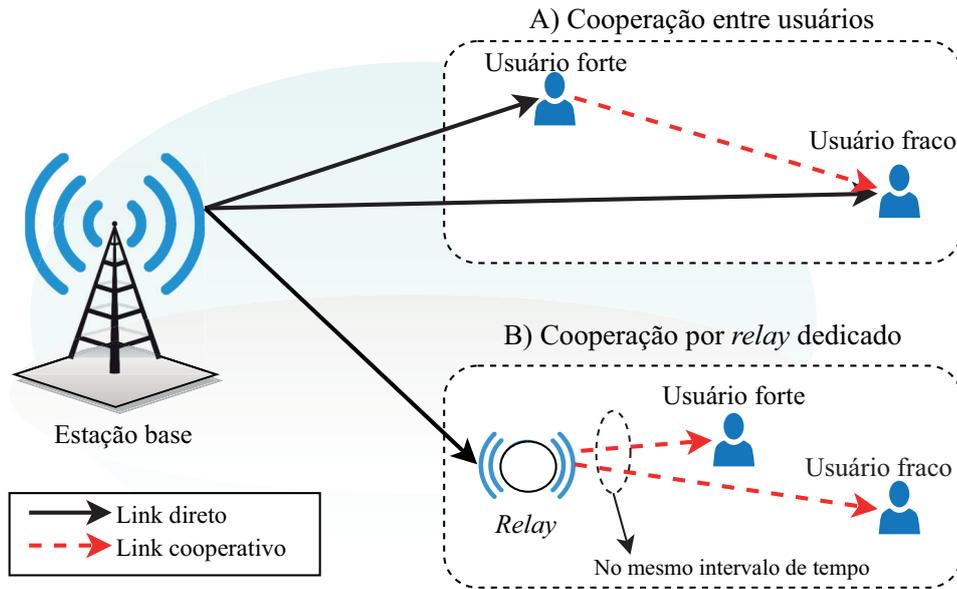
- **Decodifica-e-encaminha (DF):** nesse protocolo os sinais podem ser modificados, sendo classificado como um protocolo de retransmissão regenerativa. O processamento do sinal recebido pelo *relay* do tipo DF é dado por meio da detecção, decodificação, regeneração, recodificação e, por fim, da retransmissão para o destino. Esses processos de decodificação e recodificação correspondem à transformações não-lineares do sinal recebido. Por causa dessa sequência de passos, o sistema necessita de recursos de *hardware* mais potentes, pois a execução dos passos exige maior complexidade. Uma grande vantagem desse protocolo consiste na redução dos efeitos do ruído, pois não há amplificação do mesmo. Entretanto, erros no processo de detecção podem ocorrer no *relays*, resultando na retransmissão das informações incorretas para os usuários finais. Apesar disso, o protocolo DF alcança melhor desempenho em relação ao protocolo AF em termos de probabilidade de *outage* e da taxa de erro de bit [15, 52].

2.2.2 Modo de Retransmissão

O modo de retransmissão nos *relays* pode ser categorizado como retransmissão HD, retransmissão FD ou retransmissão híbrida, que denota a possibilidade de operação dos modos HD e FD em um mesmo terminal. De forma sucinta, os modos de retransmissão de *relays* do tipo HD e do tipo FD serão apresentados a seguir.

- **Half-Duplex (HD):** o *relay* recebe e transmite os sinais a partir de canais ortogonais, ou seja, em banda de frequência ou intervalos de tempo distintos. Esse modo apresenta perda em termos de eficiência espectral, pois é consumido o dobro de recursos para auxiliar o processo de comunicação entre a BS e os usuários [15].
- **Full-Duplex (FD):** o *relay* recebe e transmite os sinais na mesma frequência e no mesmo intervalo de tempo. Dessa forma, o modo FD permite recuperar a perda de eficiência espectral resultante do modo HD. Uma característica importante no modo FD é a presença prejudicial da componente de auto interferência nos *relays*, causada pela ressonância

Figura 3 – Retransmissão em um sistema cooperativo NOMA.



Fonte: elaborada pela autora.

do sinal da antena transmissora para a antena receptora. Para solucionar esse problema, diversos esforços em pesquisa foram realizados, e a partir de técnicas de cancelamento de interferência a implementação de redes FD tornou-se viável [53].

2.3 Redes Cooperativas NOMA

Os projetos de redes cooperativas NOMA são soluções promissoras devido a sua capacidade de fornecer ganhos de diversidade espacial para atenuar o desvanecimento, estender a cobertura da rede e aumentar a confiabilidade de transmissão para os usuários que enfrentam péssimas condições de canal. Como já mencionado na Seção 1.2, esforços em pesquisa foram realizados e soluções foram propostas para melhorar ainda mais o desempenho de redes cooperativas NOMA. Na literatura são apontados dois métodos de retransmissão em redes cooperativas NOMA, são eles: cooperação entre os usuários e cooperação por *relays* dedicados.

Um esquema típico de transmissão cooperativa NOMA pode ser dividido em duas fases, a fase de transmissão direta e a fase de transmissão cooperativa. Esse esquema é ilustrado na Figura 3. A figura ilustra uma rede cooperativa NOMA constituída por uma BS que pretende transmitir para dois usuários com diferentes condições de canal. No modelo apresentado são exibidos os dois métodos de retransmissão para auxiliar o processo de comunicação entre a BS e os usuários. A seguir, cada método será descrito de forma mais específica.

A) Cooperação entre usuários: nesse modelo de retransmissão, considera-se que a coopera-

ção ocorre entre os usuários da rede. Dessa forma, um usuário com melhores condições de canal atua como um *relay* para o usuário com piores condições de canal, chamado de usuário-assistente. Durante a fase da transmissão direta, a BS transmite o sinal sobreposto para os dois usuários. Entretanto, devido ao forte desvanecimento, o usuário mais distante recebe um sinal muito degradado. Para combater isso, aproveita-se que usuário forte executa a SIC para decodificar a mensagem do usuário fraco e, então, designa-o como *relay* para encaminhar as informações decodificadas para o usuário fraco. Dessa forma, o usuário fraco recebe duas cópias das mensagens provenientes de canais diferentes, resultando em melhor confiabilidade na recepção para usuários distantes da BS. Em [18] foi proposta uma rede cooperativa NOMA, baseada na cooperação entre os usuários. A eficiência espectral de redes cooperativas NOMA pode ser aprimorada ainda mais utilizando os conceitos de comunicação FD, conforme mostrado em [28, 54, 55]

B) Cooperação por *relay* dedicado: esse método consiste em empregar *relays* dedicados para auxiliar a transmissão entre a BS e os usuários. Uma motivação para a utilização desse método em redes cooperativas NOMA é o alcance de melhorias significativas na eficiência espectral dos usuários próximos à borda da célula [14]. Isso ocorre pois, em comparação com as redes cooperativas OMA, as redes cooperativas NOMA necessitam de um número reduzido de intervalo de tempo para transmitir as mensagens para os usuários, o que implica imediatamente em superioridade em termos de eficiência espectral [56, 57]. Outra motivação é a escalabilidade e compatibilidade, pois o método de *relays* dedicados pode ser aplicado no mais diversos cenários com diferentes números de transmissores e receptores. Por exemplo, suponha um ambiente onde exista um grande número de usuários ociosos na rede sem fio, tal como estádios esportivos e centro de convenções. Os dispositivos ociosos dos usuários podem ser utilizados como *relays* dedicados para ajudar outros usuários e, portanto, melhorar a cobertura do sistema.

2.3.1 Principais Vantagens das Redes Cooperativas NOMA

Comparado ao NOMA convencional e ao cooperativo OMA, as principais vantagens das transmissões cooperativas em NOMA podem ser resumidas da seguinte forma [9, 13]:

- **Maior ganho de diversidade:** sistemas cooperativos NOMA conseguem fornecer aos usuários mais fracos ganho de diversidade aprimorado, superando o desvanecimento dos multipercursos com ganhos de diversidade mais elevados, como demonstrado em [18]. Ao

mesmo tempo, aumenta a confiabilidade da conexão para todos os usuários da rede.

- **Baixa redundância do sistema:** ao designar o usuário mais forte como retransmissor e utilizar a técnica SIC, a mensagem do usuário fraco será decodificada pelo usuário forte. Portanto, é vantajoso considerar o emprego do protocolo DF para auxiliar os usuários mais fracos. Dessa forma, os sinais dos usuários mais fracos podem ser retransmitidos de uma posição mais próxima do destino.
- **Melhor justiça entre os usuários:** em redes cooperativas NOMA a confiabilidade do usuário fraco é significativamente aprimorada. Como consequência, a justiça da transmissão NOMA pode ser melhorada. Particularmente nos cenários em que o usuário fraco está na extremidade da célula, os *relays* auxiliam o processo de comunicação entre a fonte e o destino e podem garantir justiça de taxa a partir da alocação de potência adequada para cada usuário.
- **Eficiência espectral:** quando comparada com uma rede cooperativa OMA, a eficiência espectral alcançada pelas redes cooperativas NOMA é superior. Isso pode ser imediatamente deduzido do fato de que os requisitos dos número de intervalos de tempo é reduzido de quatro para dois. Considerando dois usuários, em redes cooperativa OMA com *relays* dedicados são necessário dois intervalos de tempo para a BS transmitir para os *relays* e mais dois intervalos de tempo para que os *relays* retransmitam as mensagens para os usuários. Por outro lado, em redes cooperativas NOMA com *relays* dedicados são necessários apenas dois intervalos de tempo, um para a transmissão da BS para os *relays* e o outro referente à retransmissão dos *relays* para os usuários.

2.3.2 Controle de Potência em Redes Cooperativas NOMA

O controle e alocação de potência tem sido amplamente estudado em cada geração dos sistemas de comunicação, pois a alocação inadequada de potência entre os usuários aumentará inevitavelmente o consumo geral de potência, resultando em interferência extra e, conseqüentemente, degradando o desempenho geral do sistema. Como já dito anteriormente, em NOMA faz-se necessário alocar mais potência para usuários com piores condições de canal e menos potência para usuários com melhores condições de canal para tentar alcançar justiça entre os usuários da rede. Comparado à OMA, a alocação ótima de potência na NOMA impõe mais restrições associadas à qualidade do canal, potência total disponível, aquisição de CSI e QoS, fazendo com que a capacidade de cancelamento de interferência, a taxa de transferência, a

admissão de novos usuários e a probabilidade de *outage* do sistema sejam afetadas diretamente. Considerando questões de justiça em redes NOMA, as principais estratégias para problemas de alocação de potência pode ser resumidas da seguinte forma [13, 14]

- **Alocação de potência ordenada:** uma abordagem simples, porém eficaz para garantir a equidade em sistemas NOMA é alocar mais potência aos usuários com piores condições de canal. Os usuários são ordenados e a potência é alocada de acordo com as condições de canal de cada usuário. Ao fazer isso, os usuários fracos podem alcançar taxas adequadas.
- **Justiça de taxa com max-min:** o problema de alocação de potência com max-min busca maximizar a mínima taxa entre os usuários, ou seja, maximiza a taxa dos usuários mais fracos.
- **Justiça Proporcional:** esse método é capaz de maximizar a média geométrica das taxas do usuário. Nos cenários NOMA, uma política de justiça proporcional viável é agendar os usuários com base em suas respectivas taxas instantâneas, garantindo adicionalmente uma certa taxa-alvo média de longo prazo.
- **Taxa de soma ponderada:** a ideia principal desse método é considerar um fator de ponderação positivo adicional para a taxa alcançável de cada usuário, que conduz à prioridade de cada usuário no contexto da alocação de recursos.

3 ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA E SELEÇÃO DE *RELAY* EM SISTEMAS CFR-NOMA

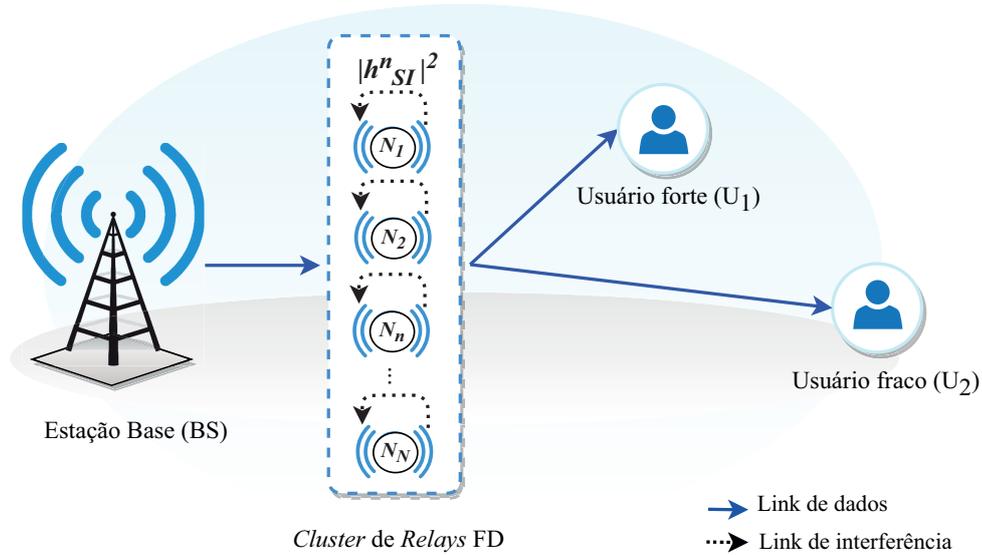
Neste capítulo, o desempenho de redes cooperativas NOMA com múltiplos *relays* operando em modo FD e com protocolo DF será investigado. Primeiro, as principais contribuições são descritas na Seção 3.1. Em seguida, o modelo sistemático e as considerações principais do modelo utilizado são apresentados na Seção 3.2. Na Seção 3.3, considerando a justiça de taxa entre os dois usuários da rede, um problema de otimização para a alocação de potência é formulado. Na Seção 3.4 estão contidos os resultados das simulações e as discussões. E por fim, a Seção 3.5 traz o resumo do capítulo.

3.1 Contribuições

As principais contribuições e detalhes específicos desse capítulo podem ser resumidas da seguinte forma:

- Realiza-se a investigação de sistemas CFR-NOMA com múltiplos *relays*, bem como a proposição de uma política ótima de alocação de potência nos *relays* para maximizar a mínima taxa entre os usuários e garantir equidade de taxa. Especificamente, baseado na CSI obtida, formula-se um problema de otimização dos coeficientes de potência dos usuários sujeito a restrições de potência e de taxa.
- O problema de otimização de potência considerado é simplificado para um problema convexo, o que possibilita obter a solução ótima por meio das condições de Karush-Kuhn-Tucker (KKT). Com isso, deriva-se analiticamente a solução ótima em forma fechada para o problema de alocação de potência nos *relays*.
- O método de RS de [26] é ampliado para sistemas CFR-NOMA com alocação adaptativa de potência.
- A corretude do esquema proposto é validada por meio de simulações numéricas e comparada com esquemas que operam com estratégias de alocação fixa de potência e com outros métodos de RS. Os resultados de simulação demonstram a superioridade do estudo proposto em termos de índice de justiça de taxa, de probabilidade de *outage* e de taxa alcançável.

Figura 4 – Modelo do sistema CFR-NOMA com múltiplos *relays* e dois usuários.



Fonte: elaborada pela autora.

