



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CAMPUS SOBRAL**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE**  
**COMPUTAÇÃO**  
**MESTRADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE COMPUTAÇÃO**

**JOAB COSTA RODRIGUES LIMA**

**ANÁLISE DE SISTEMA MIMO-NOMA COOPERATIVO COM SELEÇÃO DE**  
**ANTENA E RETRANSMISSÃO DF**

**SOBRAL**

**2020**

JOAB COSTA RODRIGUES LIMA

ANÁLISE DE SISTEMA MIMO-NOMA COOPERATIVO COM SELEÇÃO DE ANTENA E  
RETRANSMISSÃO DF

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

Orientador: Prof. Dr. Daniel Benevides da Costa

SOBRAL

2020

A Deus, à minha amada esposa Jéssica e a minha família, por estarem sempre ao meu lado e serem o meu alicerce durante esta longa jornada.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus, que durante toda minha vida me presenteou com suas bênçãos e me concedeu saúde, força, confiança e sabedoria para que eu pudesse concluir essa fase importante da minha vida e da minha carreira.

Agradeço a minha esposa, pelo incentivo, pela paciência, pelo companheirismo e por abraçar junto comigo esta meta.

Agradeço a toda a minha família, em especial aos meus pais, que sempre me ensinaram o valor do conhecimento e me apoiaram em todos os momentos.

Aos meu irmãos, agradeço por todo amor e carinho dedicados durante esta trajetória.

Ao meu orientador, Daniel Benevides da Costa, pelo comprometimento e paciência no desenvolvimento desse trabalho e pela orientação dedicada para que ele pudesse ser concluído com êxito.

Por fim, agradeço ao corpo docente e discente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação da UFC Campus Sobral, pela disponibilidade e ensinamentos que contribuíram para minha formação ao longo destes anos no curso de mestrado.

## RESUMO

Alguns dos principais desafios enfrentados pelas redes móveis de futura geração é a melhoria da eficiência espectral e conectividade massiva, exigidos pela crescente demanda de internet móvel e internet das coisas (IoT). Esses requisitos são difíceis de serem atendidos com os esquemas convencionais de acesso múltiplo ortogonal. O acesso múltiplo não ortogonal (NOMA) surgiu como um esquema de acesso múltiplo promissor para melhorar ainda mais a eficiência no uso do espectro, acomodando mais usuários por meio da alocação de recursos não ortogonais. Nesta dissertação, é apresentada uma pesquisa abrangente sobre as principais teorias do NOMA para as futuras gerações de redes móveis. Além disso, é realizada uma análise do desempenho de um sistema NOMA cooperativo com múltiplas antenas para a transmissão e recepção das informações. Em particular, uma estação base utiliza a técnica de codificação por superposição para se comunicar simultaneamente com um par de usuários através da ajuda de um *relay* do tipo decodifica-e-encaminha. O esquema de seleção de antena transmissora e a técnica de combinação por seleção são empregadas na estação base e nos usuários, respectivamente. Expressões em forma fechada para a probabilidade de *outage* são obtidas e, através delas, uma análise assintótica é realizada. Simulações numéricas são apresentadas com o intuito de investigar o efeito do número de antenas, coeficientes de alocação de potência, bem como a distância entre os terminais e a análise da taxa de dados no desempenho sistêmico, para validar os resultados analíticos. Uma rede NOMA inspirada em rádio cognitivo também é estudada, em que a QoS do usuário com piores condições de canal é garantida. A probabilidade de *outage* do usuário secundário é avaliada e resultados de simulação são realizados para corroborar com as análises teóricas. Os resultados demonstram a superioridade do NOMA em relação aos diferentes cenários propostos.

**Palavras-chave:** Acesso múltiplo não-ortogonal. Cancelamento sucessivo de interferência. Codificação por superposição. Cooperação. Múltiplas antenas. Probabilidade de *outage*.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema NOMA de <i>downlink</i> e <i>uplink</i> para 2 usuários. . . . .	27
Figura 2 – Esquema OMA de <i>downlink</i> para 2 usuários. . . . .	28
Figura 3 – Esquema NOMA com MIMO <i>beamforming</i> . . . . .	30
Figura 4 – Esquema MIMO-NOMA com seleção de antena. . . . .	32
Figura 5 – Esquema de duas formas de NOMA cooperativo. . . . .	34
Figura 6 – Sistema MIMO-NOMA cooperativo com <i>relay</i> dedicado DF. . . . .	53
Figura 7 – Probabilidade de <i>outage</i> vs SNR. Comparação entre os protocolos MIMO-NOMA e MIMO-OMA com e sem cooperação. . . . .	66
Figura 8 – Probabilidade de <i>outage</i> vs SNR para $M = 3$ e $N = 3$ , $d_{sr} = 0,5$ , $d_1 = 1,5$ e $d_2 = 0,5$ . Variação dos coeficientes de alocação de potência fixa. . . . .	68
Figura 9 – Probabilidade de <i>outage</i> vs SNR para um sistema MIMO-NOMA cooperativo com $a_1 = b_1 = 0,8$ e $a_2 = b_2 = 0,2$ , $d_{sr} = 0,5$ , $d_1 = 1,5$ e $d_2 = 0,5$ . Variação do número de antenas de transmissão e recepção. . . . .	69
Figura 10 – Probabilidade de <i>outage</i> vs SNR para $M = 3$ e $N = 3$ , $a_1 = b_1 = 0,8$ e $a_2 = b_2 = 0,2$ . Variação do posicionamento do usuário 1 com relação a BS. . . . .	70
Figura 11 – Probabilidade de <i>outage</i> vs Distância entre S e R para $\rho_R = \rho_S = \rho = 20$ dB e $a_1 = b_1 = 0,8$ e $a_2 = b_2 = 0,2$ . Variação do posicionamento do <i>relay</i> em relação a BS. . . . .	71
Figura 12 – SNR vs Taxa de Transmissão para $M = 3$ e $N = 3$ e $a_1 = b_1 = 0,8$ e $a_2 = b_2 = 0,2$ . Análise da taxa de dados para os sistemas MIMO-NOMA e MIMO-OMA com e sem cooperação. . . . .	72
Figura 13 – SNR vs Probabilidade de <i>outage</i> para $I = 1$ dB. Impacto do número de antenas em um sistema CR-NOMA. . . . .	73
Figura 14 – SNR vs Probabilidade de <i>outage</i> para $M = 3$ e $N = 3$ . Comparação entre o <i>Non-Orthogonal Multiple Access</i> (NOMA) com alocação de potência fixa e o CR-NOMA. . . . .	73
Figura 15 – SNR vs Probabilidade de <i>outage</i> para $M = 3$ e $N = 3$ . Variação dos coeficientes de alocação de potência fixa no NOMA vs a variação da <i>Signal-to-Interference and Noise Ratio</i> (SINR) alvo para U1 no CR-NOMA. . . . .	75

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
AF	<i>Amplify-and-Forward</i>
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
BS	<i>Base Station</i>
CDF	<i>Cumulative Distribution Function</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CR	<i>Cognitive Radio</i>
CSI	<i>Channel State Information</i>
D2D	<i>Device-to-Device</i>
DF	<i>Decode-and-Forward</i>
EH	<i>Energy Harvesting</i>
FCC	<i>Federal Communications Commission</i>
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i>
IoT	<i>Internet of Things</i>
MIMO	<i>Multiple-Input and Multiple-Output</i>
mmWave	<i>Milimeter Wave</i>
NOMA	<i>Non-Orthogonal Multiple Access</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OMA	<i>Orthogonal Multiple Access</i>
OWC	<i>Optical Wireless Communication</i>
P2P	<i>Peer-to-Peer</i>
PDF	<i>Probability Density Function</i>
PLS	<i>Physical Layer Security</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
SC	<i>Selection Combining</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SIC	<i>Successive Interference Cancellation</i>
SINR	<i>Signal-to-Interference and Noise Ratio</i>
SISO	<i>Single-Input and Single-Output</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SWIPT	<i>Simultaneous Wireless Information and Power Transfer</i>

