

Inatel

Instituto Nacional de Telecomunicações

Análise de Desempenho de Rede
Cooperativa NOMA Incremental Full
Duplex

ELIGÁRIO MILTON DA COSTA SEMEDO

FEVEREIRO / 2024



**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE
REDE COOPERATIVA NOMA IN-
CREMENTAL FULL DUPLEX**

**ELIGÁRIO MILTON DA COSTA SE-
MEDO**

Dissertação apresentada ao Instituto Naci-
onal de Telecomunicações, como parte dos
requisitos para obtenção do Título de Mes-
tre em Telecomunicações.

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Samuel Baraldi
Mafrá.**

Semedo, Eligário Milton da Costa

S521a

Análise de Desempenho de Rede Cooperativa NOMA Incremental Full Duplex / Eligário Milton da Costa Semedo – Santa Rita do Sapucaí, 2024. 53p.

Orientador: Prof. Dr. Samuel Baraldi Mafra

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

Inclui bibliografia e anexo.

1. Acesso Múltiplo não ortogonal 2. Retransmissão incremental 3. Full-duplex 4. Mestrado em Telecomunicações. I. Mafra, Samuel Baraldi II. Instituto Nacional de Telecomunicações – INATEL. III. Título.

CDU 621.39

*“Ouça os conselhos e esteja pronto
para aprender; assim um dia você
será sábio”*

Provérbios 19.20

*Aos meus pais,
meus primeiros grandes professores.*

Agradecimentos

Quero expressar minha mais profunda gratidão à minha família, especialmente aos meus pais que sempre me apoiaram durante os desafios que enfrentei.

Agradeço ao meu orientador o Prof. Dr. Samuel Baraldi Mafra, por aceitar-me e acompanhar-me com recomendações e conselhos que foram fundamentais durante a minha pesquisa.

Agradeço aos meus amigos Edigar Ié, Vignon Fidèle Adanvo e Jones Marcio Nambundo que sempre me apoiaram durante essa trajetória.

Agradeço também à família encontrada em Santa Rita do Sapucaí, em particular Alcides Mario, Daniel Alfredo Quiteque, Etiene Espanhol Farol, Diego Jeldu Cuba Zuñiga, Silvio, Herman Cristiano Jaime e Daniel Mulato.

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

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

Eligário Milton da Costa Semedo

Sumário

| | |
|--|------------|
| Sumário | v |
| Lista de Figuras | vi |
| Lista de Abreviaturas e Siglas | vii |
| Lista de Símbolos | x |
| Resumo | xi |
| Abstract | xii |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Contextualização | 1 |
| 1.2 Motivação e Análise de Trabalhos Relacionados | 3 |
| 1.3 Contribuições da Dissertação | 6 |
| 1.3.1 Objetivo Geral | 6 |
| 1.3.2 Objetivos Específicos | 6 |
| 1.4 Estrutura da Dissertação | 7 |
| 2 Fundamentação Teórica | 8 |
| 2.1 Comunicação cooperativa (CC) | 8 |
| 2.1.1 Protocolos de Retransmissão | 9 |
| 2.2 Modos de Retransmissão | 11 |
| 2.3 Acesso Múltiplo Não Ortogonal (NOMA) | 11 |
| 2.3.1 Principais vantagens de NOMA | 15 |
| 2.4 Aplicação de acesso múltiplo não ortogonal (<i>do inglês: Non-orthogonal multiple access</i> , NOMA) em Comunicações Cooperativas | 15 |
| 2.4.1 Cooperação entre usuários | 16 |
| 2.4.2 Cooperação através de <i>relay</i> dedicado | 18 |
| 2.5 Conclusão Parcial | 20 |
| 3 Análise de desempenho do NOMA cooperativo incremental full-duplex | 21 |
| 3.1 Modelo de Sistema | 21 |
| 3.1.1 Transmissão Direta | 22 |
| 3.1.2 Transmissão cooperativa | 23 |
| 3.2 Análise de desempenho de interrupção | 24 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 3.2.1 | Probabilidade de interrupção do usuário próximo U_1 | 25 |
| 3.2.2 | Probabilidade de interrupção do usuário distante U_2 | 26 |
| 3.2.3 | Probabilidade de interrupção do par | 28 |
| 3.3 | Resultados Numéricos | 28 |
| 3.4 | Conclusão Parcial | 32 |
| 4 | Conclusões e Propostas Para Novas Pesquisas | 34 |
| 4.1 | Conclusões | 34 |
| 4.2 | Sugestões de Trabalhos Futuros | 35 |
| | Referências Bibliográficas | 36 |

Lista de Figuras

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Modelo de comunicação cooperativa. | 9 |
| 2.2 | Esquema NOMA em cenário downlink com dois usuários no domínio de potência. | 12 |
| 2.3 | Esquemas de redes cooperativas NOMA. | 16 |
| 3.1 | Esquema de NOMA cooperativo incremental full-duplex | 22 |
| 3.2 | Probabilidade de interrupção do par para os esquemas propostos acesso múltiplo não ortogonal cooperativo incremental full-duplex (<i>do inglês: Incremental cooperative full-duplex non-orthogonal multiple access, FD-ICN</i>), acesso múltiplo não ortogonal cooperativo incremental half-duplex (<i>do inglês: Incremental cooperative half-duplex non-orthogonal multiple access, HD-ICN</i>) e NOMA cooperativo convencional em função do relação sinal-ruído (<i>do inglês: Signal-to-Noise Ratio, SNR</i>) ρ | 29 |
| 3.3 | Comparação das probabilidades de interrupção individuais e do par para o esquema FD-ICN proposto em função do SNR ρ | 30 |
| 3.4 | Probabilidade de interrupção do par para os esquemas FD-ICN e HD-ICN propostos em função do fator de alocação de potência a | 31 |
| 3.5 | Probabilidade de interrupção do par para os esquemas FD-ICN e HD-ICN propostos em função da distância entre a estação base e U_1 (d_{s1}). | 31 |
| 3.6 | Probabilidade de interrupção do usuário U_1 para os esquemas FD-ICN, HD-ICN e NOMA cooperativo convencional propostos em função de SNR. | 32 |
| 3.7 | Probabilidade de interrupção do usuário U_2 para os esquemas FD-ICN, HD-ICN e NOMA cooperativo convencional propostos em função de SNR. | 33 |

Lista de Abreviaturas e Siglas

| | |
|----------------|---|
| 4G | Quarta geração de redes móveis |
| 5G | Quinta geração de redes móveis |
| 6G | Sexta geração de redes móveis |
| AF | Amplificar e Encaminhar (do inglês: Amplify-and-Forward) |
| AMA | Acesso múltiplo adaptativo (do inglês: Adaptative multiple access) |
| AWGN | Additive White Gaussian Noise (ruído aditivo Gaussiano branco) |
| B5G | Além da quinta geração |
| BS | Estação rádio base (do inglês: Base Station) |
| CC | Comunicação cooperativa (do inglês: Cooperative Communication) |
| CCN | Acesso múltiplo não ortogonal cooperativo convencional (do inglês: Conventional cooperative non-orthogonal multiple access) |
| CD-NOMA | Acesso múltiplo não ortogonal por domínio de código (do inglês: Code domain non-orthogonal multiple access) |
| CDMA | Acesso múltiplo por divisão do código (do inglês: Code-domain Multiple Access) |
| CDRT | Sistema coordenado de transmissão direta e por relé (do inglês: coordinated direct and relay transmission system) |
| CF | Comprimir e Avançar (do inglês: Compress-and-Forward) |
| CR | Rádio cognitivo (do inglês: cognitive radio) |
| CSI | Informação do estado do canal (do inglês: Channel state information) |
| D2D | Dispositivo para dispositivo (do inglês: Device-to-device) |
| dez. | Dezembro |
| DF | Decodificar e Encaminhar (do inglês: Decode-and-Forward) |
| DoF | Graus de liberdade (do inglês: degrees-of-freedom) |
| EE | Eficiência energética (do inglês: energy efficiency) |
| FD | Full-duplex |
| FD-ICN | Acesso múltiplo não ortogonal cooperativo incremental full-duplex (do inglês: Incremental cooperative full-duplex non-orthogonal multiple access) |
| FDMA | Acesso múltiplo por divisão de frequência (do inglês: Frequency division multiple access) |
| HD | Half-duplex |
| HD-ICN | Acesso múltiplo não ortogonal cooperativo incremental half-duplex (do inglês: Incremental cooperative half-duplex non-orthogonal multiple access) |
| HDAF | Híbrido decodificação-amplificação-encaminhamento (do inglês: Hy- |

| | |
|-----------------|--|
| | brid decode-amplify-forward) |
| ICN | Acesso múltiplo não ortogonal cooperativo incremental (do inglês: Incremental cooperative non-orthogonal multiple access) |
| IHDAF | Híbrido incremental decodificação-amplificação-encaminhamento (do inglês: Incremental hybrid decode-amplify-forward) |
| i.i.d | Independente e identicamente distribuído |
| IOS | Omni-superfície inteligente (do inglês: intelligent omni-surface) |
| IoT | Internet das Coisas (do inglês: Internet of Things) |
| IR | Retransmissão incremental (do inglês: Incremental Relaying) |
| jan. | Janeiro |
| LED | Diodo emissor de luz (do inglês: Light-emitting diode) |
| LOS | Linha de visão (do inglês: line-of-sight) |
| MRC | Combinação de razão máxima (do inglês: Maximal ratio combining) |
| n. | Número |
| NOMA | Acesso múltiplo não ortogonal (do inglês: Non-orthogonal multiple access) |
| OFDMA | Orthogonal frequency division multiple access |
| OMA | Acesso múltiplo ortogonal (do inglês: Orthogonal multiple access) |
| OP | Probabilidade de interrupção (do inglês: outage probability) |
| OPA | Alocação de energia ótima (do inglês: optimal power allocation) |
| Org. | Organizador |
| p. | Página |
| PA | Potência de alocação (do inglês: power allocation) |
| PD-NOMA | Acesso múltiplo não ortogonal por domínio de potência (do inglês: Power domain non-orthogonal multiple access) |
| POP | Probabilidade de interrupção do par (do inglês: par outage probability) |
| QoS | Qualidade de serviço (do inglês: quality of service) |
| RC | Rádio cognitivo |
| RIS | Superfície inteligente reconfigurável (do inglês: reconfigurable intelligent surface) |
| SE | Eficiência espectral (do inglês: spectral efficiency) |
| SI | Auto-interferência (do inglês: self-interference) |
| SIC | Cancelamento Sucessivo de Interferências (do inglês: Successive interference cancellation) |
| SINR | Relação sinal-interferência-ruído (do inglês: Signal-to-interference-pulse-noise ratio) |
| SNR | Relação sinal-ruído (do inglês: Signal-to-Noise Ratio) |
| SRE | Ambiente de radio inteligente (do inglês: smart radio environment) |
| STAR-RIS | Superfície inteligente reconfigurável de transmissão e reflexão simultâneas (do inglês: simultaneous transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface) |
| SWIPT | Transferência simultânea de informação e energia sem fio (do inglês: simultaneous wireless information and power transfer) |
| TDMA | Acesso múltiplo por divisão do tempo (do inglês: Time division multiple access) |

| | |
|------------|--|
| V2X | Comunicação veicular (do inglês: Vehicle-to-Everything) |
| VLC | Comunicação por luz visível (do inglês: visible light communication) |

Lista de Símbolos

| | |
|----------------------|---|
| O_{ij} | Probabilidade de interrupção entre i e j |
| O_{par} | Probabilidade de interrupção do par |
| a | Fator de alocação de potência |
| d_{ij} | Distância entre BS e i e j |
| γ_1^1 | Relação sinal-ruído de U_1 decodificada por U_1 |
| $\gamma_{u_1}^{x_1}$ | Relação sinal-ruído de U_1 percebida por U_1 |
| γ_2^j | Relação sinal-interferência-ruído de U_2 decodificada por U_j |
| $\gamma_{u_1}^{x_2}$ | Relação sinal-ruído de U_2 percebida por U_1 |
| g_{ij} | Distribuição rayleigh |
| h_{ij} | Coefficiente do canal de BS para U_1 e U_2 |
| i e j | Índices do transmissor e do receptor |
| N_0 | Densidade espectral do ruído unilateral |
| $n(t)$ | Ruído aditivo Gaussiano branco |
| P_1 | Potência de transmissão de U_1 |
| P_2 | Potência de transmissão de U_2 |
| % | Por cento |
| R_i | Taxa de transmissão alvo |
| ρ | SNR de transmissão |
| U_1 | Usuário próximo |
| U_2 | Usuário distante |
| v | Expoente de perda de caminho |
| x | Sinal transmitido pela BS |
| x_1 | Informação destinado ao U_1 |
| x_2 | Informação destinado ao U_2 |

Resumo

Nesta dissertação, um esquema *full-duplex* incremental (FD-ICN) é proposto para o enlace de *downlink* de uma rede com dois usuários. Com base num sinal piloto do usuário distante, a estação base decide entre transmitir no modo de transmissão direta ou utilizar a cooperação através do usuário mais próximo. A comunicação cooperativa incremental baseada em acesso múltiplo não ortogonal (NOMA) é primordial para atender às demandas e desafios específicos das tecnologias 5G e 6G. Ela oferece a melhoria da confiabilidade dos usuários e da eficiência espectral, principalmente quando é combinada com a técnica *full-duplex*. O esquema proposto é avaliado em termos da probabilidade de interrupção do par, a fim de garantir um serviço viável para ambos os usuários. Além disso, a probabilidade de interrupção é avaliada considerando tanto o cancelamento sucessivo de interferências (*do inglês: Successive interference cancellation, SIC*) perfeito quanto o imperfeito, além das condições do canal do usuário U_2 . Os resultados mostram que o esquema proposto apresenta melhor desempenho em termos de probabilidade de interrupção, quando comparado com o esquema de acesso múltiplo não ortogonal cooperativo incremental *half-duplex*, bem como com o esquema de acesso múltiplo não ortogonal convencional.

Palavras-Chave: Acesso múltiplo não ortogonal, retransmissão incremental, Full-duplex

Abstract

A full-duplex incremental cooperative non-orthogonal multiple access (FD-ICN) scheme is proposed for a two user downlink network. NOMA-based incremental cooperative communication is important to meet the specific demands and challenges of 5G and 6G technologies. It offers improved user reliability and spectral efficiency, especially when combined with full-duplex technologies. Based on a pilot signal from the far user, the base station decides between transmitting in direct transmission mode or using cooperation via the near user. The proposed scheme is evaluated in terms of the pair outage probability, in order to guarantee a feasible service for both users. Furthermore, the interruption probability is evaluated considering both perfect and imperfect SIC, in addition to user channel conditions U_2 . The results show that the proposed scheme presents better performance in terms of outage probability, when compared with the half-duplex incremental cooperative non-orthogonal multiple access scheme as well as with the conventional non-orthogonal multiple access scheme.