3.2 Modelo do Sistema

O modelo do sistema considerado neste capítulo consiste em uma rede *downlink* NOMA com múltiplos *relays* FD usando o protocolo DF, como ilustrado na Figura 4. O sistema contém uma BS, um *cluster* de N *relays* (\mathcal{R}) e dois usuários (U_1 e U_2) com diferentes condições de canal. Considera-se que não existe *link* direto entre a BS e os usuários devido a fortes desvanecimentos e obstáculos físicos. Para auxiliar no processo de comunicação, utiliza-se um *relay* FD que deve ser selecionado a partir do *cluster* de *relays* \mathcal{R} .

Considera-se que os *relays* são equipados com duas antenas, uma para transmissão e outra para recepção dos sinais, possibilitando a operação FD à custa da auto interferência, enquanto a BS e os usuários são equipados com apenas uma antena. Além disso, assume-se que os usuários exigem a mesma taxa de dados a ser fornecida de forma aceitável.

Todos os canais sem fio do sistema experimentam desvanecimento Rayleigh não seletivo em frequência e são distorcidos por uma componente de ruído branco Gaussiano aditivo (do inglês, *Additive White Gaussian Noise* (AWGN)). Os coeficientes de canal correspondentes aos enlaces $BS \rightarrow \mathcal{R}$ e $\mathcal{R} \rightarrow U_i$ são respectivamente $h_n \sim \mathcal{CN}(0, \lambda_n)$ e $g_{n,i} \sim \mathcal{CN}(0, \lambda_{n,i})$, com $i \in \{1, 2\}$ e $n \in \{1, \dots, N\}$, em que $\lambda_n = d_n^{-\psi}$ e $\lambda_{n,i} = d_{n,i}^{-\psi}$. Os termos $d_n^{-\psi}$ e $d_{n,i}^{-\psi}$ denotam, respectivamente, a distância entre a BS e o n -ésimo *relay*, e a distância entre o n -ésimo *relay* e o i -ésimo usuário. A variável ψ denota o expoente de perda de percurso.

Baseado nos princípios da NOMA, o processo de transmissão se inicia com a BS sobrepondo as mensagens de todos usuários por meio da SC. Em seguida, a mensagem sobreposta

$x(t) = \sum_{i=1}^2 \sqrt{\omega_i} s_i(t)$ é transmitida para todos os *relays*, em que $s_i(t)$ é mensagem do i -ésimo usuário no t -ésimo *slot* de tempo e ω_i denota o coeficiente de potência alocado para o i -ésimo usuário, de tal modo que $\sum_{i=1}^2 \omega_i = 1$ e $\omega_i > 0$. A mensagem recebida pelo n -ésimo *relay* é dada por

$$y_n(t) = \sqrt{P_s} |h_n|^2 x(t) + \sqrt{P_r} |h_r|^2 \hat{x}_n(t - \tau) + \eta_n(t), \quad (3.1)$$

em que P_s e P_r denotam a potência de transmissão da BS e dos *relays*, respectivamente. Sem perda de generalidade, assume-se que $P_s = P_r$. A componente h_r representa o *link* de auto interferência ocasionado pelo modo FD, modelada como $h_r \sim \mathcal{CN}(0, \kappa \lambda_r)$ com média zero e variância $\kappa \lambda_r$, sendo κ o fator de cancelamento de auto interferência ($0 \leq \kappa \leq 1$). Por exemplo, quando $\kappa = 0$ significa perfeito cancelamento de auto interferência. Além disso, $\hat{x}_n(t - \tau)$ representa o sinal processado pelo n -ésimo *relay*, em que τ consiste no atraso referente ao processamento do sinal no *relay*, e $\eta_n(t)$ denota a componente de AWGN de média zero e variância σ^2 . O sinal processado pelo n -ésimo *relay* pode ser expresso como

$$\hat{x}_n(t - \tau) \triangleq \sqrt{\alpha_{n,1}} s_1(t - \tau) + \sqrt{\alpha_{n,2}} s_2(t - \tau), \quad (3.2)$$

em que $\alpha_{n,i}$, $i \in \{1, 2\}$ denota o coeficiente de potência alocado pelo n -ésimo *relay* para o i -ésimo usuário, de tal modo que $\alpha_{n,1} + \alpha_{n,2} = 1$ e $\alpha_{n,1} < \alpha_{n,2}$.

Supõe-se que a taxa de transmissão para cada usuário não seja superior à taxa alcançável correspondente, o que torna possível considerar que a estratégia de SIC pode ser implementada em cada *relay*. Primeiramente, o n -ésimo *relay* empenha-se em decodificar a mensagem do usuário U_2 tratando o sinal do usuário U_1 como interferente. Em seguida, a mensagem de U_2 é removida do sinal analisado, permanecendo somente a mensagem de interesse do usuário U_1 . De acordo com essas considerações, a relação sinal-ruído mais interferência (do inglês, *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio* (SINR)) alcançada pelo n -ésimo *relay* ao decodificar o sinal do usuário U_1 e do usuário U_2 é expressa, respectivamente, por

$$\gamma_n^{(1)} = \frac{\rho_s |h_n|^2 \omega_1}{|h_r|^2 \rho_r + 1}, \quad (3.3)$$

e

$$\gamma_n^{(2)} = \frac{\rho_s |h_n|^2 \omega_2}{\rho_s |h_n|^2 \omega_1 + |h_r|^2 \rho_r + 1}, \quad (3.4)$$

em que $\rho_s = P_s/\sigma^2$ e $\rho_r = P_r/\sigma^2$ denotam a SNR de transmissão na BS e nos *relays*, respectivamente. Sem perda de generalidade, assume-se que a $\rho_s = \rho_r = \rho$.

3.2.1 Método de Seleção de Relays

O esquema de seleção de *relays* constitui-se de duas etapas. Na primeira etapa, seleciona-se os *relays* que satisfazem estritamente a QoS de todos os usuários, ou seja, os *relays* capazes de decodificar corretamente a mensagem recebida. O conjunto de *relays* selecionados pode ser formulado como

$$\mathcal{S} = \left\{ \forall n \in \mathcal{R}, \log_2(1 + \gamma_n^{(1)}) \geq R_1, \log_2(1 + \gamma_n^{(2)}) \geq R_2 \right\}, \quad (3.5)$$

em que R_i denota a taxa requerida por U_i , com $i \in \{1, 2\}$.

Os *relays* contidos no conjunto \mathcal{S} decodificam simultaneamente a mensagem dos usuários, sobrepõem os sinais decodificados por meio da SC e, por fim, transmitem o sinal sobreposto para U_i . Considerando $n \in \mathcal{S}$, o sinal recebido em U_1 e U_2 , pode ser respectivamente expresso como

$$y_{n,1}(t) = \sqrt{P_r} |g_{n,1}|^2 \hat{x}_n(t - \tau) + \eta_{n,1}(t), \quad (3.6)$$

e

$$y_{n,2}(t) = \sqrt{P_r} |g_{n,2}|^2 \hat{x}_n(t - \tau) + \eta_{n,2}(t), \quad (3.7)$$

em que $\eta_{n,i}(t)$ denota a componente AWGN de média zero e variância $\sigma^2 = 1$.

Nos receptores finais, o usuário fraco (U_2) decodifica a sua própria mensagem $s_2(t)$ considerando a mensagem de U_1 como ruído. Logo, a SINR experimentada por U_2 pode ser obtida por

$$\gamma_{n,2} = \frac{\rho \alpha_{n,2} |g_{n,2}|^2}{\rho \alpha_{n,1} |g_{n,2}|^2 + 1}. \quad (3.8)$$

Enquanto isso, o usuário forte (U_1) realiza a SIC. Primeiramente, a mensagem de U_2 é decodificada e depois o cancelada do sinal recebido. Dessa forma, a SINR experimentada por U_1 relacionada à mensagem $s_2(t)$ pode ser escrita como

$$\gamma_{n,1 \rightarrow 2} = \frac{\rho \alpha_{n,2} |g_{n,1}|^2}{\rho \alpha_{n,1} |g_{n,1}|^2 + 1}. \quad (3.9)$$

Em seguida, U_1 decodifica sua própria mensagem a partir do sinal remanescente. Considerando que a mensagem de U_2 foi cancelada com exatidão, a SNR experimentada por U_1 é dada por

$$\gamma_{n,1} = \rho \alpha_{n,1} |g_{n,1}|^2. \quad (3.10)$$

A segunda etapa de RS consiste em selecionar somente um *relay* dentre os disponíveis no conjunto \mathcal{S} . O *relay* selecionado deve ser aquele que maximiza a SINR do usuário mais fraco, ou seja,

$$n^* = \arg \max_{n \in \mathcal{S}} \{\gamma_{n,2}\}. \quad (3.11)$$

3.2.2 Taxa Alcançável

Pressupõe-se que o usuário forte possa decodificar o sinal destinado ao usuário fraco, de forma que a taxa alcançável dependa somente da SINR experimentada enquanto decodifica a sua própria mensagem. Sob essa consideração, a taxa alcançável para o usuário U_1 é dada por

$$R_{n^*,1} = \log_2(1 + \gamma_{n^*,1}), \quad (3.12)$$

enquanto para o usuário U_2 , a taxa alcançável é dada por

$$R_{n^*,2} = \log_2(1 + \gamma_{n^*,2}). \quad (3.13)$$

Note que as equações (3.8)–(3.10) serão avaliadas somente após encontrar os coeficientes de potência $\alpha_{n,i}$, conforme mostrado a seguir.

3.3 Alocação Adaptativa de Potência nos Relays

Nesta seção, investigar-se-á a alocação dos coeficientes de potência para redes CFR-NOMA com dois usuários. Dessa forma, um problema de otimização será formulado para desenvolver uma política de alocação de potência com o potencial de garantir a equidade de taxa entre os usuários. Com base na CSI obtida, o problema de otimização nos *relays* de \mathcal{S} é formulado e a solução ótima para a alocação dos coeficientes de potência de cada usuário é obtida.

3.3.1 Formulação do Problema de Otimização

O problema de otimização é formulado para maximizar a mínima taxa alcançável entre os usuários. Essa estratégia garantirá equilíbrio de taxas entre os usuários, fazendo com que o desempenho do usuário fraco seja aperfeiçoado para alcançar melhores níveis de taxa.

Analisando (3.8)–(3.10), nota-se que duas variáveis de coeficientes de potência serão incluídas no problema de otimização. Do ponto de vista de justiça, o problema pode ser formulado como

$$\max_{\alpha_{n,1}, \alpha_{n,2}} \left\{ \min \left(\log_2(1 + \gamma_{n,1}), \log_2(1 + \gamma_{n,2}) \right) \right\}, \quad (3.14a)$$

restrito a

$$\alpha_{n,1} + \alpha_{n,2} = 1, \quad (3.14b)$$

$$\alpha_{n,1} \geq 0 \text{ e } \alpha_{n,2} \geq 0. \quad (3.14c)$$

Para melhorar o desempenho de U_2 e conseqüentemente garantir equidade de taxa no sistema, as taxas de U_2 deve ser maior ou igual à alcançada por U_1 . Dessa forma, o problema (3.14) pode ser reformulado para que a potência aplicada para o usuário forte seja suficiente para garantir o sucesso da SIC, e que a potência restante seja fornecida ao usuário fraco. Então, o problema é reformulado e expresso por

$$\max_{\alpha_{n,1}, \alpha_{n,2}} \{\log_2(1 + \gamma_{n,1})\}, \quad (3.15a)$$

restrito a

$$\alpha_{n,1} + \alpha_{n,2} = 1, \quad (3.15b)$$

$$\alpha_{n,1} \geq 0 \text{ e } \alpha_{n,2} \geq 0, \quad (3.15c)$$

$$\log_2(1 + \gamma_{n,1}) \leq \log_2(1 + \gamma_{n,2}). \quad (3.15d)$$

Como a função $\log_2(\cdot)$ é monotonicamente crescente, e inserindo (3.8) e (3.10) em (3.15d), a restrição (3.15d) pode ser reescrita como $\rho \alpha_{n,1} |g_{n,1}|^2 \leq \frac{\rho \alpha_{n,2} |g_{n,2}|^2}{\rho \alpha_{n,1} |g_{n,2}|^2 + 1}$, ou equivalentemente como

$$\rho \alpha_{n,1} |g_{n,1}|^2 (\rho \alpha_{n,1} |g_{n,2}|^2 + 1) \leq \rho \alpha_{n,2} |g_{n,2}|^2. \quad (3.16)$$

Desde que $\alpha_{n,2} = 1 - \alpha_{n,1}$ e a partir de manipulações algébricas, (3.16) pode ser expressa por

$$\rho^2 |g_{n,1}|^2 |g_{n,2}|^2 \alpha_{n,1}^2 + \rho (|g_{n,1}|^2 + |g_{n,2}|^2) \alpha_{n,1} - \rho |g_{n,2}|^2 \leq 0. \quad (3.17)$$

Pode-se ver que o problema foi convertido em função de $\alpha_{n,1}$. Como resultado, o problema (3.15) pode ser simplificado para

$$\max_{\alpha_{n,1}} \{\log_2(1 + \gamma_{n,1})\}, \quad (3.18a)$$

restrito a

$$\rho^2 |g_{n,1}|^2 |g_{n,2}|^2 \alpha_{n,1}^2 + \rho (|g_{n,1}|^2 + |g_{n,2}|^2) \alpha_{n,1} - \rho |g_{n,2}|^2 \leq 0, \quad (3.18b)$$

$$\alpha_{n,1} \geq 0. \quad (3.18c)$$

À medida que a potência de transmissão no n -ésimo *relay* de \mathcal{S} aumenta, a taxa alcançável de $U_1 [\log_2(1 + \gamma_{n,1})]$ aumenta monotonicamente com $\alpha_{n,1}$. Ao garantir que o usuário forte receba uma parcela de potência suficiente para executar a SIC, a função objetivo (3.18a) pode ser reescrita como $\max_{\alpha_{n,1}} \{\alpha_{n,1}\}$. Reescrevendo este resultado na forma padrão, o problema de otimização (3.18) pode ser simplificado para

$$\min_{\alpha_{n,1}} \{-\alpha_{n,1}\}, \quad (3.19a)$$

restrito a

$$\rho^2 |g_{n,1}|^2 |g_{n,2}|^2 \alpha_{n,1}^2 + \rho (|g_{n,1}|^2 + |g_{n,2}|^2) \alpha_{n,1} - \rho |g_{n,2}|^2 \leq 0, \quad (3.19b)$$

$$-\alpha_{n,1} \leq 0. \quad (3.19c)$$

3.3.2 Solução Ótima para o Problema de Otimização

Nesta seção, a solução ótima global para o problema (3.19) será derivada. Inicialmente, faz-se necessário verificar a convexidade do problema considerado. Para isso, a proposição do seguinte lema é formulada.

Lema 3.1: *O problema de otimização (3.19) é convexo.*

Demonstração. Segundo [58], um problema é convexo quando sua função objetivo é convexa, o conjunto de restrições de desigualdades são convexas e as restrições de igualdade são afins. Com base nisso, primeiro verifica-se que a função objetivo (3.19a) é convexa porque é uma função linear. Como a função que mapeia $\alpha_{n,1}$ a $-\alpha_{n,1}$ é linear e a função do lado esquerdo da condição (3.19b), que consiste em uma função quadrática polinomial, é convexa, conclui-se que as restrições de desigualdade são convexas. Essas considerações fazem com que o problema de otimização (3.19) seja convexo e, portanto, conclui-se a demonstração do Lema 3.1. ■

Como o problema de otimização é convexo, a solução ótima global para problema (3.19), capaz de maximizar a mínima taxa entre os usuários e garantir justiça de taxa, pode ser derivada em forma fechada a partir do seguinte teorema.