TAS	<i>Transmit Antenna Selection</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
UWB	<i>Ultra WideBand</i>
VLC	<i>Visible Light Communication</i>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>1.1</b>	<b>Revisão de literatura</b>	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>Motivação e objetivos</b>	<b>14</b>
<b>1.3</b>	<b>Produção Científica</b>	<b>15</b>
<b>1.4</b>	<b>Estrutura do trabalho</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>ACESSO MÚLTIPLO NÃO ORTOGONAL (NOMA)</b>	<b>17</b>
<b>2.1</b>	<b>Introdução</b>	<b>17</b>
<b>2.2</b>	<b>Vantagens do NOMA</b>	<b>18</b>
<b>2.3</b>	<b>Conceitos Básicos do NOMA</b>	<b>20</b>
<b>2.4</b>	<b>Princípios do Funcionamento do NOMA</b>	<b>22</b>
<b>2.4.1</b>	<i>Transmissão NOMA Downlink</i>	<b>22</b>
<b>2.4.2</b>	<i>Transmissão NOMA Uplink</i>	<b>24</b>
<b>2.4.3</b>	<i>Diferenças entre NOMA Downlink e Uplink</i>	<b>25</b>
<b>2.4.4</b>	<i>Esquema Básico Considerando 2 Usuários</i>	<b>26</b>
<b>2.5</b>	<b>NOMA com Múltiplas Antenas</b>	<b>28</b>
<b>2.5.1</b>	<i>NOMA com Formatação de Feixe (Beamforming)</i>	<b>29</b>
<b>2.5.2</b>	<i>NOMA com Multiplexação Espacial</i>	<b>31</b>
<b>2.5.3</b>	<i>NOMA com MIMO Massivo</i>	<b>31</b>
<b>2.5.4</b>	<i>NOMA com Seleção de Antena de Transmissão (TAS)</i>	<b>31</b>
<b>2.6</b>	<b>NOMA e as Comunicações Cooperativas</b>	<b>33</b>
<b>2.6.1</b>	<i>Cooperação entre Usuários do NOMA</i>	<b>33</b>
<b>2.6.2</b>	<i>NOMA com Relays Dedicados</i>	<b>35</b>
<b>2.7</b>	<b>NOMA e Outras Tecnologias</b>	<b>36</b>
<b>2.7.1</b>	<i>NOMA e Rádio Cognitivo</i>	<b>37</b>
<b>2.7.2</b>	<i>NOMA em Comunicações Milimétricas (mmWave)</i>	<b>39</b>
<b>2.7.3</b>	<i>NOMA e Redes Heterogêneas</i>	<b>41</b>
<b>2.7.4</b>	<i>NOMA e SWIPT</i>	<b>42</b>
<b>2.7.5</b>	<i>NOMA e Comunicação por Luz Visível</i>	<b>43</b>
<b>2.7.6</b>	<i>NOMA e Comunicação D2D</i>	<b>43</b>
<b>2.8</b>	<b>Desafios e Tendências do NOMA</b>	<b>44</b>

2.8.1	<i>Propagação de Erros no SIC</i>	44
2.8.2	<i>Transmissão NOMA Multicelular</i>	45
2.8.3	<i>Agrupamento de Usuários</i>	46
2.8.4	<i>Alocação de potência</i>	47
2.8.5	<i>CSI Imperfeito e Erro de Estimativa de Canal</i>	47
2.8.6	<i>Segurança no NOMA</i>	48
2.8.7	<i>Desenvolvimento de hardware</i>	50
3	<b>MIMO-NOMA COOPERATIVO</b>	51
3.1	Notações	51
3.2	Modelo Sistêmico	51
3.3	Probabilidade de Outage	55
3.4	Probabilidade de Outage Assintótica	57
3.5	NOMA Inspirado em Rádio Cognitivo	58
4	<b>RESULTADOS</b>	65
4.1	Resultados Numéricos e Discussões	65
4.1.1	<i>Impacto dos coeficientes de alocação de potência</i>	66
4.1.2	<i>Impacto do número de antenas</i>	67
4.1.3	<i>Impacto da posição do Usuário 1</i>	68
4.1.4	<i>Impacto da localização do relay</i>	69
4.1.5	<i>Análise da taxa de dados</i>	70
4.1.6	<i>Análise do CR-NOMA</i>	71
5	<b>CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS</b>	76
	<b>REFERÊNCIAS</b>	79

## 1 INTRODUÇÃO

Os esquemas de acesso múltiplo foram considerados os fatores-chaves para definir cada geração dos sistemas de comunicação móvel desde a primeira até a quarta geração (1G ao 4G). Para 1G, a modulação de frequência analógica foi usada através do acesso múltiplo por divisão em frequência, do inglês *Frequency Division Multiple Access* (FDMA). Para o 2G, a modulação digital era empregada com base na multiplexação do tempo através da tecnologia de acesso múltiplo por divisão no tempo, do inglês *Time Division Multiple Access* (TDMA), em conjunto com o FDMA. O 3G empregou a tecnologia de acesso múltiplo por divisão de código, do inglês *Code Division Multiple Access* (CDMA), que utiliza sequências de espalhamento ortogonais para o acesso de diferentes usuários. Nos sistemas 4G, o acesso múltiplo com base no acesso múltiplo ortogonal por divisão em frequência, do inglês *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) e no FDMA de portadora única, do inglês *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA), foram utilizados para melhorar a eficiência espectral e permitir a conexão dos usuários. Desde as chamadas telefônicas analógicas até os serviços atuais de internet, incluindo voz e mensagens, cada geração foi incentivada pela necessidade de atender aos requisitos da nova geração dos sistemas móveis. Para todas essas gerações mencionadas, o acesso múltiplo ortogonal, do inglês *Orthogonal Multiple Access* (OMA), era uma opção razoável para atender aos requisitos impostos e obter um bom desempenho para o volume de comunicação de cada época (TAO *et al.*, 2015). Entretanto, as comunicações móveis continuam se desenvolvendo rapidamente, e embora as sucessivas gerações tenham melhorado a qualidade dos serviços, o desejo das pessoas, empresas e indústria por comunicações móveis de qualidade e de alto desempenho também cresce continuamente.

Com a demanda crescente de usuários, o rápido desenvolvimento da internet móvel e da internet das coisas, do inglês *Internet of Things* (IoT), e a demanda dos aplicativos por altas taxas de dados, novos desafios devem ser enfrentados para o surgimento e suporte dos serviços de futuras gerações. Do ponto de vista da tecnologia de acesso por rádio da próxima geração, os serviços demandam por uma maior velocidade de dados, uma redução significativa na latência de ponta-a-ponta, alta confiabilidade, melhor eficiência energética, melhor eficiência espectral, maior capacidade, maior número de usuários conectados simultaneamente, entre outros. Para satisfazer todos esses requisitos, novas tecnologias estão surgindo como candidatas em potencial para atender os serviços das novas gerações de redes móveis. Dentre essas tecnologias estão o MIMO massivo, as comunicações por ondas milimétricas, redes ultra-densas e o acesso múltiplo

não ortogonal, do inglês NOMA. Nesta dissertação nos concentramos nesta última tecnologia para acomodar os requisitos de futuras gerações que promete uma maior eficiência espectral, maior capacidade de acesso e maior capacidade do sistema.

O NOMA tem surgido como uma tecnologia promissora para atender as demandas heterogêneas das redes sem fio da próxima geração, o que justifica a grande atenção que tem recebido recentemente da comunidade científica como sendo uma das técnicas a serem aplicadas nas redes móveis de de futuras gerações (SAITO *et al.*, 2013; BOCCARDI *et al.*, 2014). NOMA é fundamentalmente diferente dos esquemas convencionais OMA. Em OMA, os recursos de comunicação, seja tempo, frequência ou código, são aproveitados por cada usuário de maneira ortogonal. Por sua vez, o princípio NOMA tem uma definição mais ampla, onde vários esquemas de acesso múltiplo propostos recentemente podem ser vistos como casos especiais dessa técnica. A ideia principal por trás de NOMA é servir múltiplos usuários no mesmo bloco de recurso, tais como: intervalo de tempo, subportadora, código de espalhamento, entre outros. NOMA oferece várias vantagens para suprir as demandas das redes móveis de próxima geração, como melhor eficiência espectral, maior *throughput*, baixa latência de transmissão, alta confiabilidade, conectividade massiva e maior justiça entre os usuários (DING *et al.*, 2017).