Keywords: Non-orthogonal multiple access, Incremental retransmission, Full-duplex

Capítulo 1

Introdução

1.1 Contextualização

O rápido crescimento do número de usuários e a crescente demanda por serviços avançados têm impulsionado significativamente a evolução das redes de comunicações sem fio ao longo da última década [1]. Além disso, os desafios devido a alta taxa de dados, latência, confiabilidade, qualidade de serviço, conectividade ubíqua e a capacidade da rede em atender múltiplos usuários são preocupantes [2, 3]. Entretanto, a tecnologia da quinta geração de redes móveis (5G), ainda na sua fase de maturidade e comercialização, foi desenvolvida para suprir as necessidades de interconectar um grande número de dispositivos [4, 5], como os dispositivos de internet das coisas (*do inglês: Internet of Things, IoT*) que serão conectados à internet.

A 5G requer a alta conectividade e cobertura, taxa de dados maiores de 1 à 10 Gbps, baixo consumo de energia, eficiência espectral e a largura de banda maior para interconectar esses bilhões de dispositivos com velocidades extremamente rápidas e latências ultrabaixas nas ordens de 1 *ms* [6]. Apesar de 5G estar na sua fase de crescimento e implantação, muitos estudos e pesquisas estão sendo realizadas visando as tecnologias de sexta geração de redes móveis (6G) e as necessidades futuras que demandarão a integração da inteligência artificial [7].

O 6G promete transformar o paradigma do mundo digital e torná-lo cada vez mais inteligente e totalmente conectado [8]. Além disso, espera-se que a 6G supere as limitações da 5G, adicionando novos serviços e tecnologias [9]. Por outro lado, a 6G apresenta alguns requisitos e desafios para atender as demandas das redes sem fio. Esses requisitos incluem [10–12]:

- As comunicações ultra confiáveis e de longo alcance;

- A latência inferior a 1 ms em comparação à 5G;
- Taxas de dados ultra-altas;
- Mobilidade suportada de até 1000 km/h;
- A eficiência espectral máxima três vezes maior em comparação à 5G;
- A eficiência energética 10 vezes superior a 5G;
- A conectividade simultânea 1000 vezes superior a da 5G.

No entanto, todos esses requisitos e desafios especificados estão sendo pesquisados para trazer algumas melhorias significativas, baseando nas tecnologias existentes e nas demandas futuras de comunicação móvel.

Uma das soluções promissoras de rede 6G é a integração da comunicação por satelital, terrestre e subaquático em uma rede única para oferecer a conectividade omni-presente [13, 14]. Entre as soluções promissoras, destaca-se a superfície inteligente reconfigurável (*do inglês: reconfigurable intelligent surface, RIS*) com o objetivo de controlar de maneira inteligente os canais de comunicações sem fio [15]. Além disso, a comunicação por luz visível é investigada em 6G para suportar a alta taxa de transmissão de dados e a alta conectividade em comunicações subaquáticas e terrestres [16].

Por outro lado, a transmissão full-duplex (FD), em conjunto com acesso múltiplo não ortogonal (*do inglês: Non-orthogonal multiple access, NOMA*) cooperativo, foi investigada com a finalidade de aprimorar a capacidade do usuário e aumentar a eficiência espectral (*do inglês: spectral efficiency, SE*) [17, 18].

Recentemente, uma das soluções revolucionárias de meta-superfície, denominada superfície inteligente reconfigurável de transmissão e reflexão simultâneas (*do inglês: simultaneous transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface, STAR-RIS*), tem sido amplamente pesquisada com o objetivo de estender a cobertura completa da superfície (cobertura de 360 graus) em 6G [19].

As redes de comunicações sem fio estão sujeitas ao desvanecimento devido as variações na atenuação do sinal. Neste caso, a comunicação cooperativa (*do inglês: Cooperative Communication, CC*) surge como uma solução altamente viável para minimizar esses efeitos prejudiciais do desvanecimento de múltiplos caminhos, permitindo com que os nós distribuídos em uma rede cooperam entre si através dos canais de comunicações, resultando em um ganho de diversidade espacial nas redes de comunicações sem fio [20]. Além disso, é possível que vários nós ou usuários sejam usados como *relay* para retransmitir os sinais previamente recebidos da fonte para outros usuários, e ao mesmo tempo para transmitir seus próprios sinais [21]. Adicionalmente, essa cooperação entre os usuários, além de resultar em um aumento da

taxa de dados, proporciona ganhos de capacidade e cobertura da rede [22]. A CC pode ser classificada nos modos half-duplex (HD) e FD. No modo HD, os nós recebem e transmitem em canais ortogonais usando duas bandas de frequências distintas [23], enquanto que no modo FD, os nós recebem e transmitem simultaneamente na mesma frequência, mas sofrem com a presença de auto-interferência residual diferentemente do modo *half-duplex* [24]. A auto-interferência (*do inglês: self-interference*, SI) pode impactar de maneira negativa no desempenho na rede sem fio, resultando em uma situação inversa onde o HD supera FD em termos de capacidade de transmissão. Por outro lado, para superar esse problema, graças a implementação das técnicas de cancelamento de auto-interferência, o modo FD consegue atingir uma capacidade máxima mesmo com a presença de auto-interferência [25].

Os esquemas da técnica NOMA podem ser divididos em duas categorias distintas: NOMA no domínio de potência e NOMA no domínio do código [26]. NOMA em domínio do código, em particular, é semelhante ao acesso múltiplo por divisão do código (*do inglês: Code-domain Multiple Access*, CDMA), onde os usuários se comunicam ao mesmo tempo e frequência, mas com códigos diferentes [27]. Por outro lado, em NOMA no domínio de potência, diversos usuários se comunicam na mesma faixa de frequência e tempo, mas com diferentes níveis de potência [28]. Além disso, a estação rádio base (*do inglês: Base Station*, BS) aloca menos potência aos usuários com melhores condições de canal, e estes possuem a capacidade de decodificar suas próprias informações através da técnica de cancelamento sucessivo de interferências (*do inglês: Successive interference cancellation*, SIC), oferecendo desta forma, uma melhoria significativa na eficiência espectral e alta taxa de transmissão em relação às técnicas de acesso múltiplo ortogonal (*do inglês: Orthogonal multiple access*, OMA) [29, 30]. Adicionalmente, tendo em conta a alta demanda por capacidade de tráfego de dados e o aumento do número de usuários em infraestruturas de redes sem fio, a combinação de comunicação cooperativa com o NOMA pode ser considerada adequada para as tecnologias de comunicação 5G e além da quinta geração (B5G), devido à sua capacidade intrínseca de atender múltiplos usuários simultaneamente [31].

1.2 Motivação e Análise de Trabalhos Relacionados

Os sistemas de comunicações sem fio apresentam muitas falhas de comunicações e perdas de dados devido ao meio de comunicação sujeito ao ruído, atenuação, interferências e desvanecimento que fazem com que os sinais enviados entre o transmissor e o receptor se atenuam ao longo do percurso [32]. Além disso, as comunicações sem

sem fio enfrentam alguns desafios, tais como, a alocação de energia entre os usuários, a conectividade massiva e a eficiência espectral [33]. Para solucionar esses problemas, a integração de comunicação cooperativa e as técnicas NOMA tem ganhado muita atenção por fornecer a diversidade espacial, melhorando o desempenho do sistema e mitigar os efeitos de desvanecimento de múltiplos percursos [34]. A cooperação entre os usuários da rede auxiliando na transmissão de sinais de outros usuários, resulta em uma melhoria significativa da confiabilidade e um aumento da cobertura da rede sem fio. A comunicação pode ocorrer nos modos HD ou FD [35]. Especialmente, no modo HD, os nós cooperativos transmitem e recebem em canais ortogonais, enquanto que no modo FD a transmissão e recepção são realizadas ao mesmo tempo e na mesma banda de frequência. Além disso, a comunicação FD é considerado viável em relação HD devido ao avanço das técnicas de cancelamento de SI que lhe permite alcançar um melhor desempenho [36]. A técnica FD oferece uma ótima experiência de comunicação para os usuários da rede.

Trabalhos recentes analisaram o desempenho de redes NOMA cooperativas FD, por exemplo [37,38]. Em [37], os autores propõem um esquema FD para uma rede NOMA de downlink, onde o usuário mais próximo coopera com a BS agindo como um retransmissor FD para o usuário distante. Além disso, os resultados analíticos alcançados, considerando as alocações ótimas de potência na BS e no *relay*, são eficientes para maximizar a taxa mínima alcançável pelos usuários e minimizar a probabilidade de interrupção (*do inglês: outage probability*, OP). Em [38], um novo esquema cooperativo NOMA é apresentado onde o usuário próximo opera como um relé decodificar e encaminhar (*do inglês: Decode-and-Forward*, DF) para auxiliar o usuário distante. Dependendo da condição do canal, o usuário mais próximo alterna entre o modo de transmissão HD e FD. Por outro lado, os autores analisaram os cenários com e sem a ligação direta entre a BS e o usuário remoto. O esquema proposto é avaliado em termos de probabilidade de interrupção, taxa ergódica e eficiência energética. Os resultados demonstram que o NOMA FD supera o NOMA HD sob condições de relação sinal-ruído (*do inglês: Signal-to-Noise Ratio*, SNR) baixas e em termos de taxa de soma mais alta. Porém, no modo de transmissão tolerante ao atraso, o HD supera FD em termo de eficiência energética (*do inglês: energy efficiency*, EE) na região de SNR alta.

Em [39], os autores investigaram um sistema NOMA cooperativo com dois usuários a fim de maximizar a eficiência energética. Neste sistema, não existe uma linha de visada direta entre a BS e o usuário remoto, porém, um *relay* FD é empregado para auxiliar nessa comunicação. Por outro lado, o resultado da simulação comprova que o esquema proposto além de aprimorar a eficiência energética, garante a qualidade de

serviço (*do inglês: quality of service, QoS*) dos usuários. Em [40], o protocolo de transferência simultânea de informação e energia sem fio (*do inglês: simultaneous wireless information and power transfer, SWIPT*) NOMA cooperativo é estudado para avaliar o desempenho do sistema e a localização dos usuários. Os resultados obtidos em termos da probabilidade de interrupção demonstram que este protocolo alcança um ganho de diversidade significativo entre os dois usuários e melhora o desempenho da rede. Na comunicação cooperativa NOMA, mesmo em cenário onde o canal entre a BS e o usuário remoto estiver em ótima condição, o nó *relay* é mantido ainda para retransmitir a informação desse usuário. Entretanto, essa comunicação além de desperdiçar o recurso do canal, pode impactar negativamente no desempenho de sistema.

Em [41], os autores analisaram a diversidade cooperativa por meio de retransmissão incremental, baseando-se em um bit de feedback no usuário remoto para determinar se há necessidade de aplicar a cooperação. Os resultados, obtidos através da análise da probabilidade de interrupção e da capacidade do canal, demonstram um alto desempenho da capacidade do canal e uma ótima diversidade espacial na rede de diversidade cooperativa. Em [42], um estudo comparativo entre os protocolos NOMA cooperativo convencional, OMA, transmissão NOMA direta e NOMA cooperativo incremental foi investigado em termos de probabilidade de interrupção. No entanto, os resultados analíticos demonstram que o protocolo de acesso múltiplo não ortogonal cooperativo incremental (*do inglês: Incremental cooperative non-orthogonal multiple access, ICN*) baseado em SWIPT no usuário distante supera os demais em ambientes de SNR alta. Adicionalmente, em [43], um protocolo de retransmissão incremental baseado na coleta de potência de dois usuários demonstra maior eficiência espectral em comparação à retransmissão convencional. Por outro lado, para aprimorar a eficiência energética, em [44], um novo esquema de NOMA cooperativo baseado em protocolo híbrido incremental decodificação-amplificação-encaminhamento (*do inglês: Incremental hybrid decode-amplify-forward, IHDAF*) é pesquisado. Os resultados analíticos com base na análise de OP, demonstram que o esquema proposto alcança uma redução significativa no consumo de energia em relação ao protocolo híbrido decodificação-amplificação-encaminhamento (*do inglês: Hybrid decode-amplify-forward, HDAF*).

Em [45], os autores propõem um protocolo de acesso múltiplo não ortogonal cooperativo incremental half-duplex (*do inglês: Incremental cooperative half-duplex non-orthogonal multiple access, HD-ICN*) para uma rede downlink. Com base no feedback de um bit do usuário distante, a fonte pode alternar entre um modo de transmissão NOMA direta e um modo de transmissão NOMA cooperativo. Entretanto, se o canal entre a fonte e o usuário distante estiver em boas condições a rede operará no NOMA convencional, caso contrário a transmissão cooperativa será ativada com o auxílio do

usuário mais próximo. Os autores demonstram que o protocolo HD-ICN supera os esquemas NOMA cooperativos convencionais.

1.3 Contribuições da Dissertação

O estudo baseado em acesso múltiplo não ortogonal cooperativo incremental full-duplex (*do inglês: Incremental cooperative full-duplex non-orthogonal multiple access*, FD-ICN) e acesso múltiplo não ortogonal cooperativo convencional (*do inglês: Conventional cooperative non-orthogonal multiple access*, CCN) tem sido amplamente abordado na literatura. Apesar das vantagens de sistema CCN, este limita a melhoria da eficiência espectral no retransmissor HD e impacta negativamente o ganho de diversidade devido a auto-interferência no relé FD. Com o objetivo de superar as limitações em comunicação NOMA cooperativa HD, nessa dissertação é proposto um esquema FD-ICN para rede para o enlace de descida de uma rede de comunicação de dois usuários com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema de comunicação cooperativa. No entanto, com base no feedback de um bit do usuário distante, o sistema pode escolher entre modo de transmissão direta ou transmissão cooperativa, onde o usuário mais próximo atua como relé FD para o usuário mais distante. Adicionalmente, ao utilizar o protocolo incremental, é possível eliminar o problema da diversidade zero (ou seja, compensar a desigualdade de potência entre os sinais transmitidos e recebidos) para o usuário mais próximo, inerente à comunicação FD. Além disso, analisamos o esquema proposto em termos de probabilidade de interrupção do par para diferentes valores de auto-interferência residual, fator de alocação de energia e a localização do usuário mais próximo. Os resultados demonstram que o esquema proposto supera os esquemas HD-ICN e NOMA cooperativo convencional.

1.3.1 Objetivo Geral

Propor um esquema full-duplex incremental com o objetivo de otimizar a eficiência espectral e ampliar a cobertura na comunicação.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Realizar estudos sobre os sistemas incrementais em redes cooperativas NOMA;
2. Sugerir um esquema cooperativo incremental full-duplex NOMA para otimizar a eficiência espectral e aumentar a cobertura na comunicação;
3. Analisar o esquema proposto em comparação com o esquema cooperativo NOMA

convencional e incremental half-duplex em termos de probabilidade de interrupção individual e do par para os dois usuários.

1.4 Estrutura da Dissertação

O restante desta dissertação está estruturado da seguinte maneira:

- Capítulo 2 - Nesse capítulo, trataremos as principais teorias sobre comunicação cooperativa, protocolos de retransmissão e os modos de retransmissão. Além disso, são apresentados as definições do NOMA cooperativo convencional bem como os seus principais benefícios em comparação ao OMA convencional. Por fim, demonstramos a aplicação de NOMA em comunicações cooperativas.
- Capítulo 3 - Nesse capítulo, apresentamos o modelo NOMA cooperativo incremental full-duplex. Além disso, avaliamos o desempenho do sistema proposto através da probabilidade de interrupção. Os resultados obtidos por meio de simulações computacionais demonstram a eficiência do sistema proposto em comparação com o NOMA cooperativo convencional.
- Capítulo 4 - Nesse capítulo, apresentamos as conclusões finais e as perspectivas futuras.