Teorema 3.1: A solução ótima global para o problema (3.19) no n -ésimo relay em \mathcal{S} é alcançada em forma fechada por

$$\alpha_{n,1} = \frac{-\left(\rho(|g_{n,1}|^2 + |g_{n,2}|^2)\right) + \sqrt{\left(\rho(|g_{n,1}|^2 + |g_{n,2}|^2)\right)^2 + 4\rho^3|g_{n,1}|^2|g_{n,2}|^4}}{2\rho^2|g_{n,1}|^2|g_{n,2}|^2}. \quad (3.20)$$

Demonstração. Para verificar a existência de uma solução ótima global, são aplicadas as condições de KKT. Essas condições são necessárias para que uma solução seja ótima. Além disso, se o problema de otimização for convexo, essas condições também são suficientes para obter uma solução ótima global. A função Lagrangiana $\mathcal{L}(\cdot)$ correspondente ao problema de otimização (3.19) pode ser formulada como

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\alpha_{n,1}, \mu_1, \mu_2) = & -\alpha_{n,1} + \mu_1 \left(\rho^2 |g_{n,1}|^2 |g_{n,2}|^2 \alpha_{n,1}^2 + \rho (|g_{n,1}|^2 + |g_{n,2}|^2) \alpha_{n,1} - \rho |g_{n,2}|^2 \right) \\ & + \mu_2 (-\alpha_{n,1}), \end{aligned} \quad (3.21)$$

em que μ_1 e μ_2 são, respectivamente, os multiplicadores de Lagrange associados as restrições (3.19b) e (3.19c). Usando as condições de KKT obtêm-se as seguintes equações:

- Estacionariedade:

$$\nabla \mathcal{L}(\alpha_{n,1}, \mu_1, \mu_2) = 0. \quad (3.22a)$$

- Viabilidade primal:

$$\left(\rho^2 |g_{n,1}|^2 |g_{n,2}|^2 \alpha_{n,1}^2 + \rho (|g_{n,1}|^2 + |g_{n,2}|^2) \alpha_{n,1} - \rho |g_{n,2}|^2 \right) \leq 0, \quad (3.22b)$$

$$-\alpha_{n,1} \leq 0. \quad (3.22c)$$

- Viabilidade dual:

$$\mu_1 \geq 0, \quad (3.22d)$$

$$\mu_2 \geq 0. \quad (3.22e)$$

- Folga complementar:

$$\mu_1 \left(\rho^2 |g_{n,1}|^2 |g_{n,2}|^2 \alpha_{n,1}^2 + \rho (|g_{n,1}|^2 + |g_{n,2}|^2) \alpha_{n,1} - \rho |g_{n,2}|^2 \right) = 0, \quad (3.22f)$$

$$\mu_2 (-\alpha_{n,1}) = 0. \quad (3.22g)$$

em que o símbolo ∇ denota o operador gradiente. A partir de (3.22a), obtêm-se

$$\nabla \mathcal{L}(\alpha_{n,1}, \mu_1, \mu_2) = -1 + \mu_1 \left(2\rho^2 |g_{n,1}|^2 |g_{n,2}|^2 \alpha_{n,1} + \rho (|g_{n,1}|^2 + |g_{n,2}|^2) \right) - \mu_2 = 0. \quad (3.23)$$

Baseado na condição (3.22g) e assumindo que $\alpha_{n,1} > 0$, pode-se concluir que $\mu_2 = 0$. Utilizando esse resultado, (3.23) pode ser reescrita da seguinte forma

$$\nabla \mathcal{L}(\alpha_{n,1}, \mu_1, \mu_2) = -1 + \mu_1 \left(2\rho^2 |g_{n,1}|^2 |g_{n,2}|^2 \alpha_{n,1} + \rho (|g_{n,1}|^2 + |g_{n,2}|^2) \right) = 0. \quad (3.24)$$

A partir de (3.24) e de algumas manipulações algébricas, μ_1 pode ser obtido por

$$\mu_1 = \frac{1}{\left(2\rho^2 |g_{n,1}|^2 |g_{n,2}|^2 \alpha_{n,1} + \rho (|g_{n,1}|^2 + |g_{n,2}|^2) \right)}. \quad (3.25)$$

Assumindo que $2\rho^2 |g_{n,1}|^2 |g_{n,2}|^2 \alpha_{n,1} + \rho (|g_{n,1}|^2 + |g_{n,2}|^2) \neq 0$, implica que μ_1 em (3.25) nunca chega a zero. Portanto, este resultado em conjunto com a condição (3.22f) implica que a única solução possível para (3.22b) pode ser obtida a partir da seguinte equação quadrática

$$\rho^2 |g_{n,1}|^2 |g_{n,2}|^2 \alpha_{n,1}^2 + \rho (|g_{n,1}|^2 + |g_{n,2}|^2) \alpha_{n,1} - \rho |g_{n,2}|^2 = 0. \quad (3.26)$$

Retendo apenas a raiz válida de (3.26), o coeficiente de potência ótimo alocado pelo n -ésimo *relay* em \mathcal{S} para o usuário forte U_1 é obtido e pode ser expresso por

$$\alpha_{n,1} = \frac{-\left(\rho (|g_{n,1}|^2 + |g_{n,2}|^2) \right) + \sqrt{\left(\rho (|g_{n,1}|^2 + |g_{n,2}|^2) \right)^2 + 4\rho^3 |g_{n,1}|^2 |g_{n,2}|^4}}{2\rho^2 |g_{n,1}|^2 |g_{n,2}|^2}, \quad (3.27)$$

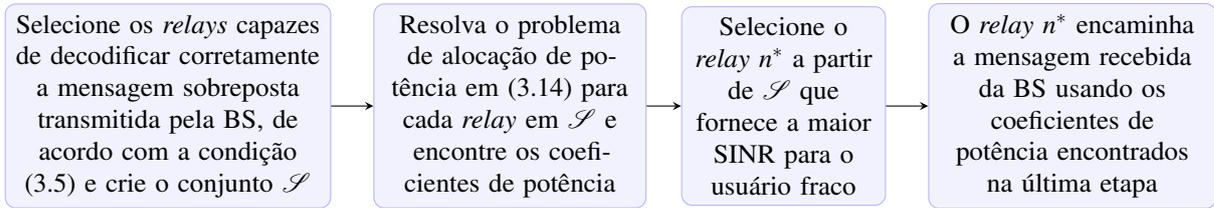
assumindo que $\alpha_{n,2} = 1 - \alpha_{n,1}$. Portanto, a demonstração do Teorema 3.1 é concluída. ■

Esse método de alocação adaptativa tem como objetivo fornecer ao usuário forte uma parcela de potência suficiente para que a SIC seja realizada corretamente. Enquanto isso, a potência restante é alocada para o usuário fraco e, dessa forma, a mínima taxa alcançável é maximizada e a justiça de taxa entre os usuários é obtida. A Figura 5, no topo da próxima página, descreve de forma simplificada a sequência de passos do esquema proposto neste capítulo.

3.4 Resultados de Simulação e Discussões

Nesta seção, os resultados de simulações serão apresentados para avaliar o desempenho do esquema proposto. As simulações foram geradas no *software* MATLAB para um total de 10^5 amostras de Monte Carlo, de forma a assegurar boa significância estatística.

Figura 5 – Sequência de passos do esquema proposto para o sistema CFR-NOMA com múltiplos *relays* e dois usuários.



A probabilidade de *outage*, o índice de justiça de taxa e a taxa alcançável são usadas como métricas de desempenho. A probabilidade de *outage* é estimada como a razão entre o número de eventos de *outage* e o número total de repetições de Monte Carlo. Um evento de *outage* ocorre quando a taxa de dados alcançada por um usuário para uma realização instantânea específica do canal é menor que a taxa de dados requerida. O índice de Jain é utilizado para analisar a justiça de taxa entre os usuários. Esse índice consiste em uma medida quantitativa amplamente usada para estudar a justiça em sistemas sem fio. Para um cenário de dois usuários, o índice de Jain pode ser expresso como [59]

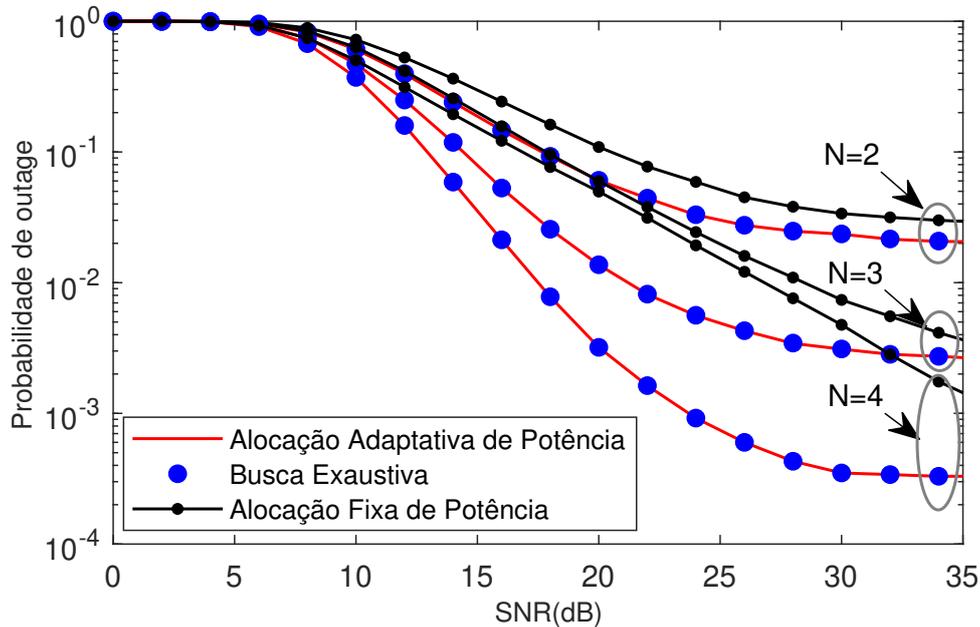
$$J = \frac{(R_{n^*,1} + R_{n^*,2})^2}{2 \left[(R_{n^*,1})^2 + (R_{n^*,2})^2 \right]}, \quad (3.28)$$

cujo alcance tem intervalo $[1/2, 1]$. Nesse intervalo, quando $J = 1/2$, ocorre uma alocação menos justa, enquanto $J = 1$ corresponde à alocação mais justa, em que as taxas de dados recebidas por todos os usuários são iguais. A taxa alcançável consiste na taxa de transferência dos usuários da rede, enquanto a taxa média alcançável do sistema consiste na taxa média de transferência de todos os usuários da rede.

Para as simulações, assume-se que $d_n = 1$ m, $d_{n,1} = 1$ m, e $d_{n,2} = 2$ m, com expoente de perda de percurso $\psi = 2$. A taxa requerida pelos usuários é de $R_1 = R_2 = 1$ BPCU, com parâmetro $\kappa = 0,1$ e $\lambda_r = 0,5$. Os coeficientes de potência fornecidos pela BS são $\omega_1 = 0,2$ e $\omega_2 = 0,8$. Quando a alocação fixa de potência é aplicada nos *relays*, assume-se que os coeficientes de potência fornecidos para os usuários U_1 e U_2 são, respectivamente, $\alpha_{n,1} = 0,2$ e $\alpha_{n,2} = 0,8$.

A Figura 13, no topo da próxima página, apresenta as curvas da probabilidade de *outage* do sistema em função da SNR de transmissão. Nessa figura, as curvas da probabilidade de *outage* do esquema proposto coincidem com a solução ótima obtida através de busca exaustiva. A busca exaustiva consistiu em verificar todos os valores possíveis de $\alpha_{n,1}$ com uma precisão de 10^{-4} . Para isso, discretiza-se $\alpha_{n,1}$ e, a partir dos valores discretizados, encontra-se a solução

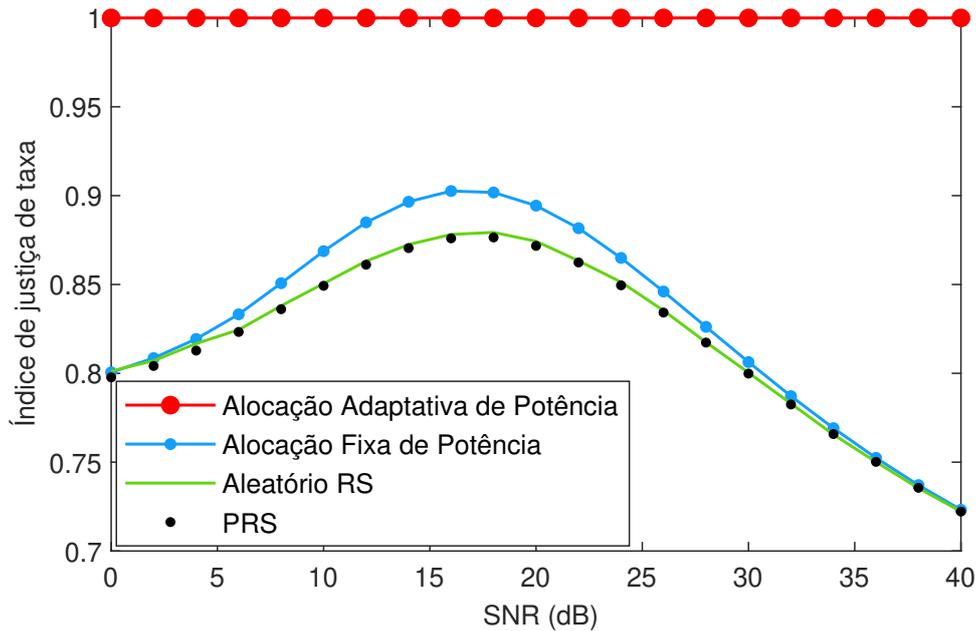
Figura 6 – Probabilidade de *outage* versus SNR transmitida para diferentes números de *relays*.



ótima para o problema à custa de maior complexidade computacional. Esse resultado constata que a solução derivada neste capítulo é ótima, o que verifica a corretude do Teorema 3.1. A Figura 13 também ilustra o desempenho de um sistema quando considera-se alocação fixa de potência nos *relays*. Vale ressaltar que, o método de seleção de *relay* utilizado consiste no esquema de RS estendido para FD, como descrito da Seção 3.2.1. Como pode-se ver, a política de alocação adaptativa de potência proposta pode fornecer desempenho de *outage* muito melhor quando comparada ao esquema fixo. Na alocação fixa, quando o usuário for decodificar sua mensagem, a parcela de sinal interferente relativa ao usuário forte possui grande influência no sinal recebido. Como consequência, o evento de *outage* do sistema ocorre com maior frequência. Com o uso da alocação adaptativa, essa parcela de sinal interferência diminui pois o usuário forte recebe somente o necessário para que a SIC seja realizada com êxito e, ao mesmo tempo, garante que a mínima taxa entre os usuários seja maximizada. Além disso, pode-se ver que quanto maior o número de *relay*, melhor será o desempenho da *outage*. Esse efeito é resultado da diversidade espacial que cada *relay* possui ao alocar diferentes fatores de potência com base nas necessidades de cada usuário.