Nesta dissertação, será considerado NOMA no domínio da potência, uma das variações de NOMA em que as informações de vários usuários são sobrepostas no domínio da potência e transmitidas simultaneamente. No receptor o sinal sobreposto é separado usando cancelamento sucessivo de interferência, do inglês *Successive Interference Cancellation* (SIC), através da decodificação dos sinais um a um até encontrar o sinal desejado. De maneira geral, em NOMA uma menor potência de transmissão é alocada para os usuários com melhores condições de canal, ao passo que uma maior potência de transmissão é alocada aos usuários com piores condições de canal, buscando o equilíbrio entre taxa de transferência do sistema e justiça do usuário (DO *et al.*, 2018). Vários trabalhos mostram que o NOMA pode alcançar um desempenho superior ao OMA em termos da probabilidade de *outage*, como relatado em (SHIMOJO *et al.*, 2016).

Por outro lado, a retransmissão cooperativa se tornou uma tecnologia importante para combater o desvanecimento, aumentar a cobertura dos serviços de rede e melhorar a capacidade do sistema (LANEMAN *et al.*, 2004). Além disso, a implantação de múltiplas antenas nos terminais da rede, do inglês *Multiple-Input and Multiple-Output* (MIMO), aumenta significativamente a confiabilidade da transmissão e pode aumentar a capacidade do sistema sem

causar expansão da largura de banda. Portanto, a integração da tecnologia NOMA com outras técnicas de camada física como o MIMO, as comunicações cooperativas e até mesmo o rádio cognitivo, tem recebido considerável atenção recentemente por possuírem grande potencial para atender demandas como alta eficiência espectral e conexões massivas para as futuras redes sem fio.

Nesta dissertação, considera-se um sistema NOMA cooperativo com múltiplas antenas transmissoras na estação base, uma única antena no *relay*, e múltiplas antenas nos dois usuários móveis. Canais com desvanecimento Rayleigh são assumidos e a retransmissão acontece sobre o protocolo decodifica-e-encaminha, do inglês *Decode-and-Forward* (DF). Os dois usuários da rede são ordenados de acordo com a qualidade dos canais entre o nó de retransmissão e os mesmos. Além disso, a antena transmissora que maximiza o ganho do canal entre a estação base e nó *relay* é selecionada enquanto que a combinação por seleção, do inglês *Selection Combining* (SC), é aplicada aos usuários móveis. Considera-se para esse cenário a utilização de coeficientes de alocação de potência fixos. Considera-se também uma rede NOMA inspirada em rádio cognitivo, em que usuários secundários ocupam o canal destinado ao usuário primário de maneira oportunística, baseado em uma restrição de QoS do usuário primário. Para este caso, o usuário com piores condições de canal é tratado como usuário primário e o usuário com boas condições de canal é tratado como usuário secundário dentro de um sistema NOMA. O desempenho de *outage* da rede é estudado e expressões em forma fechada para a probabilidade de *outage* dos dois usuários são obtidas. Além disso, para o primeiro cenário, o comportamento de *outage* assintótico em regiões de alta relação sinal-ruído, do inglês *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), é investigado, onde a ordem de diversidade de cada usuário é determinada. Por fim, simulações numéricas são realizadas para verificar a análise teórica.

## 1.1 Revisão de literatura

Vários trabalhos exploram a atuação conjunta da tecnologia cooperativa e da tecnologia NOMA mostrando a eficiência dessas técnicas nos sistemas de comunicação. Alguns desses trabalhos são discutidos brevemente na sequência.

Em (DING *et al.*, 2015), um esquema cooperativo NOMA é proposto no qual os usuários com melhores condições de canal atuam como *relays* para melhorar a retransmissão dos usuários com condições ruins de canal, em que cada terminal da rede é equipado apenas com uma única antena. Em (MEN *et al.*, 2017), um cenário semelhante é considerado para uma rede

de retransmissão amplifica-e-encaminha, do inglês *Amplify-and-Forward* (AF), sobre canais de desvanecimento Nakagami- $m$ . Utilizando *relays* dedicados, o trabalho (LIU *et al.*, 2016a) estuda um cenário NOMA cooperativo com transmissão de informações e transferência de energia simultâneos, onde usuários localizados próximos da fonte agem como *relays* na colheita de energia para ajudar os usuários NOMA. O impacto da seleção de *relays* em sistemas NOMA cooperativo foi estudado em (DING *et al.*, 2016a) e (LEE *et al.*, 2017). Em (DING *et al.*, 2017), um sistema MIMO-NOMA cooperativo com protocolo AF, considerando o desvanecimento Nakagami- $m$  e aplicando um esquema de seleção de antenas transmissoras, do inglês *Transmit Antenna Selection* (TAS), foi estudado. Outros trabalhos, (HAN *et al.*, 2016; ZHANG; GE, 2017) introduziram a ideia de NOMA cooperativo com múltiplas antenas utilizando colheita de energia pelo *relay* de retransmissão e um esquema TAS para a seleção da antena de transmissão. Na maioria dos trabalhos citados anteriormente, a retransmissão acontece utilizando o protocolo AF.

Em (YUE *et al.*, 2018), um sistema NOMA cooperativo é empregado onde um usuário próximo auxilia na retransmissão da informação utilizando o protocolo DF para ajudar um usuário distante. O usuário distante comuta entre o modo *half-duplex* e *full-duplex*. O trabalho (JHA; KUMAR, 2018) estuda um modelo de sistema NOMA cooperativo com o protocolo DF em que os canais experimentam um desvanecimento Rician. Nesses últimos dois trabalhos, os sistemas tratados são compostos por uma estação base, um usuário próximo que atua como *relay* e um usuário distante. O trabalho (JHA; KUMAR, 2018), analisa o desempenho de erro no NOMA cooperativo e a probabilidade exata de erro é derivada em forma fechada. Os trabalhos (KHALID; JANGSHER, 2019; UDDIN *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2018) analisam o desempenho de um sistema MIMO-NOMA cooperativo. Em (KHALID; JANGSHER, 2019), um *relay half-duplex* com protocolo DF e múltiplas antenas é compartilhado por dois grupos de usuários e, devido a complexidade do sistema proposto, não foi possível realizar uma análise exata da probabilidade de *outage*, apenas um limite inferior. Em (UDDIN *et al.*, 2018), também um *relay half-duplex* com protocolo DF e múltiplas antenas é utilizado e, mais uma vez, a alta complexidade do sistema não permitiu análises exatas. Em (LI *et al.*, 2018), é apresentado um esquema de retransmissão DF utilizando o MIMO-NOMA em que uma formatação de feixe conjunta da estação base e usuário central é utilizada. Vale salientar que alguns desses cenários citados anteriormente são semelhantes à proposta dessa dissertação, porém com uma alta complexidade computacional, uma vez que considera várias antenas na transmissão e várias antenas na recepção, modelando os canais utilizando vetores e matrizes. O presente trabalho

tem o diferencial de realizar o estudo do desempenho de um sistema MIMO-NOMA cooperativo com seleção de antenas para reduzir a complexidade computacional imposta pelos cenários MIMO-NOMA.

Além dos trabalhos citados acima, outras tecnologias novas estão sendo incorporadas ao MIMO-NOMA cooperativo, como por exemplo em (KAUR; SINGH, 2019), onde um esquema de retransmissão cooperativo em um sistema MIMO-NOMA com *beamforming* é proposto para melhorar a área de cobertura, aumentar a eficiência do espectro e eficiência energética para comunicações de ondas milimétricas.

## 1.2 Motivação e objetivos

A tecnologia NOMA, as redes cooperativas e as redes com múltiplas antenas de transmissão e recepção (MIMO), são tecnologias que assumiram papel de destaque atualmente e para as futuras redes de comunicação sem fio. Diante das diversas pesquisas realizadas e da importância dessas tecnologias para o futuro das comunicações móveis, esta dissertação propõe a análise de um sistema NOMA que utilize em conjunto as tecnologias MIMO e redes cooperativas.