Capítulo 2

Fundamentação Teórica

Neste capítulo, são apresentados as definições e diferentes tipos de comunicação cooperativa. Além disso, é definido o conceito de NOMA e os esquemas de comunicação cooperativa incremental HD e FD. Por fim, é apresentado a aplicação de NOMA em comunicações cooperativas.

2.1 Comunicação cooperativa (CC)

A comunicação cooperativa é um mecanismo de comunicação sem fio no qual os usuários colaboram e compartilham seus recursos com o objetivo de aprimorar a qualidade da transmissão [46]. Essa comunicação otimiza o uso de recursos de comunicação, permitindo que o usuário mais próximo ou um nó *relay* não apenas receba a informação, mas também coopere na retransmissão da informação proveniente da fonte até seu respectivo destino, principalmente na ausência da linha de visão (*do inglês: line-of-sight, LOS*) ou quando o canal entre a fonte e o destino estiver inviável [47]. Pode-se observar a representação da comunicação cooperativa na Figura 2.1. Inicialmente, a fonte transmite informações tanto para o *relay* quanto para o destino. Em seguida, o *relay* processa a informação recebida e a reencaminha para o destino. Finalmente, essas informações são combinadas, resultando no aumento da diversidade espacial.

Uma maior confiabilidade, cobertura, eficiência energética e QoS em comunicações sem fio podem ser obtidas por intermédio da cooperação [48]. Além disso, é possível obter ganhos na diversidade espacial e QoS por meio de cooperação entre os usuários com melhores condições do canal e os demais com condições de canal menos favoráveis [49].

A CC tem sido o objeto de estudo em diversas áreas como comunicação por luz

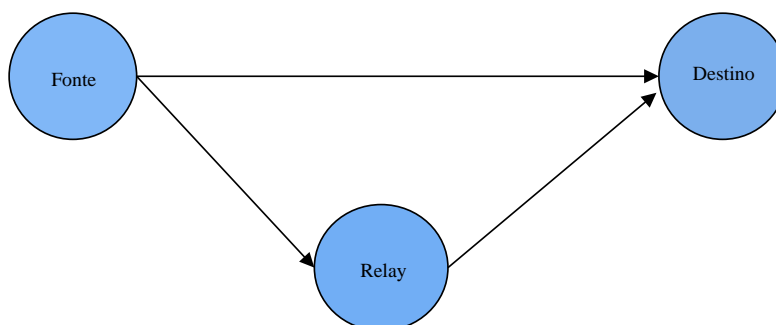


Figura 2.1: *Modelo de comunicação cooperativa.*

visível (*do inglês: visible light communication, VLC*) [50], em comunicação veicular (*do inglês: Vehicle-to-Everything, V2X*) [51], em comunicações de ondas milimétricas [52] e em rádio cognitivo (*do inglês: cognitive radio, CR*) [53].

2.1.1 Protocolos de Retransmissão

O uso de um retransmissor entre o transmissor e o receptor é muito importante em comunicações sem fio. Já que, o retransmissor, além de receber as informações enviadas pelo transmissor, consegue redirecioná-las para os seus destinos específicos [54]. A cooperação pode ser alcançada por intermédio de um *relay* dedicado ou usuários que operam como um relé para retransmitir as informações para os demais usuários da rede [55]. Além disso, estes usuários têm a capacidade de transmitir as suas próprias informações.

O esquema de processamento de sinal recebido da fonte através de um *relay*, é considerado um aspecto relevante em comunicações cooperativas. Existem diversos esquemas de retransmissão encontrados na literatura, tais como amplificar e encaminhar (*do inglês: Amplify-and-Forward, AF*), DF, comprimir e avançar (*do inglês: Compress-and-Forward, CF*) e retransmissão incremental (*do inglês: Incremental Relaying, IR*) usados para obter um ganho de diversidade e SE [56]. Além disso, os protocolos de retransmissão podem ser categorizados em fixos e adaptativos. O protocolo de retransmissão fixo é mais fácil de implementar, pois os recursos do canal são distribuídos entre a fonte e o relé de forma precisa. No entanto, este protocolo apresenta uma eficiência espectral baixa para a transmissão de informações, pois a retransmissão via relé ocorre mesmo quando o canal entre a fonte e o destino estiver em ótimas condições. Em contraste, o protocolo de retransmissão adaptativa divide os recursos de forma dinâmica. Neste protocolo, o relé retransmite o sinal apenas quando o canal entre a fonte e o destino não estiver em ótimas condições, superando assim

a protocolo de retransmissão fixa. No entanto, a complexidade de implementação do protocolo de retransmissão adaptativa é maior em comparação com o protocolo de retransmissão fixa. Em seguida, os esquemas de retransmissão encontrados na literatura serão definidos da seguinte maneira.

- AF: esse é um dos protocolos de retransmissão fixa geralmente usados em comunicações cooperativas devido a sua facilidade de implementação. Nesse protocolo, o nó retransmissor amplifica e encaminha as informações provenientes da fonte até seu destino [57]. Neste protocolo, o nó de retransmissão amplifica e encaminha as informações provenientes da fonte até o destino. No entanto, o ruído do sinal, além de ser amplificado no *relay*, também é multiplicado por um ganho de canal, resultando em duas versões de sinal com desvanecimento independente recebidas pelo destino.
- DF: esse protocolo, além de realizar a decodificação do sinal, tem a capacidade de regenerar e codificar novamente o sinal recebido da fonte antes de encaminhá-lo para o seu destino final [58]. Esses processos de decodificação e recodificação correspondem a transformações não-lineares do sinal recebido. Além disso, essa técnica é benéfica em termos de redução de efeitos de ruído, pois não requer a utilização de amplificação. Apesar disso, um erro pode ocorrer durante o processo de detecção no *relay*, resultando na retransmissão de informação de forma incorreta até o destino.
- CF: em protocolo CF, o nó retransmissor comprime as informações recebidas e as encaminha até o destino [59]. Além disso, o sinal recebido da fonte e sua versão quantizada e comprimida pelo *relay* serão combinadas no destino.
- IR: é um protocolo de retransmissão adaptativa que utiliza um canal de *feedback* entre o nó retransmissor e o destino. De acordo com a condição do estado do canal, uma mensagem de *feedback* é transmitida ao nó transmissor com o objetivo de garantir a entrega correta de informação até o destino. Essa técnica de *feedback* auxilia na minimização do desperdício de recursos do canal, pois o *relay* é ativado apenas quando a transmissão direta entre a fonte e o destino não for bem-sucedida. Nesse caso, o *relay* é utilizado para reencaminhar a informação do destino com sucesso.

Em relação aos três protocolos previamente mencionados, a retransmissão incremental oferece uma maior eficiência espectral. Além disso, em termos de OP, os autores de [60] demonstram que a retransmissão incremental apresenta melhor desempenho em termos de probabilidade de interrupção.

2.2 Modos de Retransmissão

Em modos de retransmissão, os nós retransmissores cooperam entre si para retransmitir as informações de transmissor até o receptor. Os modos de retransmissão podem ser classificados em modo de transmissão HD e FD.

- No modo HD: os nós transmitem e recebem sinais na mesma banda de frequência, porém em intervalos de tempo distintos [61]. Dessa forma, o modo HD apresenta uma baixa eficiência espectral, pois permite apenas uma direção de transmissão, diferentemente do modo FD.
- No modo FD: os nós retransmissores transmitem e recebem sinais na mesma banda de frequência simultaneamente [62]. O modo FD pode alcançar uma SE maior em comparação ao HD [63, 64]. Porém, o FD está sempre sujeito à auto-interferência gerada pela própria antena transmissora até a antena receptora [65]. Para solucionar esse problema de auto-interferência em modo de retransmissão FD várias pesquisas baseadas em uso de diversas técnicas de cancelamento de auto-interferência foram feitas para reduzir esse efeito. Entretanto, a técnica SIC apareceu como uma solução ideal para esse problema [66].

2.3 Acesso Múltiplo Não Ortogonal (NOMA)

NOMA é uma técnica de acesso múltiplo que possibilita a alocação compartilhada de recursos, como frequência, tempo, código e espaço, entre múltiplos usuários [67]. Esta técnica permite alcançar a conectividade massiva, pois é capaz de atender diversos usuários ao mesmo tempo e na mesma banda de frequência [68]. Normalmente, essa capacidade de atendimento dos usuários é possível graças a utilização de codificação por superposição na BS e o SIC no receptor [69]. Além disso, a alocação de potência é realizada de forma justa entre os usuários, visando aumentar a SE. Adicionalmente, esta técnica faz um uso benéfico da condição do canal para atender esses usuários simultaneamente usando o mesmo recurso. Os esquemas NOMA são considerados atraentes e promissores para aprimorar a eficiência espectral e ampliar a conectividade em redes sem fio [70]. Existem diversos esquemas de acesso múltiplo NOMA encontrados na literatura, entre os quais os mais usados são acesso múltiplo não ortogonal por domínio de potência (*do inglês: Power domain non-orthogonal multiple access*, PD-NOMA) e acesso múltiplo não ortogonal por domínio de código (*do inglês: Code domain non-orthogonal multiple access*, CD-NOMA) [71]. Diferentemente do esquema NOMA, o esquema OMA inclui as técnicas como acesso múltiplo por divisão do tempo (*do inglês: Time division multiple access*, TDMA), acesso múltiplo por di-

visão de frequência (*do inglês: Frequency division multiple access, FDMA*), orthogonal frequency division multiple access (OFDMA) e o CDMA, onde os sinais de diferentes usuários são ortogonais nos domínios de frequência, tempo e código [72]. No entanto, este esquema limita o número de usuários que podem acessar os recursos, afetando negativamente a eficiência espectral e a conectividade massiva. No entanto, os esquemas NOMA são considerados atraentes e promissores para aprimorar a eficiência espectral e ampliar a conectividade em redes sem fio.

O esquema CD-NOMA emprega sequências de código distintas para permitir o compartilhamento do espectro de rádio de maneira eficaz [73]. Ao contrário de PD-NOMA, que analisa principalmente as desigualdades no ganho do canal entre os usuários NOMA para realizar a alocação de potência. Nessa dissertação aplica-se a técnica NOMA no domínio da potência. Neste domínio, os usuários transmitem na mesma frequência e tempo, porém com níveis de potências distintos [74]. Segundo o princípio da comunicação NOMA, a alocação de energia varia de acordo com as condições do canal, atribuindo menos potência ao usuário com condição favorável ou mais próximo U_1 da BS, e mais potência ao usuário com condição desfavorável ou mais distante U_2 como mostra a Figura 2.2.

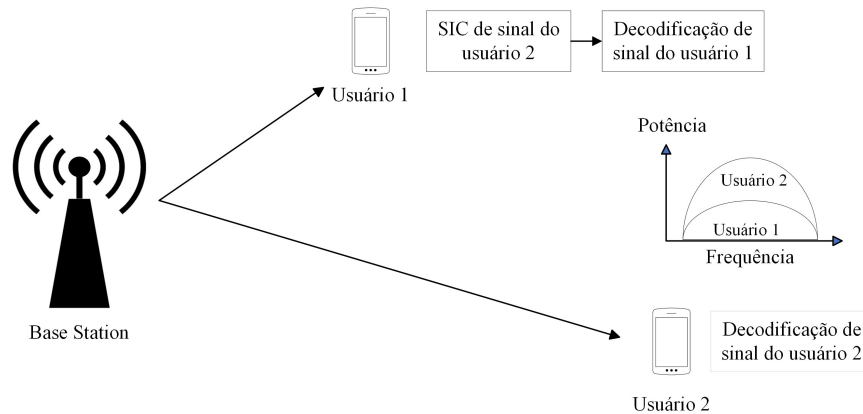


Figura 2.2: Esquema NOMA em cenário downlink com dois usuários no domínio de potência.

Este método de alocação de energia assegura a implantação adequada da técnica SIC e a justiça entre os usuários. Além disso, a BS emprega a técnica de codificação por superposição, transmitindo sinais para ambos os usuários com níveis de potência distintos.

O sinal sobreposto transmitido aos usuários por intermédio de BS é escrito da se-

guinte forma:

$$x = \sqrt{P_1}x_1 + \sqrt{P_2}x_2.$$

$$x = \sum_{i=1}^N \sqrt{P_i}x_i. \quad (2.1)$$

Onde P_1 e P_2 representam as potências de transmissão, respectivamente, x_1 e x_2 representam a informação de U_1 e U_2 . A potência total é $P_t = P_1 + P_2$. Dessa forma, o sinal recebido por cada usuário NOMA pode ser escrito da seguinte maneira:

$$y_{ij} = h_{ij}x + n_i(t).$$

$$y_{ij} = h_{ij} \sum_{k=1}^N \sqrt{P_k}x_k + n_i(t). \quad (2.2)$$

onde $ij \subset \{S, R, D\}$, $i \neq j$, o elemento i representa o transmissor e o elemento j o receptor, $k \in \{1, 2, \dots, N\}$, $n(t) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ representa o additive white Gaussian noise (*ruído aditivo Gaussiano branco*, AWGN) complexo com média zero e variância σ^2 , a é o fator de potência de alocação (*do inglês: power allocation*, PA), $h_{ij} = g_{ij}d_{ij}^{-\nu}$ é o coeficiente do canal de BS para U_1 e U_2 , g_{ij} segue uma distribuição Rayleigh, d_{ij} é a distância de BS e os usuários, ν representa o expoente de perda de caminho.

Sob condição de $|h_1|^2 > |h_2|^2$, a estação de base aloca potências de tal forma que $P_1 < P_2$ para garantir que os dois usuários consigam receber pelo menos o sinal do usuário distante.

A técnica de SIC em comunicação sem fio NOMA é usada no receptor para recuperar os sinais dos usuários, seguindo uma ordem de decodificação ideal para decodificar corretamente os sinais recebidos [75]. Nesta ordem, o usuário com menor potencia (U_1) antes de decodificar sua própria informação, decodifica informação do usuário com maior potencia (U_2), em seguida, subtrai o sinal decodificado do sinal sobreposto recebido [76]. Por fim, o U_1 decodifica a sua própria informação. De outro modo, conforme ilustra a Figura 2.2, o U_2 decodifica diretamente o seu próprio sinal, considerando o sinal do U_1 como interferência.