A Figura 7 analisa o impacto do esquema de alocação adaptativa proposto em termos de justiça de taxa entre os usuários do sistema CFR-NOMA. Para a avaliação comparativa, o esquema de alocação fixa de potência com o esquema RS proposto e outros esquemas de RS são utilizados. Todos eles funcionando com alocação fixa de potência. Do ponto de vista de

Figura 7 – Índice de justiça de taxa *versus* SNR transmitida ($N = 2$ relays).



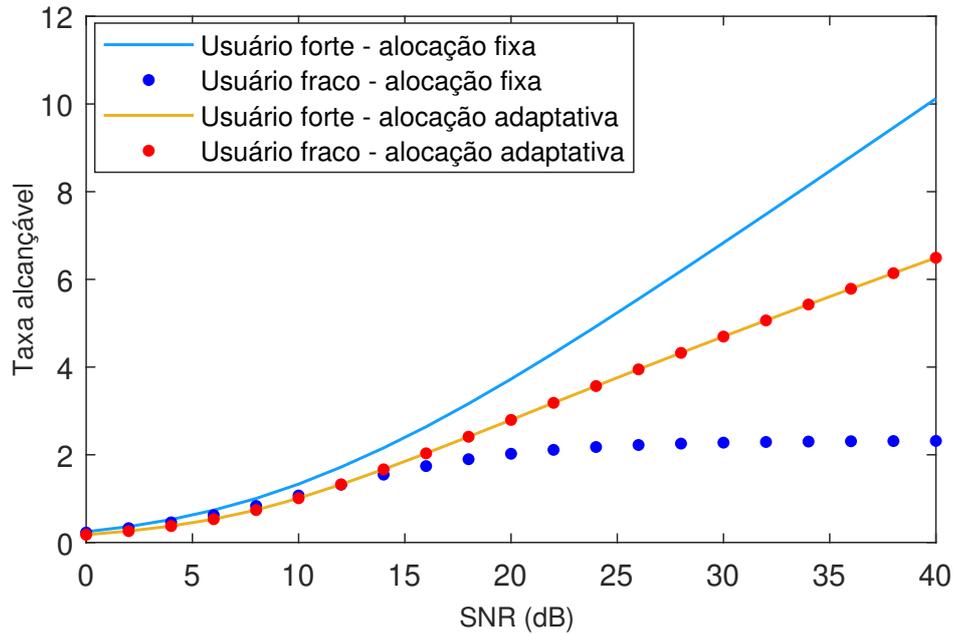
Fonte: elaborada pela autora.

justiça, quando o esquema proposto é aplicado, os *relays* fornecem adaptativamente os fatores de potência para cada usuário. Com isso, todos os usuários alcançam igualmente uma taxa de transmissão instantânea e os seus serviços de tráfego requeridos são satisfeitos. Dessa forma, o sistema alcança um índice de justiça $J = 1$ para todos os valores de SNR. Enquanto isso, o esquema fixo apresenta desempenho mediano, tornando-se pior para valores altos de SNR. Isso ocorre pois, o usuário forte recebe um coeficiente de potência maior que o necessário, logo os usuários mais fracos experimentam maior interferência e, conseqüentemente, alcançam menores taxas.

A Figura 8 mostra a taxa alcançável de cada usuário em função da SNR. Como pode-se verificar, o esquema de alocação fixa de potência favorece somente o usuário mais forte. Enquanto isso, o desempenho do usuário mais fraco é prejudicado ao ponto de atingir uma taxa limite para valores altos de SNR. Entretanto, o esquema de alocação adaptativa de potência beneficia os usuários mais fracos, garantindo justa alocação dos recursos de potência entre todos os usuários do sistema. Com isso, a estratégia proposta realiza um balanceamento entre as taxas dos usuários, melhorando significativamente o desempenho do sistema já que a potência é distribuída de acordo com a necessidade de cada usuário.

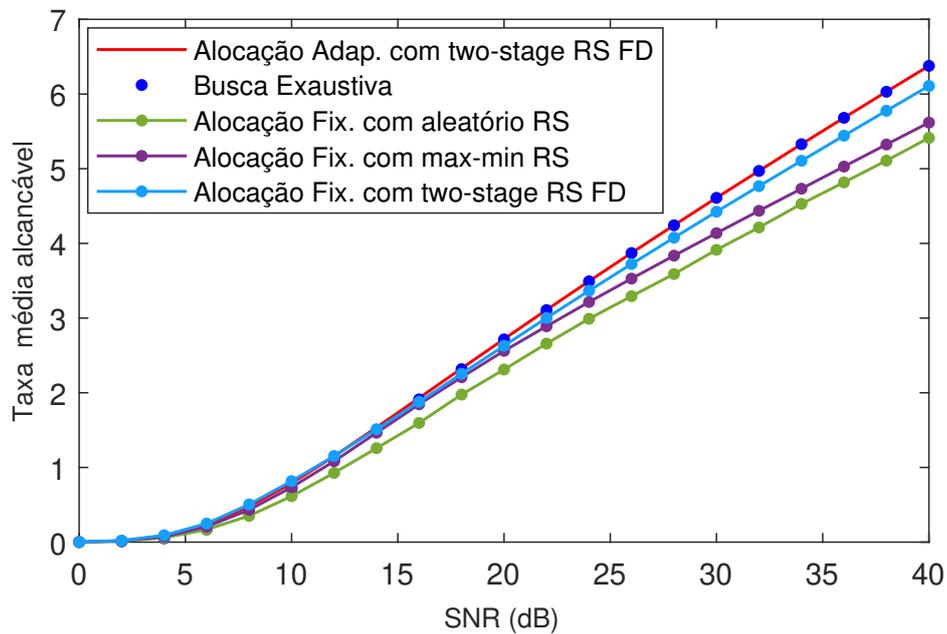
A Figura 9 apresenta as curvas na taxa média alcançável *versus* a SNR de transmissão para diferentes métodos de RS. Para a análise comparativa, utiliza-se o sistema CFR-NOMA

Figura 8 – Taxa média alcançável (BPCU) *versus* a SNR de transmissão para $N = 2$ relays.



Fonte: elaborada pela autora.

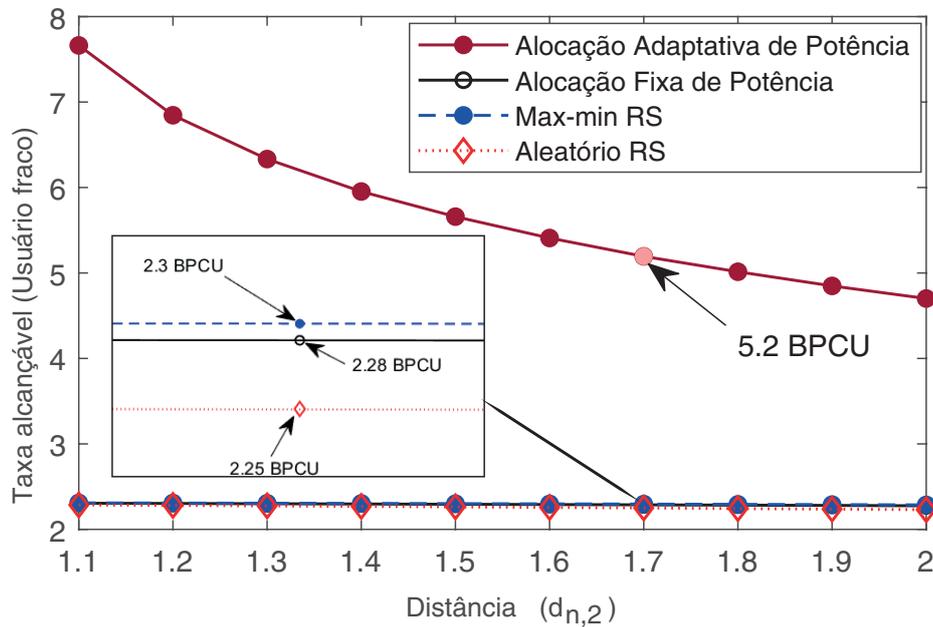
Figura 9 – Taxa média alcançável (BPCU) do sistema *versus* SNR transmitida para $N = 2$ relays.



Fonte: elaborada pela autora.

com alocação adaptativa e o RS FD proposto, e o sistema CFR-NOMA com alocação fixa com os métodos RS FD, max-min RS [26] e seleção aleatória. Primeiramente, pode-se observar que os resultados por busca exaustiva coincidem com a solução ótima derivada neste capítulo. Além disso, o esquema proposto de alocação adaptativa fornece melhorias de desempenho em comparação com os outros esquemas para valores intermediários e altos de SNR. Isso ocorre

Figura 10 – Taxa alcançável em (BPCU) de U_2 versus a distância entre o *relay* e o usuário fraco para $N = 2$ *relays*.



Fonte: elaborada pela autora.

porque o método proposto calcula adaptativamente a potência para garantir que os usuários fiquem satisfeitos com os serviços de tráfego fornecidos e que a justiça de taxa seja maximizada. Enquanto na alocação fixa, todos os *relays* fornecem coeficientes de potência estáticos dentro de cada bloco de desvanecimento, sem considerar a necessidade do usuário. Vale notar que, ao utilizar CFR-NOMA com alocação fixa e RS FD, o desempenho alcançado é superior ao dos métodos convencionais max-min RS e aleatório RS, o que comprova a superioridade do método de seleção de *relay* proposto.

A Figura 10 fornece a comparação de desempenho da taxa alcançável (BPCU) do usuário fraco em função da distância entre ele e o *relay* selecionado. Para isso, o valor da SNR foi configurado em 30 dB. Como referência de desempenho, utiliza-se o sistema CFR-NOMA com alocação adaptativa e RS FD, e o sistema CFR-NOMA com alocação fixa com os métodos RS FD, max-min RS [26] e seleção aleatória. Como pode-se ver, o desempenho do esquema adaptativo é significativamente melhor mesmo quando a distância aumenta. Por exemplo, para $d_{n,2} = 1,7$ m, o esquema proposto alcança uma taxa de 5,2 BPCU, enquanto os outros métodos alcançam uma média de 2,26 BPCU, ou seja, o ganho de taxa alcançado pelo método proposto é de 2,94 BPCU. Esse resultado está relacionado à capacidade de cada *relay* em alocar adaptativamente os coeficientes de potência aos usuários, proporcionando mais robustez aos efeitos dos desvanecimentos.

3.5 Resumo do Capítulo

Neste capítulo, a seleção de *relays* e a alocação ótima de potência nos *relays* em um sistema *downlink* CFR-NOMA com múltiplos *relays* foi investigada. Os detalhes do modelo de sistema investigado foram fornecidos e o esquema de RS foi estendido para transmissão tipo FD. Em seguida, formulou-se um problema de otimização de potência para maximizar a taxa dos usuários e garantir justiça de taxa no sistema. Demonstrou-se que o problema de otimização é convexo e, como resultado, a solução ótima global foi derivada em forma fechada por intermédio das condições KKT. Os resultados de simulações numéricas foram apresentados e validaram a correteza do esquema proposto. Além disso, constatou-se que o esquema de alocação adaptativa de potência alcança desempenho superior em comparação com esquemas de alocação fixa e de seleção de *relays* convencionais. Os ganhos de desempenho foram comprovados em termos de taxa alcançável, probabilidade de *outage* e índice de justiça de taxa.

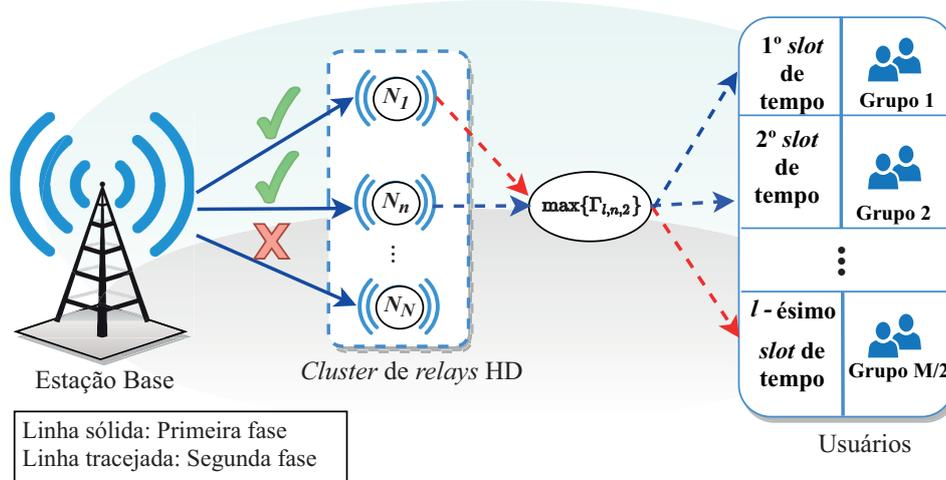
4 ALOCAÇÃO DE POTÊNCIA, SELEÇÃO DE *RELAY* E PAREAMENTO DE USUÁRIOS EM SISTEMAS CHR-NOMA

Este capítulo apresenta a segunda parte das contribuições desenvolvidas nesta dissertação. As investigações serão direcionadas para redes cooperativas NOMA com múltiplos usuários e múltiplos *relays* operando em modo HD com protocolo DF. Em suma, o capítulo está organizado da seguinte forma. A Seção 4.1 apresenta de forma resumida as principais contribuições deste capítulo. A Seção 4.2 descreve o modelo de sistema, bem como as principais considerações e detalhes do modelo empregado, um sistema CHR-NOMA com múltiplos *relays* e múltiplos usuários. A Seção 4.3 descreve o método conjunto de UP e de RS. Na Seção 4.4 investiga-se o problema de otimização de potência para maximizar a justiça de taxa por meio da alocação adaptativa dos coeficientes de potência na BS e nos *relays*. Os resultados de simulações numéricas juntamente com relevantes discussões são apresentados na Seção 4.5. E por fim, a Seção 4.6 expõe o resumo deste capítulo.

4.1 Contribuições

- Investigação de problemas relacionados à alocação dos coeficientes de potência na BS e nos *relays*, pareamento de usuários e seleção de *relay* em rede CHR-NOMA. Para cada fase do sistema cooperativo, políticas de alocação de potência são propostas para maximizar a justiça de taxa dos usuários com base nas CSI obtidas. Na primeira fase, deriva-se a solução de forma fechada para o problema de alocação dos coeficientes de potência na BS e um algoritmo que produz a solução ideal é desenvolvido. Na segunda fase, o problema de otimização é formulado nos *relays* e a solução ótima é derivada utilizando as condições de KKT.
- Proposição de um método conjunto de UP e de RS.
- Validação dos esquemas propostos por meio de resultados de simulação e comparação com outros esquemas convencionais de alocação de potência, UP e de RS.
- Relevantes discussões são fornecidas e demonstram a eficiência do esquema proposto em termos de probabilidade de *outage*, índice de justiça de Jain e taxa alcançável.

Figura 11 – Modelo de sistema CHR-NOMA com múltiplos *relays* e múltiplos usuários.



Fonte: elaborada pela autora.