Nosso objetivo é avaliar o desempenho de uma rede NOMA que possui múltiplas antenas na estação base e nos terminais móveis, em que um *relay* com uma única antena colabora com a transmissão das informações. Embora outros trabalhos utilizem as mesmas tecnologias, nenhum deles explorou o mesmo cenário apresentado nessa dissertação. Desta forma, a análise proposta por este trabalho pode ser de oportuno proveito acadêmico e científico.

Neste trabalho, focamos na aplicação de MIMO aos sistemas de comunicação NOMA com cooperação. As contribuições deste trabalho são as seguintes:

- Primeiro, consideramos a aplicação de um sistema MIMO-NOMA cooperativo com alocação fixa de potência, utilizando seleção de antenas na transmissão e combinação por seleção nos usuários, onde a probabilidade de interrupção e o ganho de diversidade são considerados como critérios para analisar o desempenho do sistema. Os resultados analíticos de forma fechada desenvolvidos mostram que o MIMO-NOMA cooperativo com alocação fixa de potência pode obter melhor desempenho de *outage* do que o MIMO-NOMA sem cooperação, MIMO-OMA cooperativo e MIMO-OMA sem cooperação, sob a condição de que os coeficientes de alocação de potência e as taxas alvo dos usuários sejam escolhidos

corretamente.

- Com a aplicação do conceito de rádio cognitivo, consideramos um cenário do tipo MIMO-NOMA cooperativo inspirado em rádio cognitivo (CR-NOMA). O objetivo desse sistema é atender a um requisito fixo de qualidade de serviço (QoS), como a SINR alvo direcionada ao usuário com pior condição de canal. Como os requisitos do usuário fraco são atendidos, a expressão exata para a probabilidade de *outage* do usuário forte é derivada. Os resultados analíticos mostram que o CR-NOMA alcança um bom desempenho para o usuário com fortes condições de canal, se a SINR alvo do usuário fraco for baixa, mas piora a medida que a SINR alvo do usuário fraco aumenta em comparação com o MIMO-NOMA cooperativo com alocação fixa de potência.

### 1.3 Produção Científica

Lima, J. C. R.; Rodrigues, J. P.; Costa, D. B.; Dias, U. S.; Júnior, R. T. S. Sistema MIMO-NOMA Cooperativo com Seleção de Antena e Retransmissão DF. **XXXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais - SBRT2018**, 16-19 de setembro de 2018, Campina Grande, PB, DOI 10.14209/SBRT.2018.87.

### 1.4 Estrutura do trabalho

O restante dessa dissertação está dividido da seguinte forma:

**Capítulo 2** - Traremos as principais teorias sobre a tecnologia NOMA proposta como uma técnica promissora para as futuras redes de comunicação sem fio. Apresentamos as principais vantagens dessa tecnologia em relação às técnicas de acesso múltiplo convencionais, além de mostrar os conceitos básicos e seus princípios de funcionamento. Mostramos a compatibilidade dessa tecnologia com outras tecnologias bem consolidadas e com tecnologias emergentes para atender os requisitos das redes de futuras gerações. Por fim, tratamos de temas desafiadores e tendências para pesquisas futuras do NOMA.

**Capítulo 3** - Apresentamos o modelo de sistema proposto e desenvolvemos equações analíticas para estudar o desempenho de *outage* do sistema.

**Capítulo 4** - Apresentamos os resultados do trabalho em que se verifica a validade das equações analíticas desenvolvidas no Capítulo 3 através de simulações computacionais. Avaliamos

como o desempenho do sistema proposto se comporta diante da variação de diversos parâmetros.

**Capítulo 5** - Apresentamos as conclusões deste trabalho e as perspectivas para trabalhos futuros.

## 2 ACESSO MÚLTIPLO NÃO ORTOGONAL (NOMA)

Neste capítulo serão abordados os conceitos relativos ao NOMA, mostrando suas vantagens, conceitos básicos, princípios de funcionamento e coexistência com outras tecnologias. Na Seção 2.1, discutiremos o que impulsiona o NOMA para se tornar uma técnica promissora da futura geração das redes móveis. Na Seção 2.2, discutimos as principais vantagens do NOMA em relação ao OMA. Nas Seções 2.3 e 2.4, são tratados os conceitos básicos que regem os sistemas NOMA e a estrutura de funcionamento do NOMA, respectivamente. Nas três seções seguintes, 2.5, 2.6 e 2.7, mostraremos a coexistência do NOMA com diferentes tecnologias. Finalmente, a última seção mostra os principais desafios e tendências para o NOMA.

### 2.1 Introdução

A tecnologia de acesso via rádio utiliza tipicamente um esquema de acesso ao canal para fornecer aos usuários móveis uma conexão na rede. O projeto adequado de um esquema de acesso múltiplo é um dos aspectos mais importantes na melhoria da capacidade do sistema e tem sido a tecnologia chave para distinção entre os diferentes sistemas sem fio. Existem duas abordagens para esses esquemas de múltiplo acesso: Acesso Múltiplo Ortogonal (OMA) e Acesso Múltiplo Não Ortogonal (NOMA).

As técnicas de OMA alocam recursos sem fio ortogonais para usuários distintos. Tais recursos podem estar divididos no domínio do tempo, frequência ou código. Até muito recentemente, os sistemas de comunicação sem fio de última geração utilizavam técnicas do tipo OMA, tais como FDMA para 1G, TDMA predominantemente para 2G, CDMA para 3G e OFDMA para o 4G, para acesso ao canal. Com esses esquemas, o ganho de multiplexação pode ser alcançado e idealmente evitar ou aliviar a interferência entre os usuários. Além disso, os sinais de informação de vários usuários podem ser facilmente recuperados com baixa complexidade e empregando receptores relativamente econômicos (DAI *et al.*, 2018). Entretanto, para esquemas OMA o número de usuários atendidos é limitado pelo número de recursos ortogonais e, além disso, apesar do uso dos recursos ortogonais no domínio do tempo, frequência ou código, as deficiências induzidas pelo canal quase sempre destroem sua ortogonalidade (TABASSUM *et al.*, 2016a).

As técnicas NOMA permitem que vários usuários sejam atendidos compartilhando os mesmos recursos de tempo e frequência e na mesma camada espacial, oferecendo várias

vantagens incluindo baixa latência de transmissão e custo de sinalização em comparação com o OMA convencional (nenhuma solicitação de agendamento dos usuários à estação base é necessária), eficiência espectral aprimorada, maior taxa de transferência na borda de célula, entre outras. A ideia básica do NOMA é suportar mais usuários do que o número de recursos ortogonais disponíveis no tempo, frequência ou código, ao custo final de maior complexidade no receptor necessária para separar os sinais não ortogonais. Diante disso, o NOMA vem sendo considerada uma tecnologia atraente para as redes de futuras gerações, onde serão necessárias conectividade e cobertura massiva utilizando recursos de rádio limitado (ISLAM *et al.*, 2017). Recentemente, diferentes entidades da indústria e da academia propuseram abordagens potenciais para implementar o NOMA e geralmente podem ser amplamente divididas em duas categorias, a saber: NOMA no domínio da potência e NOMA no domínio do código (DAI *et al.*, 2015; ISLAM *et al.*, 2017). O NOMA no domínio do código usa sequências de dispersão específicas do usuário para compartilhar todo o recurso, enquanto o NOMA no domínio da potência explora as diferenças de ganho do canal entre os usuários para a multiplexação via alocação de potência. Essa dissertação se concentra no NOMA no domínio da potência.

## 2.2 Vantagens do NOMA

A evolução das redes sem fio para as futuras gerações inserem desafios aos novos sistemas de comunicação, que deverão suportar o aumento exponencial previsto no volume do tráfego móvel e na quantidade de dispositivos conectados à rede com taxas de dados diversas e diferentes requisitos de latência. Para continuar garantindo a mobilidade de serviços de comunicação da próxima geração, novas soluções tecnológicas que possam responder à esses desafios futuros devem ser identificadas e desenvolvidas.