Sendo assim, a SNR recebida para decodificar o sinal de U_2 em U_1 é expressa da seguinte maneira:

$$\gamma_{SU_{1,2}} = \frac{a_2 \rho_i |h_{ij}|^2}{a_1 \rho_i |h_{ij}|^2 + 1}. \quad (2.3)$$

Onde SNR de transmissão $\rho = P_s/\sigma^2$, P_s representa a potência de transmissão na BS. a_1 e a_2 são os coeficientes de alocação de potência para U_1 e U_2 na BS, ou seja, $a_1 < a_2$, $a_1 + a_2 = 1$. Após a decodificação e o cancelamento de interferência

com sucesso do sinal de U_2 , a SNR para a decodificação do sinal de U_1 é expressa da seguinte forma:

$$\gamma_{SU_{1,1}} = a_1 \rho_i |h_{ij}|^2. \quad (2.4)$$

A probabilidade de interrupção é utilizada para avaliação do sistema, que pode ser definida como a probabilidade de falha na comunicação entre os nós i e j , que ocorre quando a informação mútua entre os nós i e j é menor que uma taxa esperada de transmissão R . A probabilidade de interrupção do enlace (SU_1) é expressa da seguinte maneira:

$$O_{SU_1} = \Pr [(\log_2(1 + \gamma_{SU_{1,1}}) < R_i) \cup (\log_2(1 + \gamma_{SU_{1,2}}) < R_i)] \quad (2.5)$$

Essa expressão representa o cenário em que o usuário U_1 não é capaz de decodificar tanto o seu próprio sinal quanto o sinal do usuário U_2 .

Por outro lado, a probabilidade de interrupção do enlace SU_2 é escrita da seguinte maneira:

$$O_{SU_2} = \Pr[(\log_2(1 + \gamma_{SU_{2,2}}) < R_i)] \quad (2.6)$$

Nesse cenário em questão, o U_2 não consegue decodificar seu próprio sinal, considerando o sinal de U_1 como interferência.

Quando o sinal sobreposto através da BS e o SIC para o usuário distante são implementados corretamente, a taxa de dados alcançável para ambos os usuários U_1 e U_2 em um sistema *Downlink* de 1 Hz de largura de banda pode ser expressa da seguinte maneira [75]:

$$R_1 = \log_2 \left(1 + \frac{a_1 P_t |h_1|^2}{N_1} \right), \quad (2.7)$$

$$R_2 = \log_2 \left(1 + \frac{(1 - a_2) P_t |h_2|^2}{a P_t |h_2|^2 + N_2} \right). \quad (2.8)$$

Onde o N_1 e N_2 representam a densidade espectral de potência do ruído.

2.3.1 Principais vantagens de NOMA

As principais vantagens entre as técnicas NOMA em relação a OMA serão descritas da seguinte forma [77–79].

- **Eficiência espectral aprimorada:** O acesso múltiplo OMA apresenta limitações quando se trata de um grande número de usuários. Ao contrário da técnica NOMA, onde múltiplos usuários podem aproveitar de toda a largura de banda disponível. Dessa forma, o NOMA supera as limitações de OMA em termos de SE.
- **Imparcialidade entre os usuários:** A técnica de acesso múltiplo OMA não oferece justiça entre os usuários, pois a alocação de potência é realizada de maneira equitativa, independentemente da condição do canal. No entanto, a técnica NOMA realiza a alocação de potência de maneira inteligente afim de garantir a justiça e a entrega de informações dos usuários com condições de canal ruins. Além disso, o NOMA permite alcançar uma alta taxa de dados e um desempenho de sistema superior em comparação com a OMA.
- **Conectividade massiva:** As técnicas não ortogonais demonstram a capacidade de ampliar a conectividade. Com essa técnica, é possível atender vários usuários no mesmo bloco de recurso por meio de superposição dos seus sinais, em comparação com o OMA, onde o número de usuários é limitado pelo número de recursos. Além disso, a técnica NOMA pode ser útil em IoT para suportar a conexão de um grande número de dispositivos interconectados.
- **Menor latência de transmissão:** A técnica OMA requer que o usuário aguarde pela disponibilidade de recursos de transmissão, independentemente de quantidade de bits a serem transmitidos. No entanto, esse tempo de espera gera uma sobrecarga de sinalização e aumenta a latência. Em contraste, o NOMA oferece uma permissão de acesso mais flexível para acomodar um número variável de usuários, levando em consideração a aplicação em uso e a qualidade de serviço percebida pelo dispositivo.

2.4 Aplicação de NOMA em Comunicações Cooperativas

O aprimoramento da eficiência espectral, a baixa latência, a alocação justa na alocação de potência entre os usuários e a capacidade de suportar conectividade massiva tornam o NOMA mais relevante para as tecnologias de comunicação sem fio.

Na comunicação cooperativa, o NOMA é aplicado para solucionar os problemas relacionados com a justiça dos usuários na rede, estimativa de informação do estado do canal (*do inglês: Channel state information, CSI*), efeitos de desvanecimento de múltiplos caminhos e erros na implementação do SIC [80]. Além disso, combinando o sistema NOMA com CC, é possível aprimorar a confiabilidade no receptor e aumentar a cobertura. No cenário da comunicação NOMA cooperativo, os usuários cooperam entre si de tal maneira que o usuário com melhor condição de canal (mais próximo) atua como retransmissor para encaminhar com sucesso as informações do usuário com condição ruim (mais distante), aumentando, assim, a confiabilidade na transmissão [81,82]. O sistema NOMA cooperativo, além de suportar a transmissão de dados de um grande número de usuários, realiza a justiça na alocação de potência entre eles. Deste modo, mais potência é atribuída ao usuário mais próximo da BS e menos potência ao usuário mais distante.

Existem diversos esquemas de rede cooperativa NOMA, conforme mostra a Figura 2.3 [83]. Consoante o uso de relé, podemos classificar esse esquema em duas categorias principais que serão descritos a seguir.

2.4.1 Cooperação entre usuários

A cooperação entre os usuários da rede auxiliando na transmissão de sinais de outros usuários, resulta em uma melhoria significativa da confiabilidade e um aumento da cobertura da rede sem fio.

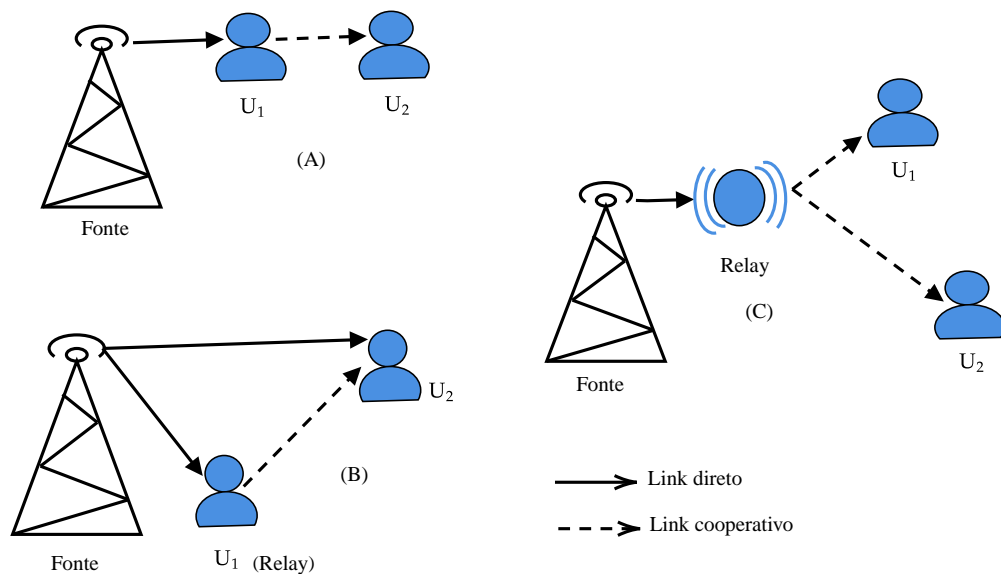


Figura 2.3: Esquemas de redes cooperativas NOMA.

Conforme ilustrado na Figura 2.3A-B), o usuário com condição de canal forte atua como relé para auxiliar na transmissão de informação do usuário com condição de canal fraco. Ao introduzir a cooperação, na primeira fase de transmissão, uma mensagem sobreposta é transmitida para ambos os usuários através da fonte. No entanto, dependendo da condição de canal, a informação do usuário distante pode não chegar com sucesso. Para contornar esse problema, a transmissão cooperativa é aplicada na segunda fase, onde o usuário mais próximo da fonte executa SIC para decodificar a informação de usuário fraco antes de decodificar a sua própria informação. Em [84], a OP em uma rede cooperativa NOMA FD é investigada para avaliar o desempenho de comunicação dispositivo para dispositivo (*do inglês: Device-to-device, D2D*). Além disso, os resultados demonstram que é possível alcançar uma interrupção mínima em FD em comparação à HD. Adicionalmente, levando em consideração o nível de SI, um novo esquema adaptativo de múltiplo acesso denominado acesso múltiplo adaptativo (*do inglês: Adaptive multiple access, AMA*) é pesquisado para analisar a probabilidade de interrupção. Esse esquema se adapta de maneira eficiente entre os esquemas NOMA cooperativo FD, CCN e OMA, dependendo de nível de SI. Isso resulta em um ótimo desempenho do sistema.

Em [85], a técnica de SWIPT NOMA cooperativo FD com o objetivo de maximizar a eficiência energética é investigada. Para auxiliar o usuário mais distante, foi adotada uma técnica de coleta de energia. Além disso, os autores consideraram o cenário de estado de canal imperfeito. Para resolver esse problema, a otimização conjunta do feixe de transmissão com a alocação de energia baseada na coleta de energia do usuário distante foram usadas para maximizar a eficiência energética e a taxa de dados. Os resultados numéricos demonstram que o esquema proposto reduz o consumo energético.

Por outro lado, para reduzir a complexidade da rede e mitigar os efeitos de desvanecimento múltiplos caminhos, a implementação das técnicas de seleção de retransmissores é essencial para aumentar o ganho no desempenho da rede. Em [86, 87], o protocolo de SWIPT NOMA cooperativo é estudado para avaliar o desempenho do sistema e a localização dos usuários. No entanto, ambos os autores assumiram que todos os usuários estão distribuídos aleatoriamente no espaço da rede. Em [87], os autores propuseram um protocolo cooperativo SWIPT NOMA em três cenários distintos, ao contrário de [86]. Sendo assim, a seleção ótima de usuários, tendo em conta a sua distância em relação à BS, pode contribuir para aprimorar o desempenho do sistema. Nesse sentido, a geometria estocástica é empregada para modelar a descoberta do usuário retransmissor e avaliar o desempenho do sistema. Os resultados obtidos comprovam que o esquema proposto apresenta uma interrupção reduzida e um ótimo desempenho em comparação com o esquema de seleção aleatória.

Além disso, o NOMA cooperativo *full-duplex* aprimora a eficiência espectral, pois requer apenas dois intervalos de tempo para a transmissão de informações dos dois usuários. Em contraste, o OMA cooperativo requer dois intervalos de tempo para a transmissão de informações dos usuários a partir da fonte e mais um intervalo de tempo para a retransmissão da informação do usuário com condição de canal ruim através do usuário mais forte [88].

2.4.2 Cooperação através de *relay* dedicado

As redes cooperativas NOMA empregam um esquema de *relay* externo dedicado para auxiliar na transmissão de informação para ambos os usuários, conforme ilustrado na Figura 2.3C). Nesse sistema, não há uma linha de visada direta entre a fonte e os usuários. No entanto, através de um *relay* dedicado, a fonte consegue transmitir as informações tanto para o usuário com condição de canal forte quanto para o usuário com condição de canal fraco. Além disso, é possível atingir uma melhoria na eficiência espectral ao utilizar o sistema NOMA cooperativo por *relay* dedicado em comparação com o OMA cooperativo. No sistema NOMA cooperativo com *relay* dedicado, um intervalo de tempo é necessário para transmitir a informação sobreposta da fonte até o *relay*, e mais um intervalo de tempo do *relay* até os dois usuários. Por outro lado, o TDMA cooperativo requer dois intervalos de tempo para a transmissão de informação da fonte até o *relay*, e mais dois intervalos de tempo do *relay* para os usuários.

Em [89], os autores apresentam uma proposta para um sistema cooperativo NOMA operando em FD. Nesse sistema, um retransmissor FD dedicado é empregado para auxiliar na transmissão de dados do usuário mais distante. A probabilidade de interrupção e a taxa ergódica são avaliadas levando em consideração a presença de cancelamento imperfeito de auto-interferência. Os resultados obtidos na base de simulação demonstram que o esquema proposto apresenta uma melhoria significativa no desempenho do sistema em comparação com o esquema NOMA cooperativo HD na região de SNR baixa.

O crescimento do número de usuários na rede aumenta a complexidade no processamento de dados. Perante esse desafio, surge a necessidade de otimizar a eficiência energética. Em [90, 91], os autores investigaram um sistema NOMA cooperativo com dois usuários a fim de maximizar a eficiência energética. Neste sistema, não existe uma linha de visada direta entre a BS e o usuário remoto, porém, um *relay* FD dedicado é empregado para auxiliar nessa comunicação. Em [41], os autores assumiram a existência de imperfeições no cancelamento de SI no *relay* e entre os usuários NOMA, ao contrário dos autores em [90] que não levam em consideração essas imperfeições.

Em [91], para aprimorar a eficiência energética, usaram SWIPT no relé FD e um algoritmo de iteração através do método Dinkelbach. Enquanto que em [90], os autores adotaram o método de aproximação interna e a transformação de Charnes-Cooper. Adicionalmente, os resultados obtidos demonstram que ambos os métodos utilizados apresentam uma melhoria significativa no desempenho do sistema.

Em [92], os autores pesquisaram um sistema de transmissão NOMA cooperativo assistido por um *relay* multi-antena FD. Nesse sistema, foram empregados esquemas de formação de feixe ideal para mitigar a interferência entre os usuários e a auto-interferência. Além disso, a interrupção é avaliada tanto em cenários de seleção aleatória quanto na seleção baseada na proximidade dos usuários, levando em consideração o usuário mais próximo e o usuário distante mais próximo. Os resultados da simulação demonstram que a formação de feixe ideal empregada na retransmissão FD garante uma interrupção reduzida, chegando até 63% no segundo cenário mencionado acima, e uma interrupção de até 55% no caso de seleção aleatória do usuário próximo e do usuário aleatório distante em comparação com a retransmissão em HD. Por outro lado, em [93], o sistema coordenado de transmissão direta e por relé (*do inglês: coordinated direct and relay transmission system, CDRT*) FD dedicado assistido por NOMA foi investigado. Nesse sistema, a interrupção é avaliada considerando os efeitos do estado do canal imperfeito e do SIC incorreto. Além disso, para minimizar a interrupção, levando em consideração o CSI, o coeficiente de alocação de energia ótima (*do inglês: optimal power allocation, OPA*) na BS foi derivado. Os resultados obtidos comprovam que uma escolha ótima do coeficiente de OPA pode aprimorar o desempenho do sistema. Adicionalmente, o sistema proposto supera o esquema de alocação de potência de forma aleatória.

Em [94], os autores exploraram o impacto da imperfeição do hardware e do estado do canal imperfeito em redes cooperativas NOMA com múltiplos retransmissores. Nesse sistema, considerou-se o desvanecimento Nakagami-m, trazendo dois cenários de comunicação entre a BS e os usuários. No primeiro cenário o usuário forte consegue receber a sua informação através da BS e do *relay*, diferentemente do usuário distante que recebe a sua informação apenas com a ajuda do *relay*. No segundo cenário, ambos os usuários conseguem receber as suas informações tanto da BS quanto do retransmissor. Além disso, a imperfeição do hardware e no CSI podem afetar negativamente a taxa de transmissão. Os resultados obtidos comprovam que é possível alcançar um desempenho superior no segundo cenário em relação ao primeiro. Adicionalmente, a interrupção pode ser aprimorada com o auxílio do coeficiente de OPA.