4.2 Modelo do Sistema

O cenário considerado neste capítulo consiste em uma rede cooperativa NOMA com múltiplos usuários e múltiplos *relays* HD usando protocolo DF. Como ilustrado na Figura 11, o sistema é composto por uma BS, um *cluster* de N *relays* (N_n , com $n \in \mathcal{R} = \{1, \dots, N\}$), e M usuários (M_m , com $m \in \mathcal{M} = \{1, \dots, M\}$), com diferentes condições de canal. Sem perda de generalidade, supõe-se que o M é um número par. Devido ao severo desvanecimento associado ao sombreamento por obstáculos, considera-se que não há enlace direto entre a BS e os usuários. Além disso, considera-se que todos os nós são equipados com uma antena e que os usuários solicitam o mesmo serviço de tráfego, que requer um mínimo taxa de dados a ser fornecida de forma aceitável. Todos os canais exibem desvanecimento Rayleigh não-seletivo em frequência e são distorcidos por uma componente de AWGN de média zero e variância $\sigma^2 = 1$.

Como mostra a Figura 11, o processo de comunicação consiste basicamente em duas fases. Na primeira fase, a BS transmite para todos os *relays* a sobreposição dos sinais de todos os usuários usando SC. O sinal transmitido pela BS no t -ésimo *slot* de tempo é dado por

$$x(t) = \sum_{m=1}^M \sqrt{\omega_{n,m}} s_m(t) \quad (4.1)$$

em que $\omega_{n,m}$ denota os coeficientes de potência para o m -ésimo usuário no n -ésimo *relay*, que será otimizado depois, de tal modo que $\sum_{m=1}^M \omega_{n,m} = 1$ e $\omega_{n,m} > 0$, e $s_m(t)$ denota a mensagem de interesse do m -ésimo usuário. Então, todos os *relays* realizam a técnica SIC para decodificar as informações dos usuários. Especificamente, o n -ésimo *relay* primeiro decodifica os sinais do m -ésimo mais fraco tratando as mensagens dos k -ésimos usuários mais fortes como interferência,

$m < k$, e depois remove as mensagens decodificadas de sua observação de maneira sucessiva. Em outras palavras, a mensagem para o k -ésimo usuário, $k > m$, será tratada como ruído no n -ésimo *relay* quando a mensagem do m -ésimo usuário estiver sendo decodificada. O sinal recebido no n -ésimo *relay* é dado por

$$y_n(t) = \sqrt{P_s}|h_n|^2x(t) + \eta_{n,m}(t), \quad (4.2)$$

em que P_s representa a potência de transmissão da BS, $h_n \sim \mathcal{CN}(0, d_n^{-\psi})$ denota os coeficientes do canal entre a BS e o n -ésimo *relay*, em que $d_n^{-\psi}$ é a distância entre a BS e o n -ésimo *relay*, e ψ significa expoente de perda de percurso. A variável $\eta_{n,m}(t)$ denota a componente de AWGN. Baseado-se nesses detalhes, a SINR experimentada pelo n -ésimo *relay* referente à mensagem do m -ésimo usuário, $1 \leq m \leq (M - 1)$, pode ser expressa como

$$\gamma_{n,m} = \frac{\rho|h_n|^2\omega_{n,m}}{\rho|h_n|^2\sum_{k=m+1}^M\omega_{n,k} + 1}, \quad (4.3)$$

em que $\rho = P/\sigma^2$ denota a SNR de transmissão na BS. Por outro lado, a SNR experimentada pelo n -ésimo *relay* referente ao sinal do usuário com melhores condições de canal, ou seja, quando $m = M$, é dada por

$$\gamma_{n,m} = \rho|h_n|^2\omega_{n,m}. \quad (4.4)$$

A seguir será apresentada a política de UP e de RS desenvolvida neste capítulo.

4.3 Método de Pareamento de Usuários e de Seleção de Relay

Como já mencionado no Capítulo 1, as técnicas de UP têm se tornado atrativas para os sistemas NOMA, pois melhoram a confiabilidade dos usuários com piores condições de canal e melhor exploram as vantagens da SIC no usuário forte. Dessa forma, esquemas de UP são considerados uma chave para reduzir a complexidade e alcançar ganhos de capacidade em sistemas cooperativos NOMA. Neste capítulo, o esquema de UP é formulado para que usuários com condições de canal distintas sejam agrupados. Com esse objetivo, os usuários são classificados de acordo com suas respectivas condições de canal e, em seguida, o usuário mais fraco é agrupado com o mais forte. Os usuários selecionados são removidos e, entre os usuários remanescentes, seleciona-se o usuário mais fraco ao próximo usuário mais forte. Esta etapa é realizada até que não haja mais usuário para agrupar. Dessa maneira, pode-se garantir um balanceamento eficiente para melhorar consideravelmente o desempenho dos usuários mais

fracos. Ao final desse processo, um total de G_l grupos terão sido formados, $l \in \mathcal{G} = \{1, \dots, \frac{M}{2}\}$, com dois usuários por grupo ($U_{l,i}$), com $i \in \{1, 2\}$. Além disso, considera-se que a transmissão para os grupos é realizada em *slots* de tempo diferentes para evitar interferência entre grupos. Os coeficientes de canal referentes ao *link* $\mathcal{R} \rightarrow U_{l,i}$ são representados por $g_{l,n,m} \sim \mathcal{CN}(0, d_{l,n,m}^{-\Psi})$ em que $d_{l,n,m}^{-\Psi}$ denota a distância entre o n -ésimo *relay* e o m -ésimo usuário do l -ésimo grupo. Para cada grupo formado, os usuários são ordenados em ordem decrescente com base em seus respectivos ganhos de canal e nomeia-se o usuário mais forte do l -ésimo grupo como $U_{l,1}$ e o usuário mais fraco como $U_{l,2}$, ou seja, ($|g_{l,n,1}|^2 \geq |g_{l,n,2}|^2$). Com base nisso, o sinal recebido pelo i -ésimo usuário do l -ésimo grupo no t -ésimo *slot* de tempo, é dado por

$$y_{l,i}(t) = g_{l,n,i} \left(\sqrt{P_r} \alpha_{l,n,1} s_{l,1}(t) + \sqrt{P_r} \alpha_{l,n,2} s_{l,2}(t) \right) + \eta_{n,l}, \quad (4.5)$$

em que P_r é a potência de transmissão do *relay*, $\alpha_{l,n,i}$ denota o coeficiente de potência fornecido pelo n -ésimo *relay* para o i -ésimo usuário do l -ésimo grupo, tal que $\alpha_{l,n,1} + \alpha_{l,n,2} \leq 1$ e $\alpha_{l,n,1} < \alpha_{l,n,2}$. A variável $s_{l,i}(t)$ denota o sinal de interesse do i -ésimo usuário pertencente ao l -ésimo grupo e $\eta_{n,l}$ representa a componente de AWGN. Por questões de simplificação, assume-se que $P_s = P_r$.

Assim como o esquema de RS apresentado na Seção 3.2.1, o esquema de RS utilizado neste capítulo consiste em duas etapas. Entretanto, na última etapa o sistema pode selecionar um ou mais *relays* para auxiliar no processo de comunicação, de acordo com a necessidade de cada grupo. Especificamente, a primeira etapa de RS consiste em selecionar um conjunto de *relays* que conseguem decodificar corretamente a mensagem recebida. O conjunto é formulado como

$$\mathcal{S} = \left\{ n \in \mathcal{R}, \log_2(1 + \gamma_{n,m}) \geq \tilde{R} \right\}, \quad (4.6)$$

em que \tilde{R} denota taxa requerida pelos usuários. Uma vez que os usuários são pareados, os *relays* do conjunto \mathcal{S} decodificam simultaneamente os sinais usuários do l -ésimo grupo e transmitem o sinal sobreposto no t -ésimo *slot* de tempo baseando-se nos princípios da NOMA. Então, $U_{l,2}$ decodifica a sua mensagem tratando a mensagem de $U_{l,1}$ como ruído. Dessa forma, a SINR em $U_{l,2}$ pode ser expressa como

$$\Gamma_{l,n,2} = \frac{\rho \alpha_{l,n,2} |g_{l,n,2}|^2}{\rho \alpha_{l,n,1} |g_{l,n,2}|^2 + 1}. \quad (4.7)$$

Por outro lado, $U_{l,1}$ primeiramente decodifica a mensagem de $U_{l,2}$ e remove do sinal recebido. Portanto, a SINR experimentada por $U_{l,1}$ nesse processo é dada por

$$\Gamma_{l,n,1 \rightarrow 2} = \frac{\rho \alpha_{l,n,2} |g_{l,n,1}|^2}{\rho \alpha_{l,n,1} |g_{l,n,1}|^2 + 1}. \quad (4.8)$$

Se $U_{l,1}$ remove perfeitamente a mensagem de $U_{l,2}$ do sinal recebido, a SNR para detectar sua própria mensagem é dada por

$$\Gamma_{l,n,1} = \rho \alpha_{l,n,1} |g_{l,n,1}|^2. \quad (4.9)$$

A segunda etapa do método RS consiste em selecionar o *link relay*-destino entre os disponíveis no conjunto \mathcal{S} que maximiza a SINR do usuário mais fraco do l -ésimo grupo, ou seja,

$$n_l^* = \arg \max_{n \in \mathcal{S}} \{\Gamma_{l,n,1}\}, \quad (4.10)$$

como ilustrado na Figura 11. Vale mencionar que um *relay* pode ser escolhido por mais de um grupo. Com base nisso, a taxa alcançável para $U_{l,1}$ e $U_{l,2}$ são dadas, respectivamente, por

$$R_{l,1} = \log_2(1 + \Gamma_{l,n_l^*,1}), \quad (4.11)$$

e

$$R_{l,2} = \log_2(1 + \Gamma_{l,n_l^*,2}). \quad (4.12)$$

4.4 Alocação Adaptativa de Potência com Equidade de Taxa

Nesta seção, investigar-se-á a alocação dos coeficientes de potência $\omega_{n,m}$ e $\alpha_{n,l}$ para maximizar a taxa mínima entre os usuários bem como garantir a sua equidade. Dessa forma, para cada fase do sistema cooperativo um problema de otimização para a alocação dos fatores de potência será formulado.

4.4.1 Primeira Fase

O problema formulado na BS objetiva maximizar a mínima taxa entre os usuários, baseando-se em equidade de taxa. Com isso, a BS precisa alocar os coeficientes potência adaptativamente nas mensagens dos usuários que serão sobrepostas e encaminhadas para os *relays*.

4.4.1.1 Formulação e Solução do Problema de Otimização

A justiça de taxa pode ser alcançada por meio da alocação apropriada dos coeficientes de potência na mensagem sobreposta transmitida. Baseando-se na CSI obtida, o problema na BS

é formulado como

$$\max_{\omega_{n,m}} \min_{m \in \mathcal{M}} \left\{ \frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{n,m}) \right\}, \quad (4.13a)$$

restrito a

$$\sum_{m=1}^M \omega_{n,m} \leq 1, \quad (4.13b)$$

$$\omega_{n,m} \geq 0, \text{ for } n \in \mathcal{R} \text{ e } m \in \mathcal{M}. \quad (4.13c)$$

Ao analisar o problema (4.13), verifica-se que ele não é convexo pois a sua função objetivo não é convexa. Dessa forma, não é possível obter a solução ótima por meio de solucionadores de otimização padrão. Para contornar esse problema, o seguinte lema é formulado para verificar a quase-concavidade do problema considerado.

Lema 4.1: *O problema de otimização (4.13) é quase-côncavo.*

Demonstração. De acordo com [58], demonstrar a quase-concavidade de um problema é equivalente demonstrar que suas restrições são convexas e a sua função objetivo é quase-côncava. Inicialmente, pode-se ver que as restrições (4.13b) e (4.13c) são convexas devido as suas linearidades. Em seguida, para demonstrar que a função objetivo é quase-côncava todos os seus conjuntos de nível superior $\mathcal{K} = \{\omega_{n,m} | \min(\frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{n,m})) \geq r\}$ devem ser convexas para $r \in \mathbb{R}$. Depois de algumas manipulações algébricas, as restrições do conjunto \mathcal{K} podem ser reescritas como a seguinte desigualdade

$$\rho |h_n|^2 \omega_{n,m} \geq \beta \left(\rho |h_n|^2 \sum_{k=m+1}^M \omega_{n,k} + 1 \right), \quad (4.14)$$

em que $\beta = 2^{2r} - 1$. Com base em (4.14), verifica-se que os conjuntos de nível superior são convexas porque eles podem ser expressos como um conjunto convexo. Portanto, a função objetivo é quase-côncava. ■

Devido ao resultado obtido no lema 4.1, o problema (4.13) pode ser transformado em um problema de viabilidade convexa. Dessa forma, seja ε^* o valor ótimo do problema de otimização (4.13) para um dado $r > 0$, então

$$\text{Encontre } \omega_{n,m}, \text{ para } n \in \mathcal{R} \text{ e } m \in \mathcal{M}, \quad (4.15a)$$

restrito a

$$\sum_{m=1}^M \omega_{n,m} \leq 1, \quad (4.15b)$$

$$\omega_{n,m} \geq 0, \quad (4.15c)$$

$$\rho|h_n|^2 \omega_{n,m} \geq \beta \left(\rho|h_n|^2 \sum_{k=m+1}^M \omega_{n,k} + 1 \right). \quad (4.15d)$$

se o problema de viabilidade (4.15) for possível, então $\varepsilon^* \leq r$. Caso $\varepsilon^* > r$, logo o problema é inviável. Em outras palavras, equivale resolver o seguinte problema

$$\min_{\omega_n} \left\{ \sum_{m=1}^M \omega_{n,m} \right\}, \quad (4.16a)$$

restrito a

$$\omega_{n,m} \geq 0, \quad (4.16b)$$

$$\rho|h_n|^2 \omega_{n,m} \geq \beta \left(\rho|h_n|^2 \sum_{k=m+1}^M \omega_{n,k} + 1 \right), \quad (4.16c)$$

e conferir se a solução obtida para o problema (4.16) satisfaz a restrição (4.13b). Isso implica que, limitando adequadamente o valores de r a solução ótima para o problema (4.14) pode ser obtida a partir de um algoritmo. Com base nisso, formula-se o seguinte teorema para obter a expressão fechada dos coeficientes de potência do problema (4.16).

Teorema 4.1: *A solução ótima fechada para o problema (4.16) é dada por*

$$\omega_{n,m}^* = \frac{\beta}{\rho|h_n|^2} \left(\rho|h_n|^2 \sum_{k=m+1}^M \omega_{n,k} + 1 \right), \quad (4.17)$$

para $m = M, \dots, 1$.