A tecnologia NOMA, que pode ser realizada no domínio da potência, do código ou outros domínios, é reconhecidamente uma técnica chave para os sistemas de comunicações móveis das futuras gerações por melhorar a eficiência do espectro e a capacidade do sistema, suportando enormes demandas no tráfego de dados.

Recentemente, esforços significativos de pesquisas foram dedicados à aplicação das técnicas do NOMA em diferentes cenários, motivados pelos seguintes benefícios:

- **Melhor eficiência espectral:** o NOMA permite que cada bloco de recurso (por exemplo, frequência/tempo) seja compartilhado de maneira não ortogonal entre um número arbitrário de usuários através da sobreposição de todos os sinais dos

usuários. O NOMA é uma maneira teoricamente ideal de utilizar o espectro para comunicações de *downlink* e *uplink* em uma rede de célula única, devido ao fato de que todo usuário no NOMA tem disponível toda a largura de banda, enquanto usuários do OMA são limitados a uma fração menor do espectro, que é inversamente proporcional ao número de usuários (DAI *et al.*, 2018; SHIN *et al.*, 2017b).

- **Conectividade massiva:** para os sistemas de 5<sup>a</sup> geração espera-se a conexão de bilhões de aplicações de IoT típicas nos quais um grande número de dispositivos tentam esporadicamente transmitir pacotes pequenos. Em todas as técnicas OMA o número de usuários atendidos é limitado pelo número de blocos de recursos. Diferentemente do NOMA a alocação de recursos não-ortogonais indica que o número de usuários/dispositivos compatíveis não é estritamente limitado pelo número de recursos ortogonais disponíveis. Nesse sentido, o NOMA é uma alternativa de projeto promissora para solução eficiente de conectividade massiva, já que é capaz de aumentar significativamente o número de conexões simultâneas em cenários com menos blocos de recursos disponíveis que o número de dispositivos (SHIN *et al.*, 2017b; KUCUR *et al.*, 2018; DAI *et al.*, 2018).
- **Justiça:** uma característica fundamental das técnicas NOMA é a alocação de mais potência aos usuários com qualidade de canais ruins. O uso do NOMA garante não apenas que um usuário com más condições de canal seja atendido, mas também que usuários com melhores condições de canal possam utilizar simultaneamente os mesmos recursos de largura de banda que um usuário fraco. Com essa característica, o NOMA encontra um bom equilíbrio entre a taxa de transferência do sistema e a justiça do usuário, melhorando o *throughput* da borda de célula (KUCUR *et al.*, 2018; WAN *et al.*, 2018; ISLAM *et al.*, 2017).
- **Baixa latência de transmissão e custo de sinalização:** os sistemas convencionais, como o OMA, contam com solicitações de concessão de acesso para agendamento de blocos de recursos desocupados disponíveis à estação base gerando uma alta latência de transmissão e uma alta sobrecarga de sinalização. Infelizmente, essa característica não é aceitável diante dos requisitos de latência nos sistemas de próxima geração. Nos sistemas NOMA o planejamento dinâmico não é necessário frente ao agendamento flexível capaz de acomodar um número

variável de dispositivos, dependendo da aplicação utilizada e da qualidade de serviço, do inglês *Quality of Service* (QoS), percebida no dispositivo. Portanto, o NOMA é capaz de reduzir significativamente a latência de transmissão e a sobrecarga de sinalização (SHIN *et al.*, 2017b; DAI *et al.*, 2018).

- **Compatibilidade com outras técnicas:** devido ao fato do NOMA explorar uma nova dimensão (domínio da potência), o NOMA, do ponto de vista teórico, pode ser aplicado sobre outras técnicas de acesso múltiplo existentes, como o TDMA, CDMA, FDMA, OFDMA para *downlink* e SC-FDMA para *uplink*. Além disso, o NOMA pode ser combinado com outras tecnologias emergentes, como a tecnologia de múltiplas antenas (MIMO), ondas milimétricas, do inglês *Milimeter Wave* (mmWave), e cenários de retransmissão cooperativas para melhorar o desempenho do sistema (WAN *et al.*, 2018; KUCUR *et al.*, 2018; SHIN *et al.*, 2017b; LI *et al.*, 2015).
- **Ganho de desempenho robusto em cenários de alta mobilidade:** em cenários de alta mobilidade, a informação do estado do canal, do inglês *Channel State Information* (CSI), se torna desatualizada para as técnicas OMA (por exemplo OFDMA), e portanto não obtém ganho de escalonamento no domínio da frequência. No NOMA no domínio da potência, o *feedback* do CSI é usado apenas para alocação de potência, portanto não há necessidade do conhecimento instantâneo preciso do CSI. Diante disso, ter um *feedback* desatualizado de precisão limitada do canal, associado a uma certa imprecisão e atrasos máximos, não prejudicará gravemente o desempenho possível do sistema, proporcionando ganhos mesmo em cenários de alta mobilidade (DAI *et al.*, 2018; LI *et al.*, 2015).

Em vista dos benefícios acima mencionados, o NOMA tem atraído bastante atenção da academia e da indústria como tecnologia promissora para atender os requisitos dos sistemas de comunicação de quinta geração. Como consequência, já existem muitos esforços de pesquisa neste campo.

### 2.3 Conceitos Básicos do NOMA

Diferentemente das técnicas de múltiplo acesso convencionais, que dependem do domínio do tempo, frequência, código ou de suas combinações, o NOMA usa uma nova dimensão para realizar a multiplexação dentro de um desses domínios clássicos. Para a transmissão não

ortogonal, os sinais dos diferentes usuários são diretamente sobrepostos após a codificação e modulação do canal clássico, introduzindo intencionalmente interferência intracelular e/ou intercelular. Esses usuários compartilham os mesmos recursos de tempo/frequência e para a separação dos seus sinais, são detectados através de receptores por detecção multiusuário, como por exemplo o Cancelamento Sucessivo de Interferência (SIC). Sendo assim, o princípio básico do NOMA assegura uma melhor eficiência espectral pelo preço de uma complexidade maior do receptor, em comparação com o OMA convencional (DAI *et al.*, 2018).

Embora a aplicação do NOMA em redes celulares seja relativamente nova, os conceitos principais relacionados ao NOMA existem há várias décadas e são amplamente conhecidos e estudados com base na teoria da informação. A seguir apresentaremos uma breve nota sobre os principais conceitos e tecnologias básicas que desempenham papéis fundamentais no entendimento das técnicas de múltiplo acesso NOMA. Os princípios básicos das técnicas do NOMA dependem do emprego na transmissão da Codificação por Superposição (SC) e na recepção do Cancelamento Sucessivo de Interferência (SIC).

1. **Codificação por Superposição:** A Codificação por Superposição é uma técnica de transmissão de informações simultâneas à vários usuários, ao mesmo tempo, por uma única fonte. Foi proposta inicialmente por Cover em (COVER, 1972). Um exemplo de comunicação sobreposta é a transmissão do sinal de televisão para vários receptores ao mesmo tempo.

No caso das técnicas NOMA, a multiplexação utiliza o domínio da potência que não é suficientemente utilizado nos sistemas anteriores, introduzindo intencionalmente a não ortogonalidade entre os usuários. O conceito básico da codificação por superposição é a sua capacidade de codificar uma mensagem para um usuário com más condições de canal a uma taxa menor, e então sobrepor ao sinal de um usuário com melhores condições de canal.

2. **Cancelamento Sucessivo de Interferência:** No lado do receptor, o NOMA utiliza o Cancelamento Sucessivo de Interferência (SIC) para realizar a detecção multiusuário e decodificar as informações sobrepostas. O princípio básico do SIC é que os sinais dos usuários sejam decodificados sucessivamente de acordo com os diferentes níveis de intensidade do sinal entre os sinais de interesse. Para o procedimento do SIC, os usuários são ordenados de acordo com a intensidade do sinal de forma que o usuário que tenha o sinal mais forte, ou seja, o sinal menos contaminado por interferência, seja detectado primeiro,

tratando os outros sinais como interferência. Esse sinal é recodificado e remodulado para então ser subtraído do sinal composto. O procedimento seguirá obedecendo a ordem de intensidade dos sinais mais fortes restantes até que o usuário mais fraco decodifique suas informações, sem sofrer interferência alguma, visto que todos os sinais anteriores já foram removidos. Em resumo, os sinais são ordenados de acordo com a intensidade, o sinal mais forte é decodificado primeiro tratando os outros como interferentes, o sinal remanescente é subtraído do sinal combinado originalmente e por fim isolado o mais fraco do sinal residual (ISLAM *et al.*, 2017; TAO *et al.*, 2015; KUCUR *et al.*, 2018).