2.5 Conclusão Parcial

Neste capítulo, foram discutidos os fundamentos teóricos da comunicação cooperativa e seu modelo de operação. Adicionalmente, foram explorados vários protocolos de retransmissão, tanto fixos quanto adaptativos, e seus respectivos benefícios. Além disso, foram destacadas as vantagens da implementação convencional de NOMA, bem como sua aplicação na comunicação cooperativa.

Capítulo 3

Análise de desempenho do NOMA cooperativo incremental full-duplex

O Neste capítulo é apresentado um protocolo full-duplex incremental (FD-ICN) para o enlace de descida de uma rede de dois usuários com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema de comunicação cooperativa. Neste protocolo, a cooperação é aplicada apenas quando o usuário mais fraco transmite um bit de feedback negativo ou um NACK ao usuário mais forte. Ao utilizar o protocolo incremental, é possível eliminar o problema de diversidade zero para o usuário próximo inerente à comunicação FD. O esquema proposto é analisado em termos da probabilidade de interrupção do par para diferentes valores de auto-interferência residual, fator de alocação de energia e localizações do usuário próximo. Os resultados mostram que o esquema proposto pode superar o HD-ICN e os esquemas NOMA convencionais.

3.1 Modelo de Sistema

Considera-se uma rede *downlink full-duplex* composta por uma estação rádio base, um usuário próximo full-duplex U_1 e um usuário distante U_2 , conforme mostra a 3.1.

O canal de desvanecimento quase estático entre o transmissor i e o receptor j é denotado por h_{ij} , $i \in \{s, 1\}$, $j \in \{1, 2\}$, onde s representa a estação base e $\{1, 2\}$ representa os usuários próximos e distantes, respectivamente. Por outro lado, assumimos que todos os canais sofrem desvanecimento de Rayleigh independente, portanto $|h_{ij}|^2$ segue uma distribuição exponencial com potência média λ_{ij} . A potencia de desvanecimento média é $\lambda_{ij} \triangleq \mathbb{E}[|h_{ij}|^2] \triangleq d_{ij}^{-\nu}$, onde d_{ij} representa a distância entre os usuários i e j e ν é o expoente de perda de caminho ($\nu \geq 2$).

Consideramos o protocolo NOMA Cooperativo incremental proposto em [45] para

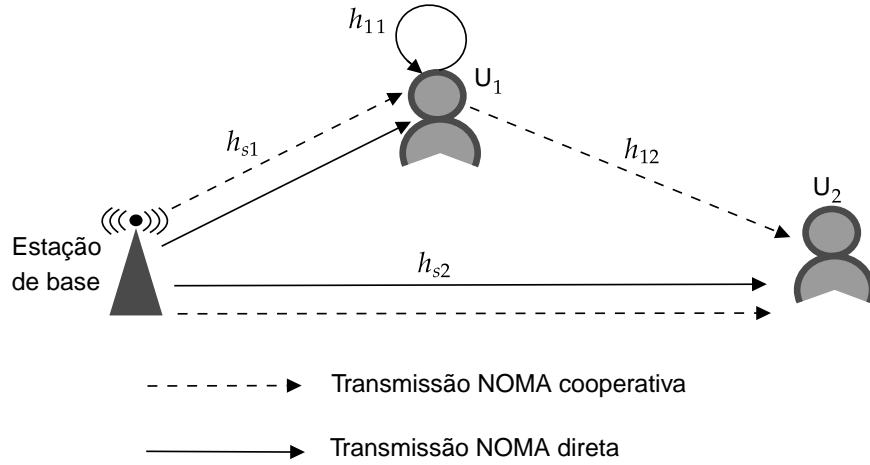


Figura 3.1: Esquema de NOMA cooperativo incremental full-duplex

uma rede NOMA full duplex, na qual a rede pode operar em dois modos, a transmissão direta e a transmissão cooperativa. No entanto, esta escolha é baseada na qualidade do canal h_{s2} . A BS envia um símbolo piloto para U_1 e U_2 , e com base no sinal recebido, U_2 estima h_{s2} . Se U_2 julgar que o canal está em boas condições, então ele envia uma mensagem de confirmação positiva (ACK) tanto para a BS quanto para U_1 , e o modo de transmissão direta NOMA é ativado. Por outro lado, se a condição do canal não for favorável, U_2 envia um reconhecimento negativo (NACK) e a transmissão cooperativa é ativada. Neste caso, U_1 coopera com a BS para entregar a mensagem para U_2 .

3.1.1 Transmissão Direta

Na transmissão direta, a BS envia um sinal sobreposto para U_1 e U_2 . Primeiro, U_1 tenta decodificar o sinal de U_2 com a interferência do seu próprio sinal, depois executa o SIC para remover a interferência e decodificar o seu próprio sinal. O usuário U_2 decodifica seu próprio sinal considerando diretamente a interferência do sinal de U_1 .

No tempo t , o sinal recebido em U_1 e U_2 pode ser expresso, respectivamente, como:

$$y_1[t] = h_{s1} \left(\sqrt{a_1 P} x_1[t] + \sqrt{(1-a_2)P} x_2[t] \right) + n_1[t], \quad (3.1)$$

$$y_2[t] = h_{s2} \left(\sqrt{a_1 P} x_1[t] + \sqrt{(1-a_2)P} x_2[t] \right) + n_2[t], \quad (3.2)$$

onde P é a potência de transmissão, $x_1[t]$ e $x_2[t]$ são as mensagens enviadas pela fonte para U_1 e U_2 respectivamente, a é o fator de alocação de potência, $n_j[t]$ representa o ruído gaussiano branco aditivo complexo no nó j com variância $\sigma_n^2 = N_0$, onde N_0

é a densidade espectral de potência de ruído unilateral. Então $\rho = \frac{P}{N_0}$ é a relação sinal-ruído de transmissão (SNR).

A relação sinal-interferência-ruído (*do inglês: Signal-to-interference-pulse-noise ratio*, SINR) de U_2 decodificada por U_1 é dada por:

$$\gamma_2^1 = \frac{(1 - a_1)\rho |h_{s1}|^2}{a_1\rho |h_{s1}|^2 + 1}, \quad (3.3)$$

enquanto, a relação sinal-ruído (SNR) de U_1 decodificada por U_1 após o processo SIC é:

$$\gamma_1^1 = a_1\rho |h_{s1}|^2. \quad (3.4)$$

A SINR de x_1 decodificada por U_1 considerando o SIC imperfeito é expressa por:

$$\gamma_1^1 = \frac{a_1\rho |h_{s1}|^2}{\beta_1(1 - a_1)\rho |h_{s1}|^2 + 1}, \quad (3.5)$$

onde β_1 representa o fator de SIC imperfeito ($0 < \beta_1 < 1$), $\beta_1 = 0$ representa o SIC perfeito.

Quando o canal do U_2 estiver em ótimas condições, o usuário U_1 , não retransmite o sinal x_2 para U_2 , portanto o sinal x_2 é descartado. No entanto, o usuário U_2 decodifica o sinal x_2 de $y_2[t]$, e a SINR correspondente é expressa por:

$$\gamma_2^2 = \frac{(1 - a_1)\rho |h_{s2}|^2}{a_1\rho |h_{s2}|^2 + 1}, \quad (3.6)$$

3.1.2 Transmissão cooperativa

Para a transmissão cooperativa, a comunicação ocorre em duas fases, na primeira a estação rádio base transmite o sinal sobreposto para ambos os usuários, enquanto que na segunda fase U_1 retransmite o sinal de U_2 , se decodificado corretamente. Ao mesmo tempo, a estação rádio base envia um novo sinal para ambos os usuários. Finalmente, U_2 combina ambos os sinais usando combinação de razão máxima (*do inglês: Maximal ratio combining*, MRC). A auto-interferência residual é modelada como um canal de desvanecimento h_{11} , com potência média λ_{11} .

No tempo t , o sinal recebido em U_1 e U_2 pode ser expresso, respectivamente, como:

$$y_1[t] = h_{s1} \left(\sqrt{a_1 P} x_1[t] + \sqrt{(1-a_2)P} x_2[t] \right) + h_{11} \sqrt{P} x_{11}[t-\tau] + n_1[t], \quad (3.7)$$

$$y_2[t] = h_{s2} \left(\sqrt{a_1 P} x_1[t] + \sqrt{(1-a_2)P} x_2[t] \right) + h_{12} \left(\sqrt{P} x_2[t-\tau] \right) + n_2[t], \quad (3.8)$$

onde $x_{11}[t-\tau]$ é a mensagem enviada por U_1 após um atraso de processamento τ .

A relação sinal-interferência mais ruído (SINR) de U_2 decodificada por U_1 é dada por:

$$\gamma_2^{1-FD} = \frac{(1-a_1)\rho |h_{s1}|^2}{a_1\rho |h_{s1}|^2 + \rho |h_{11}|^2 + 1}. \quad (3.9)$$

Após o processo SIC, U_1 detecta seu próprio sinal, onde o respectivo SINR é dada por:

$$\gamma_1^{1-FD} = \frac{|h_{s1}|^2 a_1 \rho}{|h_{11}|^2 \rho + 1}. \quad (3.10)$$

enquanto, a SINR correspondente à decodificação de x_1 em U_1 , considerando o SIC imperfeito é dada por:

$$\gamma_1^{1-FD} = \frac{a_1 \rho |h_{s1}|^2}{\beta_1 (1-a_1) \rho |h_{s1}|^2 + \rho |h_{11}|^2 + 1}. \quad (3.11)$$

Observe que a auto-interferência em U_1 é levada em consideração em (3.10) e (3.9). Finalmente, o SINR em U_2 após realizar o MRC combinando os sinais dos enlaces direto e cooperativo é dado por:

$$\gamma_2^{2-MRC} = [h_{12}]^2 \rho + \frac{|h_{s2}|^2 (1-a_2) \rho}{|h_{s2}|^2 a_1 \rho + 1}. \quad (3.12)$$

3.2 Análise de desempenho de interrupção

Nesta seção, apresentamos a análise de probabilidade de interrupção para o esquema FD-ICN proposto.

3.2.1 Probabilidade de interrupção do usuário próximo U_1

Para o Protocolo ICN, a probabilidade de interrupção de U_1 é dada por:

$$O_1^{FD-ICN} = 1 - \underbrace{\Pr[\gamma_2^2 \geq \epsilon] \Pr[\gamma_2^1 \geq \epsilon, \gamma_1^1 \geq \epsilon]}_A - \underbrace{\Pr[\gamma_2^2 < \epsilon] \Pr[\gamma_2^{1-FD} \geq \epsilon, \gamma_1^{1-FD} \geq \epsilon]}_B, \quad (3.13)$$

onde $\epsilon = 2^R - 1$ e R é a taxa esperada dos usuários. O termo (A) em (3.13) representa o cenário em que U_2 consegue decodificar seu próprio sinal, assim BS envia um sinal sobreposto sem a ajuda de U_1 . Além disso, U_1 pode decodificar ambos os sinais. O termo (B) em (3.13) representa o cenário em que U_2 não consegue decodificar seu próprio sinal diretamente, assim BS envia um sinal sobreposto e U_1 coopera com a comunicação, atuando como um relé. Neste cenário, U_1 pode decodificar ambos os sinais, mesmo na presença de autointerferência.

Vamos definir cada uma das probabilidades. A probabilidade de U_2 poder decodificar seu próprio sinal é:

$$\Pr[\gamma_2^2 \leq \epsilon] = \begin{cases} e^{\frac{-\epsilon}{\rho\lambda_{s2}(1-a-a\epsilon)}}, & \text{para } a < \frac{1}{1+\epsilon} \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.14)$$

A probabilidade de U_1 poder decodificar ambos os sinais no modo de transmissão direta é dada por:

$$\begin{aligned} & \Pr[\gamma_2^1 \geq \epsilon, \gamma_1^1 \geq \epsilon] \\ &= \Pr\left[|h_{s1}|^2 \geq \frac{\epsilon}{\rho(1-a-\epsilon a)}, |h_{s1}|^2 \geq \frac{\epsilon}{a\rho}\right] \\ &= \begin{cases} e^{\frac{-\epsilon}{\rho\lambda_{s1}a}} & \text{para } 0 < a < \frac{1}{2+\epsilon} \\ e^{\frac{-\epsilon}{\rho\lambda_{s1}(1-a-a\epsilon)}} & \text{para } \frac{1}{2+\epsilon} < a < \frac{1}{1+\epsilon}, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \end{aligned} \quad (3.15)$$

A probabilidade de U_1 conseguir decodificar ambos os sinais no modo de transmissão

cooperativa é [53]:

$$\begin{aligned}
& \Pr [\gamma_2^{1-FD} \geq \epsilon, \gamma_1^{1-FD} \geq \epsilon] \\
&= \Pr \left[|h_{s1}|^2 \geq \frac{\epsilon(1 + |h_{11}|^2 \rho)}{\rho(1 - a - \epsilon a)}, |h_{s1}|^2 \geq \frac{\epsilon(1 + |h_{11}|^2 \rho)}{a\rho} \right] \\
&= \begin{cases} \frac{\lambda_{s1}}{\lambda_{s1} + \lambda_{11}} \frac{\epsilon}{a} e^{\frac{-\epsilon}{\rho \lambda_{s1} a}} & \text{para } 0 < a < \frac{1}{2+\epsilon} \\ \frac{\lambda_{s1}}{\lambda_{s1} + \lambda_{11}} \frac{\epsilon}{(1-a-\epsilon a)} e^{\frac{-\epsilon}{\rho \lambda_{s1} (1-a-\epsilon a)}} & \text{para } \frac{1}{2+\epsilon} < a < \frac{1}{1+\epsilon}, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.16)
\end{aligned}$$

Finalmente, a probabilidade de interrupção do usuário U_1 pode ser escrita substituindo (3.14), (3.15) e (3.16) em (3.13).

3.2.2 Probabilidade de interrupção do usuário distante U_2

A probabilidade de interrupção de U_2 para o protocolo ICN é dada por:

$$\begin{aligned}
O_2^{FD-ICN} &= \underbrace{\Pr [\gamma_2^2 < \epsilon] \Pr [\gamma_2^{1-FD} < \epsilon]}_C \\
&+ \underbrace{\Pr [\gamma_2^{1-FD} \geq \epsilon] \Pr [\gamma_2^2 < \epsilon, \gamma_2^{2-MRC} < \epsilon]}_D. \quad (3.17)
\end{aligned}$$

O termo (C) em (3.17) representa a probabilidade de ambos os usuários não conseguirem decodificar o sinal de U_2 , enquanto o termo (D) em (3.17) representa o cenário onde o modo cooperativo é ativo, U_1 decodifica e retransmite corretamente o sinal correspondente para U_2 , porém, U_2 não consegue decodificar seu próprio sinal executando MRC.