Demonstração. Para verificar a existência de uma solução ótima, as condições de KKT são necessárias. Dessa forma, usando as condições de KKT obtêm-se as seguintes equações:

- Estacionariedade:

$$\nabla \mathcal{L}(\omega_{n,m}, \lambda_{n,m}, \delta_{n,m}) = 0. \quad (4.18a)$$

- Viabilidade primal:

$$\omega_{n,m} \rho|h_n|^2 \geq \beta \left(\rho|h_n|^2 \sum_{k=m+1}^M \omega_{n,k} + 1 \right), \quad (4.18b)$$

$$\omega_{n,m} \geq 0. \quad (4.18c)$$

- Viabilidade Dual:

$$\lambda_{n,m} \geq 0, \quad (4.18d)$$

$$\delta_{n,m} \geq 0. \quad (4.18e)$$

- Folga complementar:

$$\lambda_{n,m} \left(\beta(\rho|h_n|^2 \sum_{k=m+1}^M \omega_{n,k} + 1) - \omega_{n,m} \rho |h_n|^2 \right) = 0, \quad (4.18f)$$

$$\delta_{n,m} \omega_{n,m} = 0. \quad (4.18g)$$

em que $\lambda_{n,m}$ e $\delta_{n,m}$ são os os multiplicadores de Lagrange, e o símbolo ∇ denota o operador gradiente. A função Lagrangiana $\mathcal{L}(\cdot)$ correspondente ao problema de otimização (4.16) é dada por

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(\omega_{n,m}, \lambda_{n,m}, \delta_{n,m}) = & -\omega_{n,m} + \lambda_{n,m} \left(\beta(\rho|h_n|^2 \sum_{k=m+1}^M \omega_{n,k} + 1) - \rho|h_n|^2 \omega_{n,m} \right) \\ & + \delta_{n,m}(\omega_{n,m}). \end{aligned} \quad (4.19)$$

Com base em (4.19) e analisando a condição de estacionariedade, verifica-se que (4.18a) é estritamente positiva para todo $m \in \mathcal{M}$, que implica em $\lambda_{n,m} > 0$ e $\delta_{n,m} = 0$ devido a condição (4.18g). Similarmente, (4.18b) é estritamente positiva, implicando em $\omega_{n,m} > 0$ e $\delta_{n,m} = 0$. De acordo com (4.18f), (4.18g) e $\lambda_{n,m} > 0$, todas as restrições de (4.18b) devem ser iguais. Baseando-se nas condições supracitadas, a solução fechada para o problema de alocação dos coeficientes de potência $\omega_{n,m}$ depende somente da potência alocada para o usuário com melhores condições de canal ($m+1, \dots, M$). Dessa forma, demonstra-se que a expressão fechada para o problema (4.16) pode ser obtida por (4.17). ■

Através do método da bissecção e usando a expressão fechada (4.17), a solução ótima para o problema de otimização (4.13) na BS pode ser obtida no Algoritmo 1, apresentado no topo da próxima página. O algoritmo é calculado com uma precisão ζ e, como resultado, o coeficiente de potência para o m -ésimo usuário no n -ésimo *relay* alocado pela BS, capaz de maximizar a mínima taxa e garantir equidade de taxa entre os usuários são encontrados.

4.4.2 Segunda Fase

Após concluir o processo de UP, o problema de otimização dos coeficientes de potência nos *relays* do conjunto \mathcal{S} é formulado e o coeficiente de potência para o i -ésimo usuário do l -ésimo grupo é encontrado.

Algoritmo 1: Alocação dos coeficientes de potência na BS para o m -ésimo usuário no n -ésimo relay.

```

início
  para  $n = 1 : N$  faça
    Defina  $r_{LB} = 0$ ;
    Defina  $r_{UB} = \frac{1}{2} \log_2(1 + \rho |h_M|^2)$ ;
    enquanto  $(r_{UB} - r_{LB}) \geq \zeta$  faça
      Defina  $r = (r_{UB} + r_{LB})/2$ 
      Obtenha  $\omega_{n,m}^*$  em (4.17);
      se  $\sum_{m=1}^M \omega_{n,m}^* \leq 1$  então
         $r_{LB} = r$ ;
         $\varepsilon^* = r$ ;
         $\omega_{n,m} = \omega_{n,m}^*$ ;
      senão
         $r_{UB} = r$ ;
      fim
    fim
  Substitua  $\omega_{n,m}$  em (4.3);
fim

```

4.4.2.1 Formulação e Solução do Problema de Otimização

O problema deve ser formulado para que a mínima taxa entre os usuários seja maximizada, de forma que a equidade de taxa entre os usuários de um mesmo grupo seja obtida. Esses objetivos podem ser alcançados através da alocação correta dos coeficientes de potência para cada usuário. Dessa forma, os relays pertencentes ao conjunto \mathcal{S} devem alocar adaptativamente a potência para o usuário forte ($U_{l,1}$) e para o usuário fraco ($U_{l,2}$) do l -ésimo grupo. Como cada grupo é composto por dois usuários, a solução ótima obtida na Seção 3.3.2 pode ser reformulada e implementada no cenário investigado neste capítulo. O problema de otimização dos coeficientes de potência para o cenário considerado pode ser expresso por

$$\max_{\alpha_{l,n,1}, \alpha_{l,n,2}} \left\{ \min \left(\frac{1}{2} \log_2(1 + \Gamma_{l,n,1}), \frac{1}{2} \log_2(1 + \Gamma_{l,n,2}) \right) \right\}, \quad (4.20a)$$

restrito a

$$\alpha_{l,n,1} + \alpha_{l,n,2} = 1, \quad (4.20b)$$

$$\alpha_{l,n,1} \geq 0 \text{ e } \alpha_{l,n,2} \geq 0. \quad (4.20c)$$

Seguindo a mesma linha de raciocínio para a formulação do problema de otimização

apresentado no Capítulo 3, o problema (4.20) deve ser formulado para que a potência aplicada ao usuário mais forte do grupo l -ésimo grupo deve ser suficiente para garantir o sucesso na SIC. Dessa forma, o problema (4.20) pode ser expresso como

$$\max_{\alpha_{l,n,1}, \alpha_{l,n,2}} \left\{ \frac{1}{2} \log_2(1 + \Gamma_{l,n,1}) \right\}, \quad (4.21a)$$

restrito a

$$\alpha_{l,n,1} + \alpha_{l,n,2} = 1, \quad (4.21b)$$

$$\alpha_{l,n,1} \geq 0 \text{ e } \alpha_{l,n,2} \geq 0, \quad (4.21c)$$

$$\frac{1}{2} \log_2(1 + \Gamma_{l,n,1}) \leq \frac{1}{2} \log_2(1 + \Gamma_{l,n,2}). \quad (4.21d)$$

Devido a função $\log(\cdot)$ ser monotonicamente crescente e a partir de algumas manipulações algébricas, a restrição (4.21d) pode ser escrita como

$$\rho \alpha_{l,n,1} |g_{l,n,1}|^2 (\rho \alpha_{l,n,1} |g_{l,n,2}|^2 + 1) \leq \rho \alpha_{l,n,2} |g_{l,n,2}|^2. \quad (4.22)$$

Como a potência fornecida para $U_{l,1}$ deve ser somente o necessário para realizar a SIC, enquanto a potência restante é toda alocada para $U_{l,2}$, logo $\alpha_{l,n,2} = 1 - \alpha_{l,n,1}$. Dessa forma, a condição (4.22) pode ser reescrita como

$$\rho^2 |g_{l,n,1}|^2 |g_{l,n,2}|^2 \alpha_{l,n,1}^2 + \rho (|g_{l,n,1}|^2 + |g_{l,n,2}|^2) \alpha_{l,n,1} - \rho |g_{l,n,2}|^2 \leq 0. \quad (4.23)$$

Substituindo (4.9) em (4.21a) e utilizando (4.23), o problema (4.21) é reescrito como

$$\max_{\alpha_{l,n,1}} \left\{ \frac{1}{2} \log_2(1 + \rho \alpha_{l,n,1} |g_{l,n,1}|^2) \right\}, \quad (4.24a)$$

restrito a

$$\alpha_{l,n,1} \geq 0, \quad (4.24b)$$

$$\rho^2 |g_{l,n,1}|^2 |g_{l,n,2}|^2 \alpha_{l,n,1}^2 + \rho (|g_{l,n,1}|^2 + |g_{l,n,2}|^2) \alpha_{l,n,1} - \rho |g_{l,n,2}|^2 \leq 0. \quad (4.24c)$$

Usando fato que $\frac{1}{2} \log_2(1 + \rho \alpha_{l,n,1} |g_{l,n,1}|^2)$ aumenta monotonicamente com $\alpha_{l,n,1}$, o problema (4.24) pode ser reduzido para um problema de otimização de somente $\alpha_{l,n,1}$, como segue

$$\min_{\alpha_{l,n,1}} \{ \alpha_{l,n,1} \}, \quad (4.25a)$$

restrito a

$$- \alpha_{l,n,1} \leq 0, \quad (4.25b)$$

$$\rho^2 |g_{l,n,1}|^2 |g_{l,n,2}|^2 \alpha_{l,n,1}^2 + \rho (|g_{l,n,1}|^2 + |g_{l,n,2}|^2) \alpha_{l,n,1} - \rho |g_{l,n,2}|^2 \leq 0, \quad (4.25c)$$

que foi convertido para a forma padrão.

A solução ótima para o problema de otimização (4.25), que maximiza a mínima taxa alcançável e garante justiça de taxa entre os usuários de um mesmo grupo, é dada no seguinte teorema.

Teorema 4.1: *O coeficiente de potência ótimo alocado pelo n -ésimo relay para o usuário forte e para o usuário fraco do l -ésimo grupo é dado, respectivamente, por*

$$\alpha_{l,n,1} = \frac{-\left(\rho(|g_{l,n,1}|^2 + |g_{l,n,2}|^2)\right) + \sqrt{\left(\rho(|g_{l,n,1}|^2 + |g_{l,n,2}|^2)\right)^2 + 4\left(\rho^3|g_{l,n,1}|^2|g_{l,n,2}|^4\right)}}{2(\rho^2|g_{l,n,1}|^2|g_{l,n,2}|^2)}, \quad (4.26)$$

e

$$\alpha_{l,n,2} = 1 - \alpha_{l,n,1}, \quad (4.27)$$

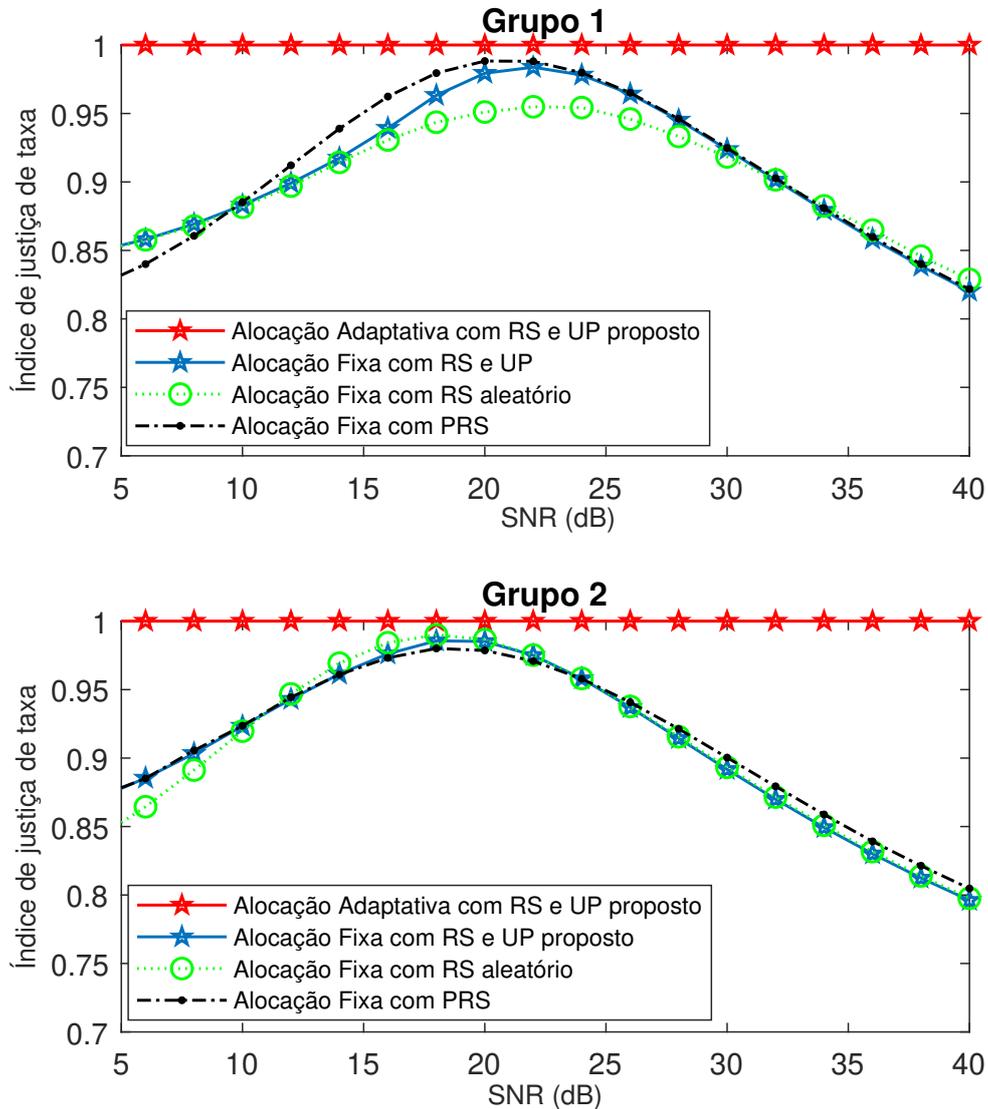
para $n \in \mathcal{S}$ e $l \in \mathcal{G}$.

Demonstração. A prova do Teorema 4.1 é semelhante à demonstração do Teorema 3.1. ■

4.5 Resultados de Simulação e Discussões

Esta seção fornece os resultados de simulações para discutir e avaliar o desempenho dos métodos propostos. Foram realizadas extensas simulações de Monte Carlo com 10^5 iterações. Nas simulações, assume-se que a taxa requerida pelos usuários é de $\tilde{R} = 0,5$ BPCU, o expoente de perda de percurso é de $\psi = 2$, a potência de transmissão é configurada em $P_s = P_r = 1$ W, acurácia desejada para o algoritmo é de $\zeta = 10^{-4}$ e a distância entre a BS e o *cluster* de relays é $d_n = 1$ m. Os usuários são aleatoriamente distribuídos em um disco com diâmetro 1 m cujo centro está localizado a 2 m do *cluster* de relays. Quando na análise comparativa utiliza-se alocação fixa de potência, os valores dos coeficientes de potência empregados pela BS na primeira fase são $\omega_{n,1} = 0,52$, $\omega_{n,2} = 0,25$, $\omega_{n,3} = 0,13$, e $\omega_{n,4} = 0,1$, tal que $\sum_{m=1}^M \omega_{n,m} = 1$. Vale ressaltar que, realizar a alocação fixa na primeira fase para $M > 4$ é uma tarefa muito complicada, pois é necessário ter que definir os coeficientes de potência manualmente de forma que a taxa exigida por todos os usuários seja alcançada. Na segunda fase com alocação fixa de potência, assume-se $\alpha_{l,n,1} = 0,2$ e $\alpha_{l,n,2} = 0,8$.

Figura 12 – Índice de Jain em função da SNR de transmissão para $N = 2$ relays e $M = 4$ usuários.



Fonte: elaborada pela autora.