## 2.4 Princípios do Funcionamento do NOMA

Neste trabalho nos concentramos no NOMA no domínio da potência. A definição do NOMA no domínio da potência é sobrepor os sinais de mensagens distintos de usuários no mesmo recurso de tempo e frequência, em diferentes níveis de potência, e depois adotar técnicas de SIC nos receptores para o cancelamento de interferências. Para ilustrar os princípios de funcionamento do NOMA no domínio da potência detalharemos matematicamente as transmissões de *Uplink* e *Downlink*, através de uma caracterização analítica simples, examinando o desempenho alcançável com o auxílio de expressões da relação sinal ruído (SNR).

Vamos considerar um esquema de transmissão NOMA de célula única, em que há uma única estação base, do inglês *Base Station* (BS), e  $N$  usuários  $U_i$ , com  $i \in N = \{1, 2, \dots, N\}$ , sendo todos os terminais equipados com uma única antena.

Para facilitar a demonstração, supõe-se que os *links* sem fio experimentam uma distribuição independente identicamente distribuída (i.i.d.), com desvanecimento Rayleigh e ruído gaussiano aditivo branco, do inglês *Additive White Gaussian Noise* (AWGN). Os canais são organizados em ordem crescente  $0 < |h_1|^2 \leq |h_2|^2 \leq \dots \leq |h_i|^2 \leq \dots \leq |h_N|^2$ , onde o usuário  $m$  pode ser considerado como um usuário mais forte que o usuário  $n$  se  $|h_m|^2 \geq |h_n|^2$ .

### 2.4.1 Transmissão NOMA Downlink

No *Downlink*, a BS envia dados para todos os usuários simultaneamente, sujeita a restrição da potência total. A BS transmite o sinal sobreposto contendo todas as mensagens dos usuários,  $x = \sum_{i=1}^N \sqrt{p_i} x_i$ , com potências de transmissão diferentes para os usuários, onde  $x_i$  é o sinal de mensagem destinado ao usuário  $i$ ,  $p_i$  indica a potência alocada para o usuário  $i$ ,

para  $i \in \{1, 2, \dots, N\}$ . A potência alocada para o usuário depende da potência dos outros usuários devido a restrição de potência total da BS,  $P_t = \sum_{i=1}^N p_i$ , onde  $P_t$  é a potência total da BS. Para cada usuário é alocada uma fração  $\beta_i$  da potência total, ou seja, a potência alocada para o  $i$ -ésimo usuário é  $p_i = \beta_i P_t$ . Ao contrário das estratégias convencionais de alocação de potência, como o *water-filling* (YANG *et al.*, 2016b), que alocam mais potência aos usuários com fortes condições de canal, o *downlink* NOMA utiliza um mecanismo de alocação de potência em que altas potências de transmissão são usadas para usuários com más condições de canal e vice-versa. O sinal recebido pelo  $i$ -ésimo usuário é dado por  $y_i = h_i x + w_i$ , onde  $h_i$  representa o ganho de canal entre a BS e o usuário  $i$ , e  $w_i$  denota o ruído gaussiano (com densidade espectral de potência  $N_{0,i}$ ) no receptor para o usuário  $i$ . O esquema NOMA permite servir simultaneamente todos os usuários usando toda a largura de banda do sistema para transmitir dados com a ajuda da codificação por superposição na estação base. A multiplexação dos usuários é realizada no domínio da potência (DING *et al.*, 2017).

Na recepção, o SIC é utilizado para detecção multiusuário. A ordem ideal da detecção SIC depende da detecção do usuário mais forte para o usuário mais fraco. Cada usuário decodifica os sinais dos outros usuários mais fracos, isto é,  $U_i$  pode decodificar os sinais de  $U_n$ , com  $n < i$ . A partir daí, os sinais dos usuários mais fracos são subtraídos do sinal recebido para decodificar o sinal do usuário  $U_i$  tratando os sinais dos usuários mais fortes,  $U_m$  com  $m > i$ , como interferência, denominada interferência intra-célula. A mensagem para o usuário com condição de canal mais fraco recebe mais potência de transmissão, o que garante que esse usuário possa detectar sua mensagem diretamente tratando as informações dos outros usuários como ruído (ISLAM *et al.*, 2017; WAN *et al.*, 2018; TABASSUM *et al.*, 2016a).

Se a superposição do sinal na BS e SIC em  $U_i$  forem realizadas perfeitamente, a taxa de dados atingível para o usuário  $U_i$  em um sistema de  $1\text{Hz}$  de largura de banda é dado por:

$$R_i = \log_2 \left( 1 + \frac{\beta_i P_t |h_i|^2}{P_t |h_i|^2 \sum_{k=i+1}^N \beta_k + N_{0,i}} \right). \quad (2.1)$$

Para  $U_N$ , a taxa de dados é dada por:

$$R_N = \log_2 \left( 1 + \frac{\beta_N P_t |h_N|^2}{N_{0,N}} \right), \quad (2.2)$$

visto que esse usuário decodifica e cancela sucessivamente os sinais de todos os outros usuários antes de decodificar seu próprio sinal.

Vale ressaltar que um usuário forte experimenta uma melhor condição de canal, mas isso não significa que a intensidade do sinal é mais forte. No NOMA uma potência de transmissão mais baixa é atribuída a um usuário com melhor condição de canal e uma potência mais alta é atribuída a um usuário com condições de canal fraca. Portanto o NOMA não contradiz o conceito básico do SIC, em que a decodificação do sinal mais forte deve ser executada primeiro, já que o sinal de um usuário fraco é mais forte no usuário com um canal mais forte (ISLAM *et al.*, 2017).

#### 2.4.2 Transmissão NOMA Uplink

Na transmissão NOMA *uplink* múltiplos usuários transmitem seus próprios sinais para a BS utilizando toda a largura de banda disponível. Cada usuário transmite seu sinal individual  $x_i$ , com uma potência de transmissão  $p_i$ . É importante notar aqui que, diferente da transmissão NOMA no *downlink*, a potência de transmissão dos usuários no NOMA *uplink* não precisa ser diferente, depende das condições do canal de cada usuário. A potência transmitida pelo usuário é limitada pela potência máxima de sua bateria, portanto todos os usuários podem utilizar independentemente suas potências de baterias até o máximo, desde que os ganhos do canal sejam suficientemente distintos. Se as condições do canal dos usuários forem significativamente diferentes, sua relação sinal-ruído mais interferência, do inglês SINR, recebida pode ser bastante diferente na BS, independentemente de sua potência de transmissão (KUCUR *et al.*, 2018).