A probabilidade de U_1 conseguir decodificar o sinal de U_2 no modo de transmissão cooperativa é dada por:

$$\begin{aligned}
& \Pr [\gamma_2^{1-FD} \geq \epsilon] \\
&= \Pr \left[|h_{s1}|^2 \geq \frac{\epsilon(1 + |h_{11}|^2 \rho)}{\rho(1 - a - \epsilon a)} \right] \\
&= \begin{cases} \frac{\lambda_{s1}}{\lambda_{s1} + \lambda_{11}} \frac{\epsilon}{(1-a-\epsilon a)} e^{\frac{-\epsilon}{\rho \lambda_{s1} (1-a-\epsilon a)}} & \text{para } a < \frac{1}{1+\epsilon}, \\ 0, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.18)
\end{aligned}$$

A probabilidade do modo cooperativo estar ativo, porém o usuário distante não

$$\begin{aligned}
& \Pr [\gamma_2^2 < \epsilon, \gamma_2^{2-MRC} < \epsilon] \\
&= 1 - e^{\left(-\frac{\epsilon}{\rho\lambda_{s2}(1-a-\epsilon a)}\right)} - \frac{\epsilon}{2\rho\lambda_{s2}(1-a-\epsilon a)} \frac{\pi}{K} \sum_{k=1}^K \sqrt{1 - \epsilon_k^2} e^{-\frac{\epsilon(\epsilon_k+1)(1-a)}{\rho\lambda_{12}(\epsilon_k+1)a+2(1-a-\epsilon a)}} e^{-\frac{\epsilon(\epsilon_k+1)}{2\rho\lambda_{s2}(1-a-\epsilon a)}}
\end{aligned} \tag{3.19}$$

conseguiu decodificar corretamente seu próprio sinal após realizar o MRC é dada por (3.19) [52], onde K é um parâmetro de precisão, $\epsilon_k = \cos\left(\frac{2k-1}{2K}\pi\right)$.

Finalmente, a probabilidade de interrupção de U_2 pode ser escrita substituindo (3.14), (3.18) e (3.19) em (3.17).

A probabilidade de interrupção de U_2 para o protocolo ICN, considerando o seu sinal piloto, é expressa por:

$$\begin{aligned}
O_2^{FD-ICN} &= (1 - \Omega_1) \underbrace{\Pr [\gamma_2^2 < \epsilon]}_E \\
&+ (1 - \Omega_1) \left(\underbrace{\Pr [\gamma_2^2 > \epsilon] \Pr [\gamma_2^{1-FD} < \epsilon]}_F \right. \\
&+ \left. \underbrace{\Pr [\gamma_2^{1-FD} \geq \epsilon] \Pr [\gamma_2^2 < \epsilon, \gamma_2^{2-MRC} < \epsilon]}_G \right) \\
&+ \Omega_1 \left(\underbrace{\Pr [\gamma_2^2 < \epsilon] \Pr [\gamma_2^{1-FD} < \epsilon]}_H \right. \\
&+ \left. \underbrace{\Pr [\gamma_2^{1-FD} \geq \epsilon] \Pr [\gamma_2^2 < \epsilon, \gamma_2^{2-MRC} < \epsilon]}_G \right).
\end{aligned} \tag{3.20}$$

onde Ω_1 representa a probabilidade de decodificar o sinal piloto do usuário U_2 ($0 < \Omega_1 < 1$).

O termo (E) em (3.20) representa a probabilidade de interrupção do usuário U_2 considerando um cenário em que o canal dele está bom, porém está ruim, ou seja a probabilidade de U_2 não conseguir decodificar o seu sinal. Enquanto que, o termo (F) em (3.20) representa o cenário oposto, onde se considera que o canal do usuário U_2 está ruim, mas está ótimo. Por fim, o termo (G) em (3.20) denota o cenário em que o modo cooperativo é ativado, onde o usuário U_1 decodifica e reencaminha o sinal correspondente para U_2 , pois este último não consegue decodificar o seu sinal executando MRC. O termo (H) denota a probabilidade de ambos os usuários não conseguirem decodificar o sinal piloto de U_2 .

3.2.3 Probabilidade de interrupção do par

A probabilidade de interrupção do par (*do inglês: par outage probability*, POP) é uma métrica importante para avaliar a qualidade de serviço (QoS) da rede. A probabilidade de interrupção do par é definida como a probabilidade de pelo menos um usuário não conseguir decodificar corretamente seu próprio sinal e pode ser escrita para o esquema FD-ICN como:

$$O_{\text{par}}^{FD-ICN} = 1 - \Pr[\gamma_2^2 \geq \epsilon] \Pr[\gamma_2^1 \geq \epsilon, \gamma_1^1 \geq \epsilon] - \Pr[\gamma_2^2 < \epsilon, \gamma_2^{2-MRC} \geq \epsilon] \Pr[\gamma_2^{1-FD} \leq \epsilon, \gamma_1^{1-FD} \leq \epsilon]. \quad (3.21)$$

3.3 Resultados Numéricos

Esta seção apresenta alguns resultados numéricos para investigar o desempenho do esquema NOMA cooperativo incremental full-duplex proposto. Além disso, o desempenho do esquema proposto é comparado ao esquema NOMA cooperativo incremental half-duplex analisado em [52] e esquemas NOMA cooperativos convencionais. Nos gráficos, assumimos um expoente de perda de caminho $\nu = 4$, $d_{s1} = d_{12} = \frac{1}{2}$, $d_{s2} = 1$, $d_{11} = 0.1$, a taxa de transmissão secundária tentada é $R = 1$ bit por uso de canal (bpcu), $K = 100$ e $N_0 = 1$.

Fig. 3.2 mostra a probabilidade de interrupção do par para o esquema FD-ICN proposto como uma função do SNR ρ para o fator de alocação de energia $a = 0.2$ e $\lambda_{11} = 0.1$. O desempenho dos esquemas HD-ICN e NOMA cooperativo convencional também é mostrado. Pode-se observar que o esquema proposto supera os esquemas NOMA half-duplex, principalmente em valores mais baixos de ρ , onde o modo de cooperação é predominante. Por esse fato, o full-duplex convencional tem desempenho similar ao do protocolo incremental. No entanto, a probabilidade de interrupção do par satura para grandes valores de SNR como consequência da auto-interferência em U_1 , o que não ocorre para o protocolo incremental. Por fim, os protocolos incrementais tendem a ter desempenhos similares para grandes valores de ρ , pois o modo direto é ativado com maior frequência.

Na Fig. 3.3, as probabilidades de interrupção individuais e do par são analisadas como uma função de ρ para $d_{s1} \in \{0.2, 0.5\}$, $a = 0.2$ e $\lambda_{11} = 0.1$.

As figuras mostram a relevância da probabilidade de interrupção do par como métrica para avaliar o desempenho da rede. Na Fig. 3.3a, U_1 está exatamente na metade da distância entre BS e U_2 , esta é a posição ideal para o revezamento, ou seja, U_2 tem o

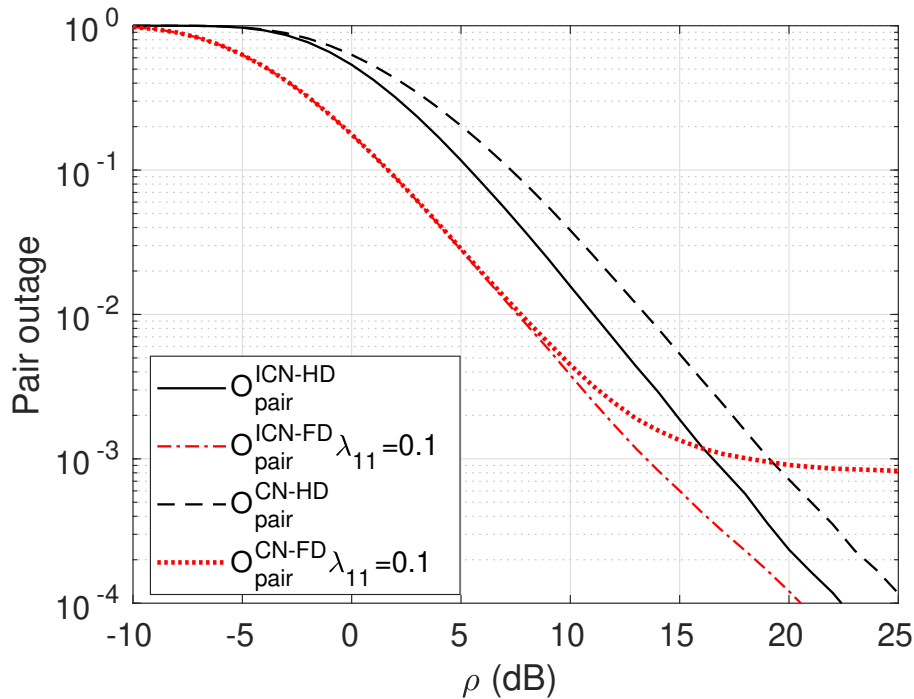
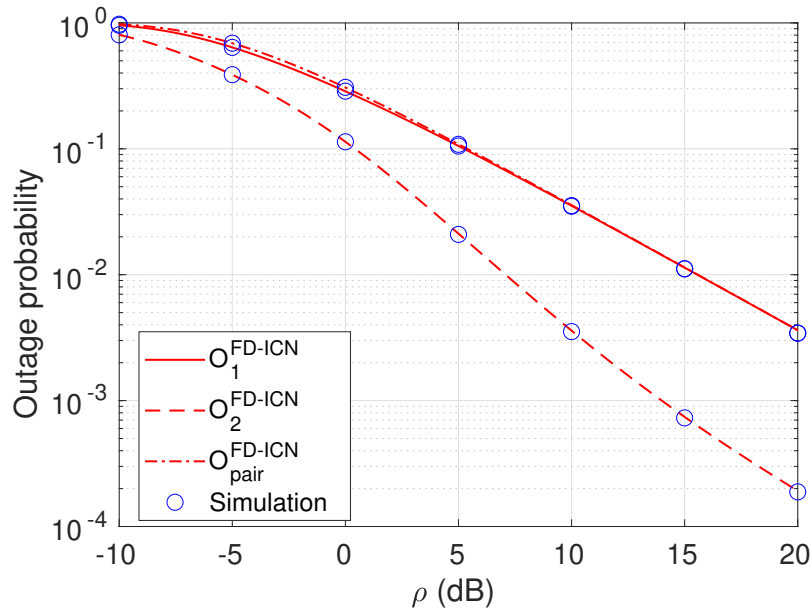


Figura 3.2: Probabilidade de interrupção do par para os esquemas propostos FD-ICN, HD-ICN e NOMA cooperativo convencional em função do SNR ρ .

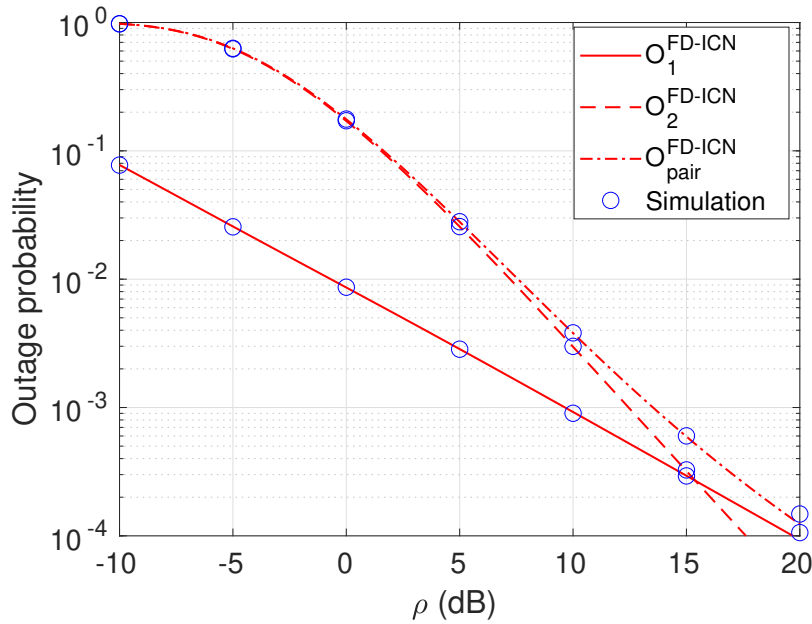
melhor desempenho. No entanto, U_1 tem dificuldade em decodificar seu próprio sinal, o que é demonstrado pela semelhança entre a interrupção do par e a probabilidade de interrupção individual de U_1 . A figura 3.3b mostra o cenário oposto, pois o usuário próximo está mais próximo da BS, neste contexto a probabilidade de interrupção do par tende a ser igual à probabilidade de interrupção individual de U_2 em valores mais baixos de ρ .

A Fig. 3.4 mostra a probabilidade de interrupção do par para os esquemas FD-ICN e HD-ICN propostos como uma função do fator de alocação de energia a para diferentes valores de $\lambda_{11} = \{0.01, 0.1, 1\}$ e $P = 10$ dB. Na Figura 3.4, pode-se notar que o desempenho do esquema FD-ICN aumenta com a eficácia do cancelamento de interferência em U_1 , o que se reflete em valores baixos para λ_{11} . Além disso, para grandes valores de a , há a ocorrência de um passo à medida que a cooperação é ativada mais vezes. Esta etapa é causada pela perda de multiplexação deste esquema.

Fig. 3.5 mostra a probabilidade de interrupção do par para os esquemas FD-ICN e HD-ICN propostos em função da distância entre o BS e U_1 (d_{s1}) e considerando $a = 0.2$, $\lambda_{11} = 0.1$ e $P = 10$ dB. Pela Fig. 3.5 pode-se notar que o FD-ICN proposto tem um melhor desempenho quando o usuário U_1 está mais próximo do BS, já que a interrupção do par é dominada pela interrupção do U_2 , enquanto para $d_{s1} \geq 0.5$, o desempenho de ambos os esquemas é semelhante, pois as falhas na comunicação de



(a) $d_{s1} = 0.5$



(b) $d_{s1} = 0.2$

Figura 3.3: Comparação das probabilidades de interrupção individuais e do par para o esquema FD-ICN proposto em função do SNR ρ .

U_1 têm mais influência na probabilidade de interrupção do par.