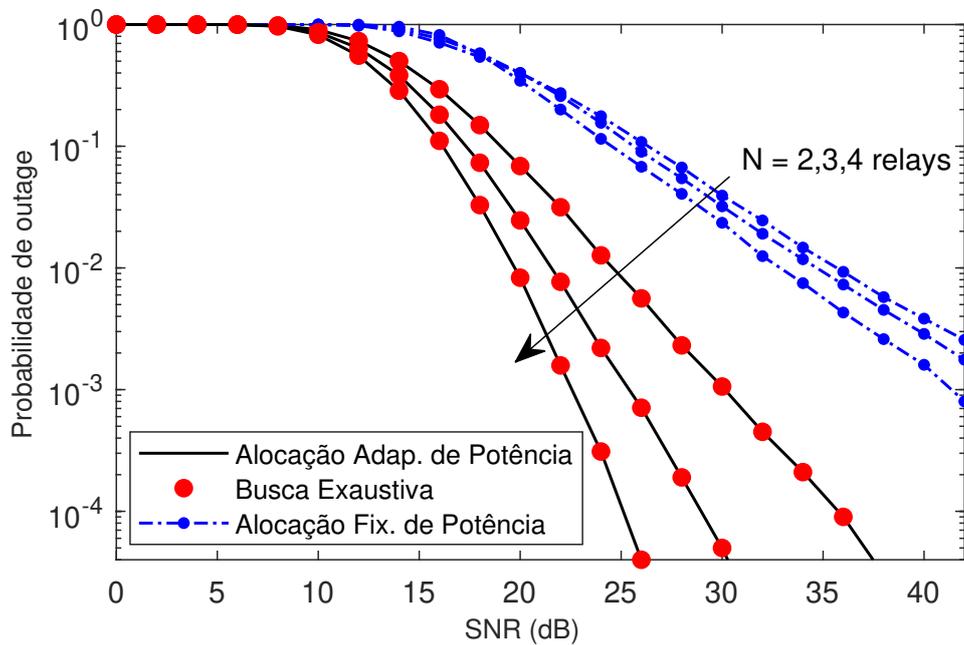
A análise de desempenho dos esquemas propostos é realizada em termos de probabilidade de *outage*, índice de justiça de taxa e taxa alcançável. Como cada grupo é formado por dois usuários, então o índice de justiça de Jain é expresso semelhante ao de (3.28). Portanto, para o l -ésimo grupo o índice de justiça de taxa é formulado como [59]

$$J_l = \frac{(R_{l,1} + R_{l,2})^2}{2[(R_{l,1})^2 + (R_{l,2})^2]}, \quad (4.28)$$

cujos intervalos são $[1/2, 1]$.

Na Figura 12, a relação entre a justiça na alocação de recursos e a SNR de transmissão para cada grupo de usuários é investigada. Como referência de desempenho foram utilizados o esquema de RS aleatório e o PRS [32]. Todos eles foram simulados com alocação fixa de

Figura 13 – Probabilidade de *outage* em função da SNR de transmissão para diferentes números de *relays* e com $M = 4$ usuários.



Fonte: elaborada pela autora.

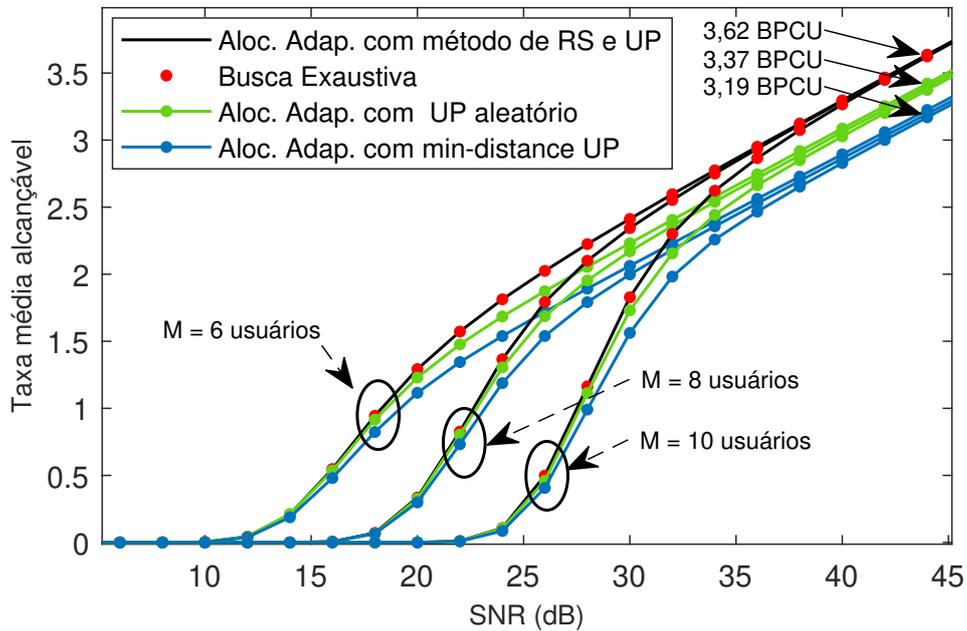
potência e com o esquema proposto de UP. Além disso, investiga-se o desempenho da política conjunta de RS e UP quando a alocação fixa é aplicada na BS e nos *relays*. O esquema de alocação adaptativa da primeira fase fornece para cada usuário uma parcela de potência de forma que a mínima taxa entre eles seja maximizada e que alcancem equidade de taxa nos *relays*, enquanto o esquema de alocação adaptativa da segunda fase, uma vez feito o UP, permite adaptar os coeficientes de potência para garantir SIC perfeita para o usuário com melhores condições de canal e maximizar a taxa dos usuários com o piores condições de canal de cada grupo. Além disso, o método de alocação adaptativa garante que todos os usuários do mesmo grupo sejam atendidos igualmente durante todo o processo de comunicação. O desempenho dos esquemas comparativos foram semelhantes no grupo 2, pois o grupo é composto por dois usuários com ganho de canal intermediário. O nível de justiça de taxa fornecidos pelos métodos convencionais é desfavorável, principalmente para valores altos de SNR. Por outro lado, o esquema proposto alcança o nível máximo de justiça para todos os valores de SNR de transmissão. A estratégia desenvolvida favorece todos os usuários do sistema, garantindo que a BS e os *relays* forneçam os recursos de potência necessários para permitir equidade de taxa e, ao mesmo tempo, maximizar a mínima taxa alcançável dos usuários.

A Figura 13 apresenta as curvas da probabilidade de *outage* do sistema para $M = 4$ usuários em função da SNR de transmissão quando varia-se o número de *relays*. O desempenho

do esquema proposto de alocação adaptativa na BS e nos *relays* é comparado com a solução obtida por busca exaustiva e com o esquema de alocação fixa. Para todos os esquemas analisados, utilizou-se a política proposta de RS e UP. Observa-se que o esquema adaptativo proposto corresponde à solução ótima obtida por busca exaustiva, verificando que a solução obtida neste capítulo é ótima. É importante notar que além dos benefícios de equidade de taxa, o esquema proposto de alocação adaptativa alcança consideravelmente melhor desempenho em termos de *outage* do sistema quando comparado ao método de alocação fixa. A diferença de desempenho entre o esquema de alocação adaptativa proposto e o esquema de alocação fixa demonstra a importância de empregar técnicas de otimização de potência em redes cooperativas NOMA de múltiplos *relays* e múltiplos usuários. Por exemplo, para SNR de 30 dB e $N = 3$, pode-se notar que o evento de *outage* ocorre com uma probabilidade de $3,2 \times 10^{-2}$ para alocação fixa, enquanto que com alocação adaptativa, o evento de *outage* do sistema ocorre com uma probabilidade de 5×10^{-5} . Os ganhos de desempenho obtidos pelo sistema com alocação adaptativa são bem mais notáveis. Esse resultado está relacionado com o método de balanceamento adaptativo dos coeficientes de potência para os usuários do sistema, pois são calculados para garantir que todos os usuários estejam satisfeitos com o serviço de tráfego fornecido. Portanto, um sistema com alocação adaptativa permite conectividade com mais usuários e, com isso, satisfazer alguns dos requisitos das redes B5G. Além disso, como já esperado, quando o número de *relays* aumenta, a probabilidade de *outage* diminui. Com essa análise, nota-se mais uma vez a superioridade do esquema proposto, dado que a diferença de desempenho entre o método adaptativo e o método fixo ao aumentar o número de *relays* é notavelmente maior. Uma outra observação é que o esquema proposto fornece uma ordem de diversidade igual ao número de *relays*.

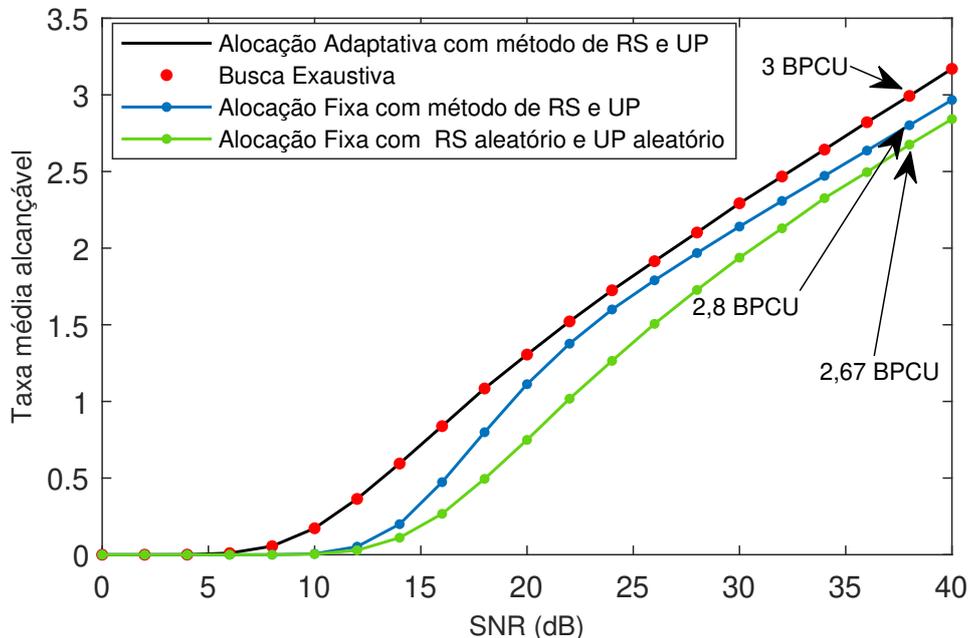
A Figura 14 apresenta a taxa média alcançável do sistema *versus* a SNR. Para a análise de desempenho, realiza-se a comparação entre o esquema de UP proposto, pareamento aleatório e o pareamento com base na distância mínima entre os usuários, onde os usuários são agrupados com o vizinho mais próximo. Todos eles foram simulados com o esquema de alocação adaptativa de potência e RS proposto. O esquema de UP proposto fornece melhorias significativas de desempenho em comparação com todos os esquemas de referência simulados para valores intermediários e altos de SNR. Esse melhor desempenho advém do fato de que o método de UP proposto poder selecionar os pares explorando as vantagens de seus respectivos canais, evitando que o usuário intermediário seja agrupado com um usuário mais forte ou com o usuário mais fraco. Dessa maneira, mais potência pode ser alocada aos usuários mais fracos para

Figura 14 – Taxa média alcançável (BPCU) em função da SNR de transmissão para diferentes números de usuários e com $N = 4$ relays.



Fonte: elaborada pela autora.

Figura 15 – Taxa média alcançável (BPCU) do sistema em função da SNR para $N = 2$ relays e com $M = 4$ usuários.



Fonte: elaborada pela autora.

maximizar a taxa mínima e garantir o nível máximo de justiça da taxa.

A Figura 15 fornece a comparação de desempenho da taxa de transferência média alcançável dos usuários da rede. Como referência de desempenho, o esquema proposto de

alocação adaptativa de potência é comparado com os resultados obtidos por busca exaustiva e esquema de alocação fixa de potência. Para o esquema de alocação fixa, em um momento utiliza-se a política conjunta de UP e RS e, em outro momento, utiliza-se o esquema aleatório de UP e de RS. Pode-se ver pela figura, que para todos os valores de SNR o método adaptativo alcança melhor desempenho de taxa. Por outro lado, no esquema de alocação fixa a alocação é feita manualmente sem considerar as necessidades dos usuários e, como consequência, recursos de potência desnecessários podem ser fornecidos para um usuário forte. A diferença de desempenho entre a alocação adaptativa e a alocação fixa demonstra a importância da alocação adaptativa dos coeficientes de potência para que os recursos de potência sejam utilizados com eficiência e para garantir máxima justiça de taxa entre os usuários. Além disso, os resultados do esquema proposto coincide com os resultados obtidos por busca exaustiva, demonstrando mais uma vez que a solução obtida neste capítulo é ótima. Ademais, a lacuna entre as curvas de desempenho da política conjunta de RS e UP, e das curvas de desempenho da política que não utiliza o método proposto comprova, mais uma vez, a superioridade do esquema proposto.

4.6 Resumo do Capítulo

Neste capítulo foram propostas políticas de alocação dos coeficientes de potência, UP e RS em sistemas cooperativo NOMA de múltiplos *relays* HD e múltiplos usuários. Para cada fase do sistema cooperativo, um problema de otimização de potência foi formulado para maximizar a taxa mínima alcançável e garantir a justiça entre os usuários. Primeiramente, o problema de otimização original quase-côncavo foi convertido em problemas de otimização de viabilidade convexa e, com base no procedimento da bisseção, um algoritmo que retorna os coeficientes ótimos de potência fornecidos pela BS foi desenvolvido. Uma vez concluído o UP, o problema de alocação adaptativa de potência é formulado nos *relays*. Em forma fechada, o coeficiente ótimo de potência fornecido pelos *relays* para cada usuário do l -ésimo grupo é obtido. Usando os coeficientes de potência derivados, selecionou-se o *relay* que fornece a melhor SINR para cada grupo de usuários. Dessa forma, um mesmo *relay* pode ser escolhido por mais de um grupo. Os resultados da simulação mostraram que as políticas propostas para alocação de potência, UP e RS alcançam melhor desempenho em comparação com esquemas convencionais de alocação fixa de potência, UP e RS.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A tecnologia NOMA ganhou notoriedade por fornecer atrativas vantagens às redes de comunicações móveis, tais como alta eficiência espectral, robustez à alta mobilidade, conectividade massiva e eficiência energética. Dentre essas e outras vantagens, a NOMA consolidou-se como uma tecnologia essencial para atender aos requisitos ambiciosos das redes além da quinta geração (B5G). A boa compatibilidade da NOMA com outras técnicas permitiu que junção dos recursos da NOMA e das comunicações cooperativas promovesse melhorias ainda mais significativas aos sistemas sem fio, proporcionando ganhos em termos de cobertura, latência, justiça e capacidade, que são considerados recursos essenciais para solucionar algumas das principais demandas dos sistemas e aplicações das redes B5G. Inicialmente, nesta dissertação foi realizado um estudo sobre NOMA e comunicações cooperativas, em que foram descritos as principais características e o grande potencial de desempenho ao combinar as duas tecnologias. Com base nisso, realizou-se um levantamento bibliográfico sobre as principais estratégias propostas por pesquisadores em relação às redes cooperativas NOMA. A partir desse estudo, notou-se a necessidade de propor estratégias conjunta de seleção de *relays* (RS), pareamento de usuários (UP) e alocação de potência. Visando melhorar ainda mais o desempenho de redes cooperativas NOMA e contornar os fortes efeitos do desvanecimento, nesta dissertação foram estudados e desenvolvidos métodos eficientes de RS, de UP e de alocação dos coeficientes de potência para redes cooperativas NOMA.