Na recepção, o sinal recebido na BS pode ser definido por  $y = \sum_{i=1}^N h_i \sqrt{p_i} x_i + w$ , onde  $p_i$  e  $x_i$  são a potência transmitida e o sinal transmitido pelo  $i$ -ésimo usuário, respectivamente, e  $w$  denota o ruído recebido (com densidade espectral de potência  $N_0$ ). Para a detecção confiável dos sinais, a BS detecta todas as mensagens dos usuários com o auxílio do SIC. Como os canais dos diferentes usuários são diferentes no *uplink*, cada sinal de mensagem experimenta ganho de canal distinto. Vale ressaltar que se os ganhos dos canais forem muito próximos, pode ser usado um controle de potência para aumentar o desempenho do usuário com melhor ganho de canal, enquanto mantém o desempenho dos usuários com ganhos de canais mais fracos em um determinado nível. Diante disso, a potência do sinal recebido correspondente ao usuário do canal mais forte é provavelmente a mais forte na BS. Sem perda de generalidade, assumimos que  $p_1 |h_1|^2 \leq p_2 |h_2|^2 \leq \dots \leq p_N |h_N|^2$ , e portanto, a ordem de decodificação ideal para o SIC é  $x_N, \dots, x_2, x_1$ . Assim, primeiro a BS decodifica o sinal do usuário mais forte  $U_n$ , tratando os sinais de  $U_i$  como interferência, onde  $i \in \{1, 2, \dots, N-1\}$ . Em seguida, o sinal de  $U_n$

é remodulado e subtraído do sinal recebido  $y$  para decodificar os sinais de  $U_i$ . Finalmente,  $U_1$  será corrompido apenas pelo ruído, visto que os sinais dos outros usuários foram sucessivamente decodificados e cancelados. Ou seja, a transmissão do usuário de ganho de canal mais alto experimenta interferência de todos os usuários dentro do seu *cluster*, enquanto a transmissão do usuário de ganho de canal mais baixo não sofrerá interferência dos outros usuários em seu *cluster* (TABASSUM *et al.*, 2016a; WAN *et al.*, 2018).

### 2.4.3 Diferenças entre NOMA Downlink e Uplink

Uma das principais diferenças entre a transmissão de *downlink* e *uplink* é a ordem de decodificação. No *downlink*, usuários fortes decodificam e cancelam sucessivamente os sinais dos usuários fracos antes de decodificar seus próprios sinais, a fim de obter ganhos de taxa de transferência. No *uplink* a BS decodifica e cancela sucessivamente os sinais de usuários fortes antes de decodificar os sinais dos usuários fracos (ISLAM *et al.*, 2017).

Outras distinções importantes entre o *downlink* e o *uplink* serão descritas a seguir (TABASSUM *et al.*, 2016a):

1. **Complexidade de implementação:** Devido a capacidade de processamento limitado dos usuários móveis e a falta de uma unidade de processamento centralizado, o NOMA de *downlink* é uma tarefa mais desafiadora, pois requer a implementação de esquemas adequados de detecção multiusuário e cancelamento de interferência no receptor de cada terminal móvel. Diferentemente, no *uplink*, implementar esquemas de detecção multiusuário e de cancelamento de interferência é relativamente mais conveniente, pois existe uma entidade centralizada que é a BS.
2. **Interferência intracelular/intracluster:** No *downlink*, a interferência intracelular em um usuário é experimentada em seu próprio canal. Os usuários com melhores condições de canal recebem forte interferência devido ao canal forte (que está interferindo) e às altas potências de transmissão alocadas para as mensagens dos usuários de canal fraco. Os usuários com condições de canal fraca experimentam baixa interferência devido ao seu próprio canal fraco e às baixas potências de transmissão alocadas para as mensagens dos usuários de canais fortes. Assim, no *downlink* os usuários de canais fortes são relativamente mais vulneráveis às interferências intracelulares, uma vez que potências de transmissão relativamente altas são alocadas aos usuários fracos, o que é resolvido aplicando-se SIC nos usuários. No *uplink*, a BS recebe a transmissão de todos os usuários

simultaneamente. Sendo assim, a interferência intracelular em um usuário é uma função das estatísticas de canal de outros usuários dentro do seu *cluster*. As transmissões dos usuários de canais fracos são relativamente mais vulneráveis a fortes interferências que surgem das transmissões dos usuários de canais fortes, o que é resolvido aplicando SIC na BS.

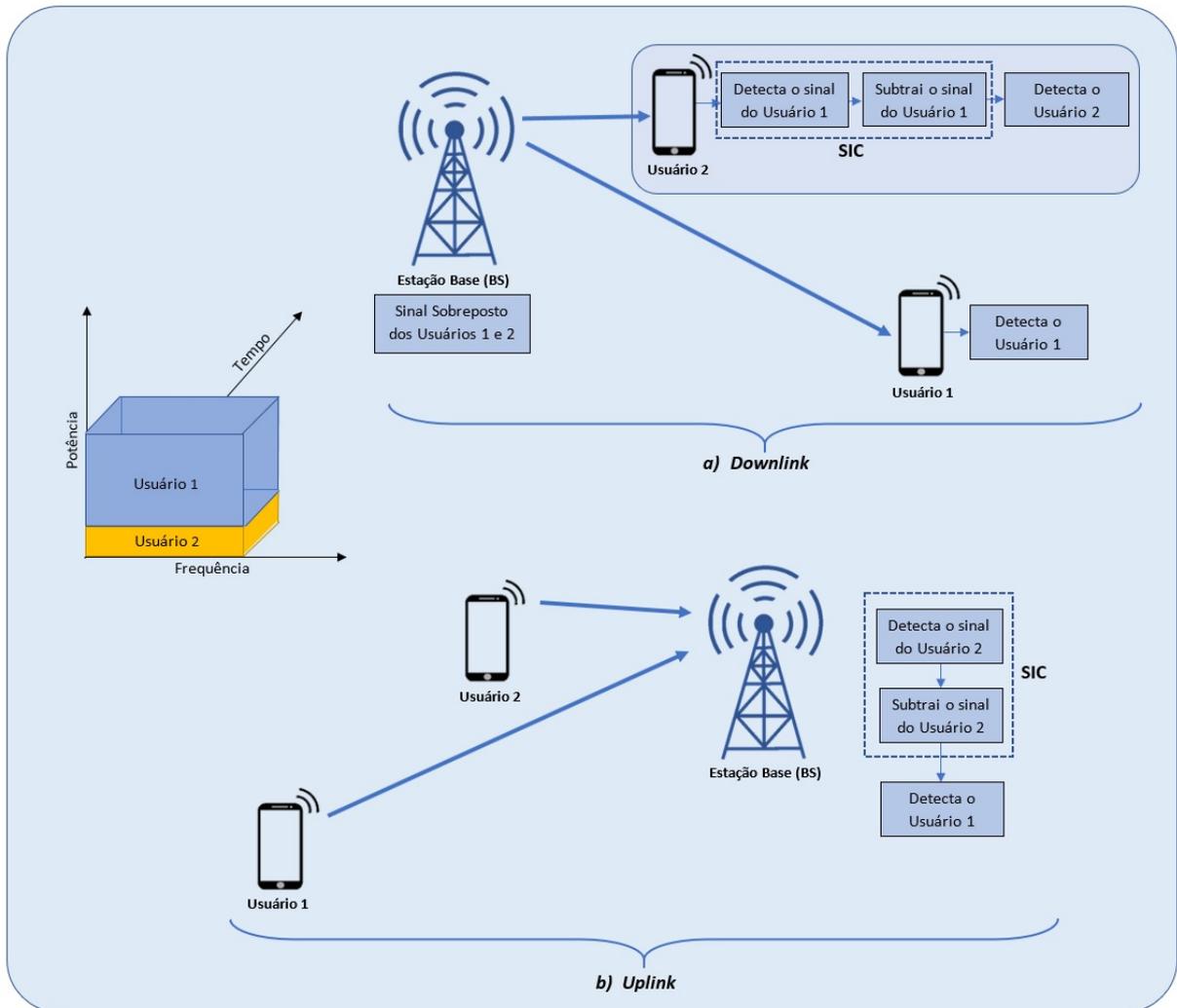
3. **Interferência intercelular:** em aplicações multicelular, as transmissões de *downlink* no NOMA induzirão interferência adicional provenientes das BSs co-canais vizinhas em cada usuário individual em um *cluster* NOMA. Entretanto, essa interferência intercelular de *downlink* recebida em cada usuário individual no NOMA é a mesma que no OMA. Na transmissão de *uplink* do NOMA, quanto maior o número de usuários atendidos pelas BSs co-canais vizinhas, maior será a interferência na BS de interesse. Dessa forma, a interferência multicelular de *uplink* no NOMA é diferente do OMA, sendo diretamente proporcional ao número e às potências de transmissão dos usuários dos *clusters* NOMA atendidos pelas BSs co-canais vizinhas.