Fig. 3.6 mostra a análise da probabilidade de interrupção do usuário U_1 em função da SNR para os esquemas FD-ICN proposto e HD-ICN, considerando o SIC perfeito e imperfeito, onde $a = 0.2$, $\beta_1 \in \{0, 0.1\}$. Observa-se que o esquema FD-ICN proposto supera o esquema HD-ICN em valores de SNR mais baixos. No entanto, em

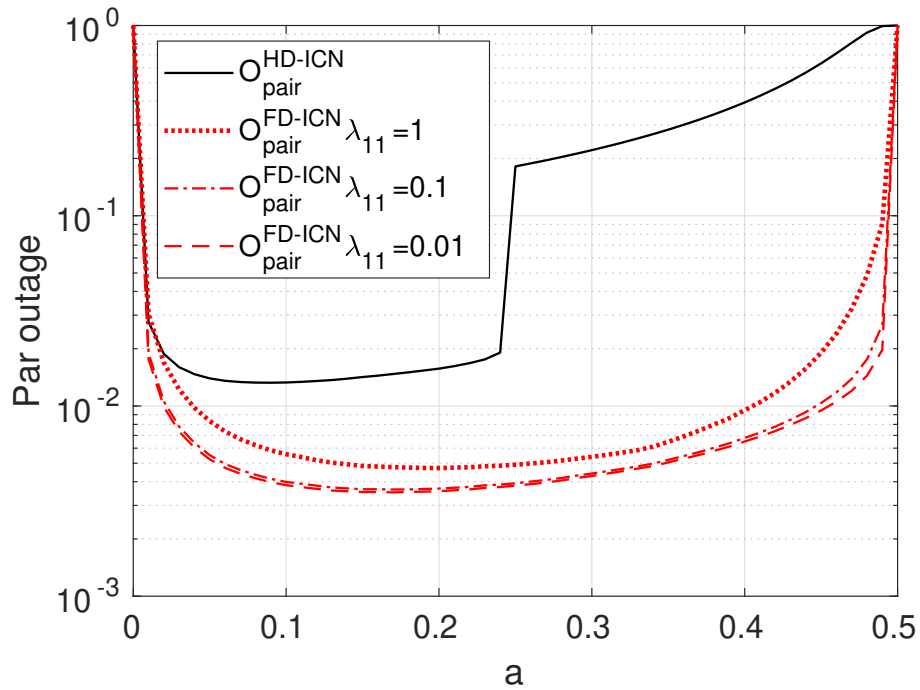


Figura 3.4: Probabilidade de interrupção do par para os esquemas FD-ICN e HD-ICN propostos em função do fator de alocação de potência a .

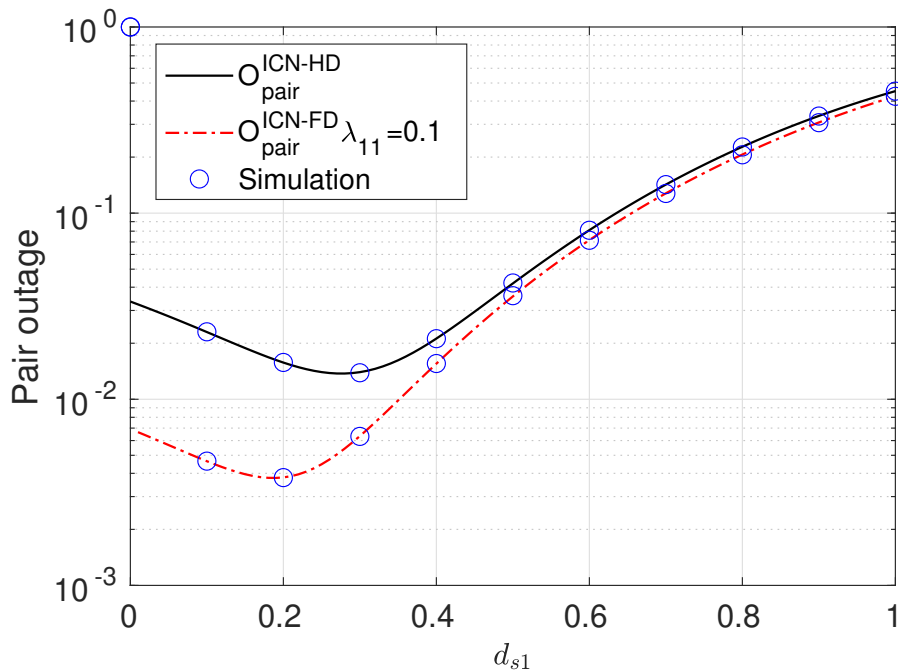


Figura 3.5: Probabilidade de interrupção do par para os esquemas FD-ICN e HD-ICN propostos em função da distância entre a estação base e U_1 (d_{s1}).

valores de SNR mais altos, tanto o esquema FD-ICN proposto quanto o HD-ICN demonstram desempenho similar. Em temas de cancelamento de interferência imperfeito,

observa-se que o HD-ICN tem uma interrupção maior em comparação com o FD-ICN. Por fim, este esquema apresenta uma maior eficácia em termos de cancelamento de interferência em relação ao esquema HD-ICN.

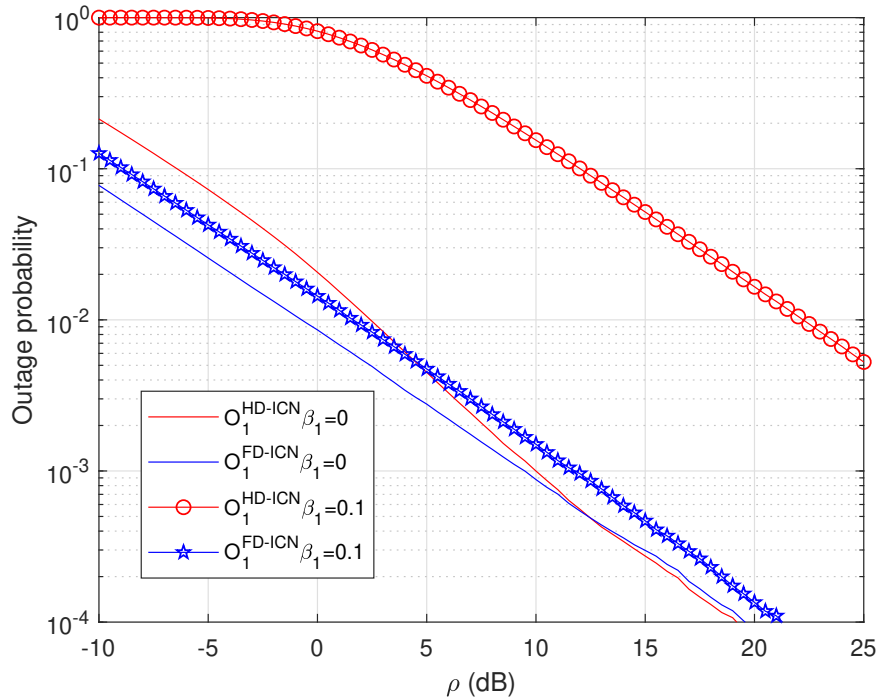


Figura 3.6: Probabilidade de interrupção do usuário U_1 para os esquemas FD-ICN, HD-ICN e NOMA cooperativo convencional propostos em função de SNR.

Fig. 3.7 mostra a análise da probabilidade de interrupção do usuário U_2 em função da SNR para os esquemas FD-ICN proposto e HD-ICN, considerando o sinal piloto do usuário U_2 , onde $a = 0.2$ e $\Omega_1 \in \{0.5, 1\}$. De acordo com os resultados obtidos, o esquema FD-ICN proposto apresenta uma interrupção mais baixa quando o canal do usuário U_2 está em condições ótimas, em comparação com os esquemas HD-ICN.

Tendo em conta o SIC imperfeito, observa-se que o esquema proposto apresenta uma baixa probabilidade de interrupção em valores de SNR mais altos em comparação com o esquema HD-ICN. No entanto, em valores de SNR mais altos, o desempenho entre os dois esquemas é semelhante.

3.4 Conclusão Parcial

Avaliamos o desempenho de um esquema NOMA cooperativo incremental full-duplex. Consideramos que com base no feedback de 1 bit do usuário distante, o sistema pode escolher entre transmissão direta ou transmissão cooperativa, onde o usuário

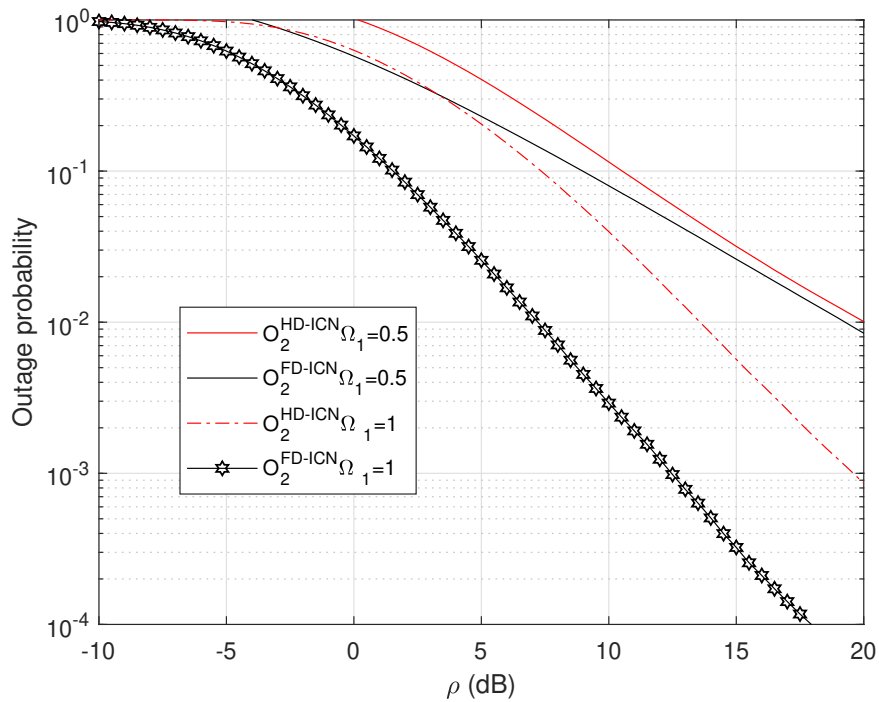


Figura 3.7: Probabilidade de interrupção do usuário U_2 para os esquemas FD-ICN, HD-ICN e NOMA cooperativo convencional propostos em função de SNR.

próximo atua como um relé full-duplex para o usuário distante. No entanto, os resultados demonstram que o esquema proposto supera, em termos de probabilidade de interrupção do par, os esquemas NOMA cooperativo incremental half-duplex e NOMA cooperativo convencional. Além disso, os resultados obtidos na análise da probabilidade de interrupção para ambos os usuários, considerando tanto o SIC perfeito quanto o SIC imperfeito, demonstram que os esquemas incrementais têm melhor desempenho que o NOMA cooperativo convencional.

Capítulo 4

Conclusões e Propostas Para Novas Pesquisas

4.1 Conclusões

O NOMA é uma das tecnologias promissoras para as redes da próxima geração. Esta tecnologia permite o aprimoramento da eficiência espectral, a conectividade massiva e a eficiência energética. Além disso, as redes cooperativas NOMA são fundamentais para melhorar ainda mais a confiabilidade e a justiça entre os usuários. Com base nisso, nessa dissertação, foi proposto um esquema de cooperação incremental full duplex baseado no protocolo NOMA para uma rede de downlink. O desempenho do sistema proposto foi avaliada com base na probabilidade de interrupção individual e do par. Além disso, avaliamos o desempenho do sistema considerando o SIC perfeito e imperfeito do usuário U_1 e a informação do estado do canal do usuário U_2 .

De acordo com a revisão da literatura, pode-se observar que a maioria dos estudos em redes cooperativas não consideram os sistemas incrementais. No Cap. 3, foi analisado o esquema NOMA cooperativo incremental full duplex. Nesse esquema, é possível aprimorar a eficiência espectral, pois a cooperação é aplicada apenas quando necessário através de um bit de feedback negativo. Além disso, a análise baseada na simulação demonstra que é possível alcançar uma interrupção baixa no sistema proposto em comparação com o sistema NOMA cooperativo convencional e o sistema NOMA cooperativo incremental *half duplex*.

4.2 Sugestões de Trabalhos Futuros

Apesar dos benefícios que este trabalho oferece para as comunicações cooperativas, ainda existem muitos problemas abertos que precisam ser abordados. Portanto, como trabalhos futuros, é possível analisar o desempenho de esquemas híbridos NOMA em redes de próxima geração com superfícies inteligentes reconfiguráveis RIS e STAR-RIS. A avaliação do desempenho do sistema considerando os cenários de SIC imperfeito e com a informação do estado do canal imperfeito também é um tema interessante para futuras extensões.

Referências Bibliográficas

- [1] F. Salahdine, T. Han, and N. Zhang, “5g, 6g, and beyond: Recent advances and future challenges,” 2023.
- [2] J. Zhang, J. Li, M. Cai, D. Li, and Q. Wang, “The 5g noma networks planning based on the multi-objective evolutionary algorithm,” in *2020 16th International Conference on Computational Intelligence and Security (CIS)*, 2020, pp. 59–62.
- [3] A. Akbar, S. Jangsher, and F. A. Bhatti, “Noma and 5g emerging technologies: A survey on issues and solution techniques,” *Computer Networks*, vol. 190, p. 107950, 2021. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128621000888>
- [4] E. Raeisidehkordi and H. Bakhshi, “Fairness optimization with guaranteed qos in underlay noma for 5g networks,” in *2020 28th Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)*, 2020, pp. 1–5.
- [5] J. Jiao, X. Sun, L. Fang, and J. Lyu, “An overview of wireless communication technology using deep learning,” *China Communications*, vol. 18, no. 12, pp. 1–36, 2021.
- [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] Y. Chen, P. Zhu, G. He, X. Yan, H. Baligh, and J. Wu, “From connected people, connected things, to connected intelligence,” in *2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT)*, 2020, pp. 1–7.
- [8] M. Giordani, M. Polese, M. Mezzavilla, S. Rangan, and M. Zorzi, “Toward 6g networks: Use cases and technologies,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 58, no. 3, pp. 55–61, 2020.
- [9] M. Z. Chowdhury, M. Shahjalal, S. Ahmed, and Y. M. Jang, “6g wireless communication systems: Applications, requirements, technologies, challenges, and research directions,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 1,

- pp. 957–975, 2020.
- [10] K. David and H. Berndt, “6g vision and requirements: Is there any need for beyond 5g?” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 13, no. 3, pp. 72–80, 2018.
- [11] T. Nakamura, “5g evolution and 6g,” in *2020 IEEE Symposium on VLSI Technology*, 2020, pp. 1–5.
- [12] S. Chen, Y.-C. Liang, S. Sun, S. Kang, W. Cheng, and M. Peng, “Vision, requirements, and technology trend of 6g: How to tackle the challenges of system coverage, capacity, user data-rate and movement speed,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 2, pp. 218–228, 2020.
- [13] M. Höyhty, S. Boumard, A. Yastrebova, P. Järvensivu, M. Kiviranta, and A. Anttonen, “Sustainable satellite communications in the 6g era: A european view for multilayer systems and space safety,” *IEEE Access*, vol. 10, pp. 99 973–100 005, 2022.
- [14] T. Huang, W. Yang, J. Wu, J. Ma, X. Zhang, and D. Zhang, “A survey on green 6g network: Architecture and technologies,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 175 758–175 768, 2019.
- [15] Z. Zhang, L. Dai, X. Chen, C. Liu, F. Yang, R. Schober, and H. V. Poor, “Active ris vs. passive ris: Which will prevail in 6g?” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 71, no. 3, pp. 1707–1725, 2023.
- [16] N. Chi, Y. Zhou, Y. Wei, and F. Hu, “Visible light communication in 6g: Advances, challenges, and prospects,” *IEEE Vehicular Technology Magazine*, vol. 15, no. 4, pp. 93–102, 2020.
- [17] A. A. Amin and S. Y. Shin, “Capacity analysis of cooperative noma-oam-mimo based full-duplex relaying for 6g,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 7, pp. 1395–1399, 2021.
- [18] B. Smida, A. Sabharwal, G. Fodor, G. C. Alexandropoulos, H. A. Suraweera, and C.-B. Chae, “Full-duplex wireless for 6g: Progress brings new opportunities and challenges,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, pp. 1–1, 2023.
- [19] Y. Liu, J. Xu, Z. Wang, X. Mu, J. Zhang, and P. Zhang, “Simultaneously transmitting and reflecting (star) ris for 6g: Fundamentals, recent advances, and future directions,” 2023.
- [20] A. Nosratinia, T. Hunter, and A. Hedayat, “Cooperative communication in wireless networks,” *IEEE Communications Magazine*, vol. 42, no. 10, pp. 74–80, 2004.