Especificamente, as principais contribuições deste trabalho foram divididas em dois capítulos. No Capítulo 3, analisou-se um sistema *downlink* CFR-NOMA com múltiplos *relays* e dois usuários. Com base em justiça, formulou-se um método de RS e um problema de otimização para a alocação dos coeficientes de potência nos *relays*. Em particular, a alocação dos coeficientes de potência foi formulada para que os *relays* distribuam adaptativamente a potência entre os usuários com o objetivo de maximizar a mínima taxa alcançável e, ao mesmo tempo, garantir equidade de taxa no sistema. Verificou-se que o problema de otimização é convexo e, por intermédio das condições de KKT, analiticamente a solução ótima em forma fechada para o problema de alocação de potência foi derivada. A corretude do esquema proposto foi validada ao comparar a solução ótima obtida nesta dissertação com os resultados de simulação obtidos através de busca exaustiva, que retorna a solução ótima em troca de grande complexidade computacional. A estratégia proposta garante justa alocação dos recursos de potência entre todos os usuários do sistema, proporcionando mais robustez aos efeitos dos desvanecimentos e beneficiando o usuário

mais fraco. Além disso, comparando os esquemas de alocação adaptativa de potência e de RS propostos com esquemas de alocação fixa e de RS convencionais, verificou-se a superioridade das estratégias propostas em termos de probabilidade de *outage*, taxa alcançável e índice de justiça de taxa. No Capítulo 4, projetou-se um sistema *downlink* CHR-NOMA com múltiplos *relays* e múltiplos usuários. Para cada fase do sistema cooperativo um problema de otimização dos coeficientes de potência foi formulado. Na primeira fase, formulou-se o problema na BS para garantir equidade de taxa entre os usuários logo no primeiro salto. Em seguida, demonstrou-se que o problema considerado é quase-côncavo. Com base nisso, a expressão fechada dos coeficientes de potência foi derivada e utilizando o método da bisseção foi desenvolvido um algoritmo que retorna a solução ótima para a alocação de potência na BS. Na segunda fase, correspondente ao processo de retransmissão das informações pelos *relays*, o primeiro estágio do método de RS foi empregado e, em seguida, o agrupamento dos usuários foi executado. Após o agrupamento, um problema de otimização de potência foi formulado nos *relays*. Utilizando as condições de KKT, o coeficiente ótimo de potência fornecido pelo *relays* para cada grupo de usuários foi obtido em forma fechada. Por fim, para cada grupo de usuário selecionou-se o *relays* que maximiza a SINR do usuário mais fraco, que devido à alocação adaptativa de potência alcança valores iguais ao do usuário mais forte. Os resultados de simulação foram apresentados e significantes discussões foram fornecidas, demonstrando a eficiência da estratégia conjunta de RS, UP e de alocação adaptativa de potência. Especificamente, os resultados demonstram que a combinação de usuários com condições distintas de canal e a seleção de *relays* para servir grupos distintos gera um ganho significativo na taxa alcançável do usuário mais fraco e, como consequência, melhora a taxa média alcançável do sistema. Além disso, com a alocação ótima de potência foi possível maximizar a justiça de taxa do sistema e aumentar o número de usuários conectados à rede. Ao comparar os resultados da estratégia proposta com esquemas convencionais, ficou claro a superioridade da estratégias de RS, de UP e de alocação adaptativa de potência desenvolvidas nesta dissertação, o que as tornam atraentes para aplicações e serviços que exigem um desempenho aprimorado em termos de capacidade de usuários, latência, confiabilidade, cobertura e eficiência espectral.

Apesar deste trabalho apresentar importantes estratégias para redes cooperativas NOMA, muitas questões abertas ainda precisam ser abordadas. Com base nisso, algumas sugestões que possuem forte potencial para trabalhos futuros são destacadas a seguir.

- Análise das estratégias propostas sob condições de SIC imperfeita.

- Implementação técnicas de colheita de energia no cenário cooperativo para contornar às restrições práticas de energia nos *relays*, como por exemplo a transferência de energia e informação sem fio simultâneas (do inglês, *Simultaneous Wireless Information and Power Transfer* (SWIPT)).
- Proposição de técnicas de cancelamento de interferência entre os grupos para que *relays* do tipo FD sejam implementados no cenário com múltiplos usuários para melhorar ainda mais a eficiência espectral do sistema.
- Redução da sobrecarga devido à complexidade da implementação em termos de pareamento de usuário, decodificação dos sinais e aquisição de CSI, por meio da implementação de métodos de transmissão de baixa complexidade, tal como o esquema de solicitação de repetição automática híbrida (do inglês, *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ)).

REFERÊNCIAS

- [1] M. Jaber, M. A. Imran, R. Tafazolli, and A. Tukmanov, “5g backhaul challenges and emerging research directions: A survey,” *IEEE Access*, vol. 4, pp. 1743–1766, 2016.
- [2] T. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed. USA: Prentice Hall PTR, 2001.
- [3] M. A. M. Albreem, “5g wireless communication systems: Vision and challenges,” in *2015 International Conference on Computer, Communications, and Control Technology (I4CT)*, 2015, pp. 493–497.
- [4] J. A. del Peral-Rosado, R. Raulefs, J. A. López-Salcedo, and G. Seco-Granados, “Survey of cellular mobile radio localization methods: From 1g to 5g,” *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 20, no. 2, pp. 1124–1148, 2018.
- [5] G. A. Akpakwu, B. J. Silva, G. P. Hancke, and A. M. Abu-Mahfouz, “A survey on 5g networks for the internet of things: Communication technologies and challenges,” *IEEE Access*, vol. 6, pp. 3619–3647, 2018.
- [6] L. Chettri and R. Bera, “A comprehensive survey on internet of things (iot) toward 5g wireless systems,” *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 7, no. 1, pp. 16–32, 2020.
- [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] P. Wang, J. Xiao, and L. Ping, “Comparison of orthogonal and non-orthogonal approaches to future wireless cellular systems,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 1, no. 3, pp. 4–11, 2006.
- [9] Y. Liu, Z. Qin, M. ElKashlan, Z. Ding, A. Nallanathan, and L. Hanzo, “Non-orthogonal multiple access for 5g and beyond,” 2018.
- [10] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, and K. Higuchi, “Non-orthogonal multiple access (noma) for cellular future radio access,” *IEEE 77th Veh. Technol. Conf.*, pp. 1–5, 2013.

- [11] H. Lee, S. Kim, and J. Lim, "Multiuser superposition transmission (must) for lte-a systems," in *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2016, pp. 1–6.
- [12] Z. Ding, Y. Liu, J. Choi, Q. Sun, M. ElKashlan, I. Chih-Lin, and H. V. Poor, "Application of non-orthogonal multiple access in lte and 5g networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 2, pp. 185–191, 2017.
- [13] S. M. R. Islam, N. Avazov, O. A. Dobre, and K. Kwak, "Power-domain non-orthogonal multiple access (noma) in 5g systems: Potentials and challenges," *IEEE Communications Surveys Tutorials*, vol. 19, no. 2, pp. 721–742, 2017.
- [14] 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.
- [15] J. N. Laneman, D. N. C. Tse, and G. W. Wornell, "Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, 2004.
- [16] A. Nosratinia, T. E. Hunter, and A. Hedayat, "Cooperative communication in wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 74–80, 2004.
- [17] A. S. Ibrahim, A. K. Sadek, W. Su, and K. J. R. Liu, "Cooperative communications with relay-selection: when to cooperate and whom to cooperate with?" *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 7, pp. 2814–2827, 2008.
- [18] Z. Ding, M. Peng, and H. V. Poor, "Cooperative non-orthogonal multiple access in 5g systems," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 19, no. 8, pp. 1462–1465, 2015.
- [19] J. Men and J. Ge, "Performance analysis of non-orthogonal multiple access in downlink cooperative network," *IET Communications*, vol. 9, no. 18, pp. 2267–2273, 2015.
- [20] D. Wan, M. Wen, F. Ji, H. Yu, and F. Chen, "Non-orthogonal multiple access for cooperative communications: Challenges, opportunities, and trends," *IEEE Wireless Communications*, vol. 25, no. 2, pp. 109–117, 2018.
- [21] T. Yazaki and Y. Sanada, "Effect of joint detection and decoding in non-orthogonal multiple access," in *2014 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems (ISPACS)*, 2014, pp. 245–250.

- [22] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, C. I, and Z. Wang, “Non-orthogonal multiple access for 5g: solutions, challenges, opportunities, and future research trends,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 53, no. 9, pp. 74–81, 2015.
- [23] Z. Ding, P. Fan, and H. V. Poor, “Impact of user pairing on 5g nonorthogonal multiple-access downlink transmissions,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 8, pp. 6010–6023, 2016.
- [24] N. Otao, Y. Kishiyama, and K. Higuchi, “Performance of non-orthogonal access with sic in cellular downlink using proportional fair-based resource allocation,” in *2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, 2012, pp. 476–480.
- [25] S. Timotheou and I. Krikidis, “Fairness for non-orthogonal multiple access in 5g systems,” *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 22, no. 10, pp. 1647–1651, 2015.
- [26] Z. Ding, H. Dai, and H. V. Poor, “Relay selection for cooperative noma,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 5, no. 4, pp. 416–419, 2016.
- [27] J. Kim and I. Lee, “Capacity analysis of cooperative relaying systems using non-orthogonal multiple access,” *IEEE Communications Letters*, vol. 19, no. 11, pp. 1949–1952, 2015.
- [28] C. Zhong and Z. Zhang, “Non-orthogonal multiple access with cooperative full-duplex relaying,” *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 12, pp. 2478–2481, 2016.
- [29] L. Zhang, J. Liu, M. Xiao, G. Wu, Y. Liang, and S. Li, “Performance analysis and optimization in downlink noma systems with cooperative full-duplex relaying,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 35, no. 10, pp. 2398–2412, 2017.
- [30] Z. Yang, Z. Ding, Y. Wu, and P. Fan, “Novel relay selection strategies for cooperative noma,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 11, pp. 10 114–10 123, 2017.
- [31] P. Xu, Z. Yang, Z. Ding, and Z. Zhang, “Optimal relay selection schemes for cooperative noma,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 8, pp. 7851–7855, 2018.
- [32] S. Lee, D. B. da Costa, Q. Vien, T. Q. Duong, and R. T. de Sousa, “Non-orthogonal multiple access schemes with partial relay selection,” *IET Communications*, vol. 11, no. 6, pp. 846–854, 2017.

- [33] D. Deng, D. Zou, Y. Rao, X. Li, and K. Yu, "Relay selection for cooperative noma system over correlated fading channel," *Physical Communication*, vol. 35, 04 2019.
- [34] Z. Yang, Z. Ding, P. Fan, and N. Al-Dhahir, "The impact of power allocation on cooperative non-orthogonal multiple access networks with swipt," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 7, pp. 4332–4343, 2017.
- [35] X. Chen, G. Liu, Z. Ma, X. Zhang, W. Xu, and P. Fan, "Optimal power allocations for non-orthogonal multiple access over 5g full/half-duplex relaying mobile wireless networks," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 1, pp. 77–92, 2019.
- [36] A. Gupta, S. Biswas, K. Singh, T. Ratnarajah, and M. Sellathurai, "An energy-efficient approach towards power allocation in non-orthogonal multiple access full-duplex af relay systems," in *2018 IEEE 19th International Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications (SPAWC)*, 2018, pp. 1–5.
- [37] J. Choi, "Power allocation for max-sum rate and max-min rate proportional fairness in noma," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 10, pp. 2055–2058, 2016.
- [38] Z. Shen, G. Liu, Z. Ding, M. Xiao, Z. Ma, and F. R. Yu, "Optimal power allocations for 5g non-orthogonal multiple access with half x002f;full duplex relaying," in *ICC 2019 - 2019 IEEE Int. Conf. Commun. (ICC)*, 2019, pp. 1–7.
- [39] S. Xie, "Power allocation scheme for downlink and uplink noma networks," *IET Commun.*, vol. 13, no. 15, pp. 2336–2343, 2019.
- [40] Z. Q. Al-Abbasi and D. K. C. So, "User-pairing based non-orthogonal multiple access (noma) system," in *2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2016, pp. 1–5.
- [41] J. Mei, L. Yao, H. Long, and K. Zheng, "Joint user pairing and power allocation for downlink non-orthogonal multiple access systems," in *2016 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2016, pp. 1–6.
- [42] L. Zhu, J. Zhang, Z. Xiao, X. Cao, and D. O. Wu, "Optimal user pairing for downlink non-orthogonal multiple access (noma)," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 2, pp. 328–331, 2019.

- [43] W. Liang, Z. Ding, Y. Li, and L. Song, "User pairing for downlink non-orthogonal multiple access networks using matching algorithm," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 12, pp. 5319–5332, 2017.
- [44] J. Zhang, X. Tao, H. Wu, and X. Zhang, "Performance analysis of user pairing in cooperative noma networks," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 74 288–74 302, 2018.
- [45] T. Cover, "Broadcast channels," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 18, no. 1, pp. 2–14, 1972.
- [46] P. Bergmans, "Random coding theorem for broadcast channels with degraded components," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 19, no. 2, pp. 197–207, 1973.
- [47] T. M. Cover and J. A. Thomas, *Elements of Information Theory (Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing)*. USA: Wiley-Interscience, 2006.
- [48] S. Vanka, S. Srinivasa, Z. Gong, P. Vizi, K. Stamatiou, and M. Haenggi, "Superposition coding strategies: Design and experimental evaluation," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 7, pp. 2628–2639, 2012.
- [49] W. Shin, M. Vaezi, B. Lee, D. J. Love, J. Lee, and H. V. Poor, "Non-orthogonal multiple access in multi-cell networks: Theory, performance, and practical challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 55, no. 10, pp. 176–183, 2017.
- [50] 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.
- [51] Q. Li, R. Q. Hu, Y. Qian, and G. Wu, "Cooperative communications for wireless networks: techniques and applications in lte-advanced systems," *IEEE Wireless Communications*, vol. 19, no. 2, pp. 22–29, 2012.
- [52] K. J. R. Liu, A. K. Sadek, W. Su, and A. Kwasinski, *Cooperative Communications and Networking*. USA: Cambridge University Press, 2009.
- [53] L. Song, R. Wichman, Y. Li, and Z. Han, *Full-Duplex Communications and Networks*. Cambridge University Press, 2017.

- [54] Z. Zhang, Z. Ma, M. Xiao, Z. Ding, and P. Fan, "Full-duplex device-to-device-aided cooperative nonorthogonal multiple access," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 66, no. 5, pp. 4467–4471, 2017.
- [55] K. Singh, K. Wang, S. Biswas, Z. Ding, F. A. Khan, and T. Ratnarajah, "Resource optimization in full duplex non-orthogonal multiple access systems," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 9, pp. 4312–4325, 2019.
- [56] S. Luo and K. C. Teh, "Adaptive transmission for cooperative noma system with buffer-aided relaying," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 4, pp. 937–940, 2017.
- [57] M. Xu, F. Ji, M. Wen, and W. Duan, "Novel receiver design for the cooperative relaying system with non-orthogonal multiple access," *IEEE Communications Letters*, vol. 20, no. 8, pp. 1679–1682, 2016.
- [58] S. Boyd and L. Vandenberghe, *Convex Optimization*. Cambridge University Press, March 2004. [Online]. Available: <http://www.amazon.com/exec/obidos/redirect?tag=citeulike-20&path=ASIN/0521833787>
- [59] R. Jain, D. M. Chiu, and H. W. R., "A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems," *CoRR*, vol. cs.NI/9809099, 01 1998.