- [21] N. Ashraf, S. A. Sheikh, S. A. Khan, I. Shayea, and M. Jalal, “Simultaneous wireless information and power transfer with cooperative relaying for next-generation wireless networks: A review,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 71 482–71 504, 2021.
- [22] A. Sendonaris, E. Erkip, and B. Aazhang, “User cooperation diversity. part i. system description,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 51, no. 11, pp. 1927–1938, 2003.
- [23] Y. Liu, X.-G. Xia, and H. Zhang, “Distributed space-time coding for full-duplex asynchronous cooperative communications,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 7, pp. 2680–2688, 2012.
- [24] T. Riihonen, S. Werner, and R. Wichman, “Hybrid full-duplex/half-duplex relaying with transmit power adaptation,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 9, pp. 3074–3085, 2011.
- [25] M. Duarte, C. Dick, and A. Sabharwal, “Experiment-driven characterization of full-duplex wireless systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 11, no. 12, pp. 4296–4307, 2012.
- [26] L. Dai, B. Wang, Y. Yuan, S. Han, I. Chih-lin, 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.
- [27] M. Rebhi, K. Hassan, K. Raouf, and P. Chargé, “Sparse code multiple access: Potentials and challenges,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 1205–1238, 2021.
- [28] P. N. Thakre and S. B. Pokle, “A survey on power allocation in pd-noma for 5g wireless communication systems,” in *2022 10th International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology - Signal and Information Processing (ICETET-SIP-22)*, 2022, pp. 1–5.
- [29] J. Choi, “On the power allocation for mimo-noma systems with layered transmissions,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 5, pp. 3226–3237, 2016.
- [30] Z. Ding, F. Adachi, and H. V. Poor, “The application of mimo to non-orthogonal multiple access,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 15, no. 1, pp. 537–552, 2016.
- [31] 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.
- [32] W. Liu, J. Ding, J. Zheng, X. Chen, and C.-L. I, “Relay-assisted technology in

- optical wireless communications: A survey,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 194 384–194 409, 2020.
- [33] Y. Liu, S. Zhang, X. Mu, Z. Ding, R. Schober, N. Al-Dhahir, E. Hossain, and X. Shen, “Evolution of noma toward next generation multiple access (ngma) for 6g,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 40, no. 4, pp. 1037–1071, 2022.
- [34] O. Abbasi, A. Ebrahimi, and N. Mokari, “Noma inspired cooperative relaying system using an af relay,” *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 8, no. 1, pp. 261–264, 2019.
- [35] J. Laneman, D. Tse, and G. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, 2004.
- [36] X. Chen, G. Liu, Z. Ma, X. Zhang, P. Fan, S. Chen, and F. R. Yu, “When full duplex wireless meets non-orthogonal multiple access: Opportunities and challenges,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 26, no. 4, pp. 148–155, 2019.
- [37] L. Zhang, J. Liu, M. Xiao, G. Wu, Y.-C. 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.
- [38] X. Yue, Y. Liu, S. Kang, A. Nallanathan, and Z. Ding, “Exploiting full/half-duplex user relaying in noma systems,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 2, pp. 560–575, 2018.
- [39] H. Huang and M. Zhu, “Energy efficiency maximization design for full-duplex cooperative noma systems with swipt,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 20 442–20 451, 2019.
- [40] Y. Liu, Z. Ding, M. Eikashlan, and H. V. Poor, “Cooperative non-orthogonal multiple access in 5g systems with swipt,” in *2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2015, pp. 1999–2003.
- [41] S. S. Ikki and M. H. Ahmed, “Performance analysis of cooperative diversity with incremental-best-relay technique over rayleigh fading channels,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 59, no. 8, pp. 2152–2161, 2011.
- [42] Y. Liu, Y. Ye, H. Ding, F. Gao, and H. Yang, “Outage performance analysis for swipt-based incremental cooperative noma networks with non-linear harvester,” *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 2, pp. 287–291, 2020.
- [43] K. Reshma and A. V. Babu, “Throughput analysis of energy harvesting ena-

- bled incremental relaying noma system,” *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 7, pp. 1419–1423, 2020.
- [44] S. Li, J. Liu, L. Bariah, S. Muhaidat, A. Wang, and J. Liang, “Noma-based user cooperation with incremental hybrid forwarding protocols,” *IEEE Open Journal of the Communications Society*, vol. 2, pp. 2536–2546, 2021.
- [45] G. Li, D. Mishra, and H. Jiang, “Cooperative noma with incremental relaying: Performance analysis and optimization,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 67, no. 11, pp. 11 291–11 295, 2018.
- [46] P. Murphy and A. Sabharwal, “Design, implementation, and characterization of a cooperative communications system,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 60, no. 6, pp. 2534–2544, 2011.
- [47] A. Mahmood, “Cooperative diversity in wireless networks engineering science and technology review ”the increasing demand for wireless multimedia and interactive,” *Journal of Engineering Science and Technology Review*, vol. 3, pp. 184–187, 2010. [Online]. Available: www.jestr.org
- [48] 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.
- [49] Y.-w. Hong, W.-j. Huang, F.-h. Chiu, and C.-c. J. Kuo, “Cooperative communications in resource-constrained wireless networks,” *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, no. 3, pp. 47–57, 2007.
- [50] O. Narmanlioglu, R. C. Kizilirmak, F. Miramirkhani, and M. Uysal, “Cooperative visible light communications with full-duplex relaying,” *IEEE Photonics Journal*, vol. 9, no. 3, pp. 1–11, 2017.
- [51] W. U. Khan, M. A. Jamshed, E. Lagunas, S. Chatzinotas, X. Li, and B. Ottersten, “Energy efficiency optimization for backscatter enhanced noma cooperative v2x communications under imperfect csi,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 11, pp. 12 961–12 972, 2023.
- [52] C. Tatino, N. Pappas, I. Malanchini, L. Ewe, and D. Yuan, “On the benefits of network-level cooperation in millimeter-wave communications,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 9, pp. 4408–4424, 2019.
- [53] K. B. Letaief and W. Zhang, “Cooperative communications for cognitive radio networks,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 878–893, 2009.
- [54] J. Laneman, D. Tse, and G. Wornell, “Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior,” *IEEE Transactions on Information The-*

- ory, vol. 50, no. 12, pp. 3062–3080, 2004.
- [55] M. Katz and S. Shamai, “Relaying protocols for two colocated users,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 52, no. 6, pp. 2329–2344, 2006.
- [56] S. Pahuja and P. Jindal, “Cooperative communication in physical layer security: Technologies and challenges,” pp. 811–837, 9 2019.
- [57] T. T. Duy and H. Y. Kong, “On performance evaluation of hybrid decode-amplify-forward relaying protocol with partial relay selection in underlay cognitive networks,” *Journal of Communications and Networks*, vol. 16, no. 5, pp. 502–511, 2014.
- [58] M. Yu, J. Li, and H. Sadjadpour, “Amplify-forward and decode-forward: the impact of location and capacity contour,” in *MILCOM 2005 - 2005 IEEE Military Communications Conference*, 2005, pp. 1609–1615 Vol. 3.
- [59] D. Chen, K. Azarian, and J. N. Laneman, “A case for amplify-forward relaying in the block-fading multiple-access channel,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 54, no. 8, pp. 3728–3733, 2008.
- [60] S. S. Ikki and M. H. Ahmed, “Performance analysis of decode-and-forward incremental relaying cooperative-diversity networks over rayleigh fading channels,” in *VTC Spring 2009 - IEEE 69th Vehicular Technology Conference*, 2009, pp. 1–6.
- [61] T. Riihonen, S. Werner, and R. Wichman, “Hybrid full-duplex/half-duplex relaying with transmit power adaptation,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 10, no. 9, pp. 3074–3085, 2011.
- [62] K. Yang, H. Cui, L. Song, and Y. Li, “Joint relay and antenna selection for full-duplex af relay networks,” in *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2014, pp. 4454–4459.
- [63] H. Alves, G. Brante, R. Demo Souza, D. B. da Costa, and M. Latva-aho, “On the performance of full-duplex relaying under phy security constraints,” in *2014 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2014, pp. 3978–3981.
- [64] Z. Chen, T. Q. S. Quek, and Y.-C. Liang, “Spectral efficiency and relay energy efficiency of full-duplex relay channel,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 5, pp. 3162–3175, 2017.
- [65] Z. Tong and M. Haenggi, “Throughput analysis for full-duplex wireless networks with imperfect self-interference cancellation,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 11, pp. 4490–4500, 2015.
- [66] H.-F. Arraño-Scharager, M. Coupechoux, and J.-M. Kélif, “A sic-based bs coor-

- dination scheme for full duplex cellular networks,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 70, no. 2, pp. 1043–1057, 2022.
- [67] A. Benjebbour and Y. Kishiyama, “Combination of noma and mimo: Concept and experimental trials,” in *2018 25th International Conference on Telecommunications (ICT)*, 2018, pp. 433–438.
- [68] W. Ahsan, W. Yi, Z. Qin, Y. Liu, and A. Nallanathan, “Resource allocation in uplink noma-iot networks: A reinforcement-learning approach,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 20, no. 8, pp. 5083–5098, 2021.
- [69] E. M. Almohimmah and M. T. Alresheedi, “Error analysis of noma-based vlc systems with higher order modulation schemes,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 2792–2803, 2020.
- [70] R. Abozariba, M. K. Naeem, M. Patwary, M. Seyedebrahimi, P. Bull, and A. Aneiba, “Noma-based resource allocation and mobility enhancement framework for iot in next generation cellular networks,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 29 158–29 172, 2019.
- [71] P. V. Reddy, S. Reddy, S. Reddy, R. D. Sawale, P. Narendar, C. Duggineni, and H. B. Valiveti, “Analytical review on oma vs. noma and challenges implementing noma,” in *2021 2nd International Conference on Smart Electronics and Communication (ICOSEC)*, 2021, pp. 552–556.
- [72] H. Al-Obiedollah, K. Cumanan, A. G. Burr, J. Tang, Y. Rahulamathavan, Z. Ding, and O. A. Dobre, “On energy harvesting of hybrid tdma-noma systems,” in *2019 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, 2019, pp. 1–6.
- [73] X. Yue, Z. Qin, Y. Liu, S. Kang, and Y. Chen, “A unified framework for non-orthogonal multiple access,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 66, no. 11, pp. 5346–5359, 2018.
- [74] I. Al-Musawi, W. Al-Hussaibi, Y. H. Tahir, and F. Ali, “Chaos-based secure power-domain noma for wireless applications,” in *2020 23rd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, 2020, pp. 1–6.
- [75] Z. Ding, R. Schober, and H. V. Poor, “Unveiling the importance of sic in noma systems—part ii: New results and future directions,” *IEEE Communications Letters*, vol. 24, no. 11, pp. 2378–2382, 2020.
- [76] S. Li, M. Derakhshani, and S. Lambotharan, “Outage-constrained robust power allocation for downlink mc-noma with imperfect sic,” in *2018 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2018, pp. 1–7.

- [77] S. M. R. Islam, M. Zeng, O. A. Dobre, and K.-S. Kwak, “Non-orthogonal multiple access (noma): How it meets 5g and beyond,” 2019.
- [78] Z. Wei, J. Guo, D. W. K. Ng, and J. Yuan, “Fairness comparison of uplink noma and oma,” in *2017 IEEE 85th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2017, pp. 1–6.
- [79] Y. Liu, Z. Qin, M. ElKashlan, Z. Ding, A. Nallanathan, and L. Hanzo, “Nonorthogonal multiple access for 5g and beyond,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 105, no. 12, pp. 2347–2381, 2017.
- [80] U. Ghafoor, M. Ali, H. Z. Khan, A. M. Siddiqui, and M. Naeem, “Noma and future 5g & b5g wireless networks: A paradigm,” *Journal of Network and Computer Applications*, vol. 204, p. 103413, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804522000728>
- [81] Y. Li, Y. Li, X. Chu, Y. Ye, and H. Zhang, “Performance analysis of relay selection in cooperative noma networks,” *IEEE Communications Letters*, vol. 23, no. 4, pp. 760–763, 2019.
- [82] 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.
- [83] S. Pahuja and P. Jindal, “Cooperative communication in physical layer security: Technologies and challenges,” pp. 811–837, 9 2019.
- [84] 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.
- [85] Y. Yuan, Y. Xu, Z. Yang, P. Xu, and Z. Ding, “Energy efficiency optimization in full-duplex user-aided cooperative swipt noma systems,” *IEEE Transactions on Communications*, vol. 67, no. 8, pp. 5753–5767, 2019.
- [86] Y. Liu, Z. Ding, M. ElKashlan, and H. V. Poor, “Cooperative non-orthogonal multiple access in 5g systems with swipt,” in *2015 23rd European Signal Processing Conference (EUSIPCO)*, 2015, pp. 1999–2003.
- [87] Y. Liu, Z. Ding, M. ElKashlan, and H. V. Poor, “Cooperative non-orthogonal multiple access with simultaneous wireless information and power transfer,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 4, pp. 938–953, 2016.
- [88] 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.

- [89] 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.
- [90] H. Huang and M. Zhu, “Energy efficiency maximization design for full-duplex cooperative noma systems with swipt,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 20 442–20 451, 2019.
- [91] S. V. Nambiar Aredath, A. Babu, and S. Poornima, “Optimal power allocation for maximizing the energy efficiency of noma enabled full-duplex coordinated direct and relay transmission (cdrt) system with swipt,” *Physical Communication*, vol. 55, p. 101894, 2022. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1874490722001719>
- [92] Z. Mobini, M. Mohammadi, B. K. Chalise, H. A. Suraweera, and Z. Ding, “Beamforming design and performance analysis of full-duplex cooperative noma systems,” *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 6, pp. 3295–3311, 2019.
- [93] V. Aswathi and A. V. Babu, “Full/half duplex cooperative noma under imperfect successive interference cancellation and channel state estimation errors,” *IEEE Access*, vol. 7, pp. 179 961–179 984, 2019.
- [94] X. Li, M. Liu, D. Deng, J. Li, C. Deng, and Q. Yu, “Power beacon assisted wireless power cooperative relaying using noma with hardware impairments and imperfect csi,” *AEU - International Journal of Electronics and Communications*, vol. 108, pp. 275–286, 2019. [Online]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1434841118332278>