#### 2.4.4 Esquema Básico Considerando 2 Usuários

A Figura 1 apresenta o esquema NOMA acima mencionado para dois usuários. Podemos assumir que o usuário  $U_2$  é um usuário de centro de célula e o  $U_1$  é um usuário de borda de célula. A Figura 2 apresenta o esquema OMA em comparação com o esquema NOMA para 2 usuários. Supondo que a largura de banda de transmissão seja normalizada para  $1Hz$ , no esquema NOMA de *downlink* toda a largura de banda é usada simultaneamente pelos dois usuários. No entanto, no esquema OMA o usuário 1 usa  $\alpha Hz$  e o restante  $(1 - \alpha)Hz$  é atribuído ao usuário 2. No NOMA o ganho do canal do usuário 2 é maior do que o usuário 1, dessa forma o usuário 2 executa primeiro o SIC para decodificar o sinal do usuário 1. O sinal decodificado é subtraído do sinal do usuário 2. Esse sinal resultante é usado para decodificar o sinal do usuário 2. Para o usuário 1, o SIC não é executado e o sinal é decodificado diretamente. Assim, supondo uma decodificação perfeitamente livre de erros dos sinais interferentes, as taxas de dados alcançáveis para o usuário 1 e 2 são dadas por Eq. (2.3) e Eq. (2.4), respectivamente (ISLAM *et al.*, 2017).

$$R_1 = \log_2 \left( 1 + \frac{p_1 |h_1|^2}{p_2 |h_1|^2 + N_{0,1}} \right), \quad (2.3)$$

Figura 1 – Esquema NOMA de *downlink* e *uplink* para 2 usuários.



Fonte: Autoria própria (2019).

$$R_2 = \log_2 \left( 1 + \frac{p_2 |h_2|^2}{N_{0,2}} \right). \quad (2.4)$$

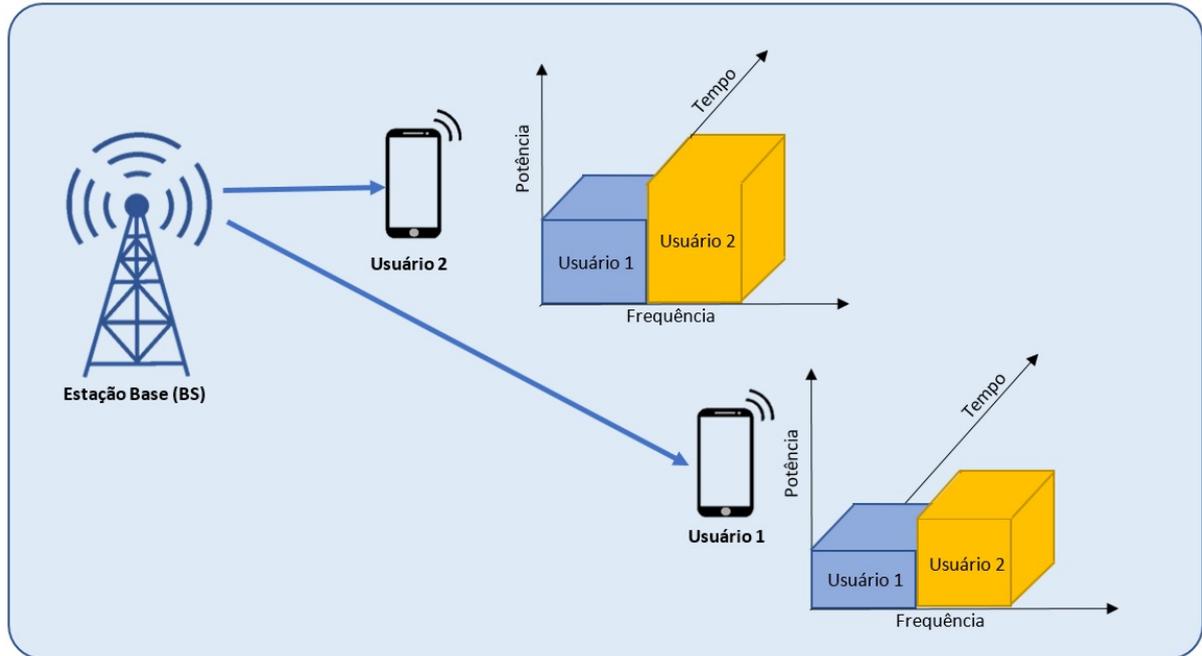
Para o OMA a taxa de dados alcançável para o usuário 1 e usuário 2 é dada por, respectivamente:

$$R_1 = \alpha \log_2 \left( 1 + \frac{p_1 |h_1|^2}{N_{0,1}} \right), \quad (2.5)$$

$$R_2 = (1 - \alpha) \log_2 \left( 1 + \frac{p_2 |h_2|^2}{N_{0,2}} \right), \quad (2.6)$$

em que  $\alpha$  e  $(1 - \alpha)$  é devido a como os recursos de largura de banda são divididos entre os dois usuários.

Figura 2 – Esquema OMA de *downlink* para 2 usuários.



Fonte: Autoria própria (2019).

De (2.3) e (2.4), é possível perceber que o esquema NOMA controla a taxa de transferência de cada usuário ajustando a taxa de alocação de potência,  $p_1/p_2$ . Assim, o rendimento geral e a justiça do usuário estão intimamente relacionados ao esquema de alocação de potência. Para ilustrar o ganho de desempenho do NOMA em relação ao OMA convencional podemos analisar a taxa de soma alcançável em altas SNRs. Para altas SNRs, a taxa de soma do OMA pode ser aproximada por:

$$R_{soma}^{OMA} = \frac{1}{2} \log_2 \left( \frac{p_1 |h_1|^2}{N_{0,1}} \right) + \frac{1}{2} \log_2 \left( \frac{p_2 |h_2|^2}{N_{0,2}} \right) \approx \frac{1}{2} \log_2 \left( \frac{p_2 |h_2|^2}{N_{0,2}} \right). \quad (2.7)$$

A aproximação para a taxa de soma em altas SNRs para o NOMA é dada por:

$$R_{soma}^{NOMA} = \log_2 \left( \frac{p_2 |h_2|^2}{N_{0,2}} \right), \quad (2.8)$$

que é muito maior que a taxa de soma do OMA, principalmente se o ganho do canal do usuário 2 for muito maior que o do usuário 1.

## 2.5 NOMA com Múltiplas Antenas

Nos esquemas de transmissão NOMA os mesmos recursos de tempo e frequência são compartilhados por vários usuários, o que já representa uma melhoria significativa na eficiência espectral. Entretanto, essa melhoria pode não satisfazer o desempenho esperado para

as redes de futura geração. Uma tecnologia que tem sido estudada como solução dentro desse aspecto é a extensão do NOMA combinado com as técnicas de múltiplas antenas (HIGUCHI; KISHIYAMA, 2013; NONAKA *et al.*, 2014b). As técnicas de múltiplas antenas possuem importância significativa pois oferecem graus de liberdade espacial extras para melhorar ainda mais o desempenho do NOMA e atender os requisitos das futuras gerações. A ideia básica do NOMA pode ser estendida para o caso em que uma BS e os usuários estão equipados com várias antenas, o que resulta em MIMO-NOMA (DING *et al.*, 2017; KUCUR *et al.*, 2018).

O estudo de aplicações das tecnologias MIMO-NOMA é importante, mas comparado ao projeto do *Single-Input and Single-Output* (SISO)-NOMA, o projeto do MIMO-NOMA é mais desafiador. Em primeiro lugar, não está claro se o uso do MIMO-NOMA pode alcançar o desempenho ideal do sistema, embora esteja claro que MIMO-NOMA supera o MIMO-OMA (LIU *et al.*, 2016b). Em segundo lugar, a ordenação de canais e a alocação de potência são tarefas difíceis para o MIMO-NOMA. Os canais dos cenários MIMO-NOMA são representados na forma de matrizes, o que torna o ordenamento dos usuários baseado na potência bastante complexo. Como consequência, conceber um projeto adequado para formatação de feixes e pré-codificação é essencial para sistemas NOMA com múltiplas antenas (ISLAM *et al.*, 2018).

Esta seção apresenta diferentes abordagens para a utilização do MIMO-NOMA que serão descritas a seguir.

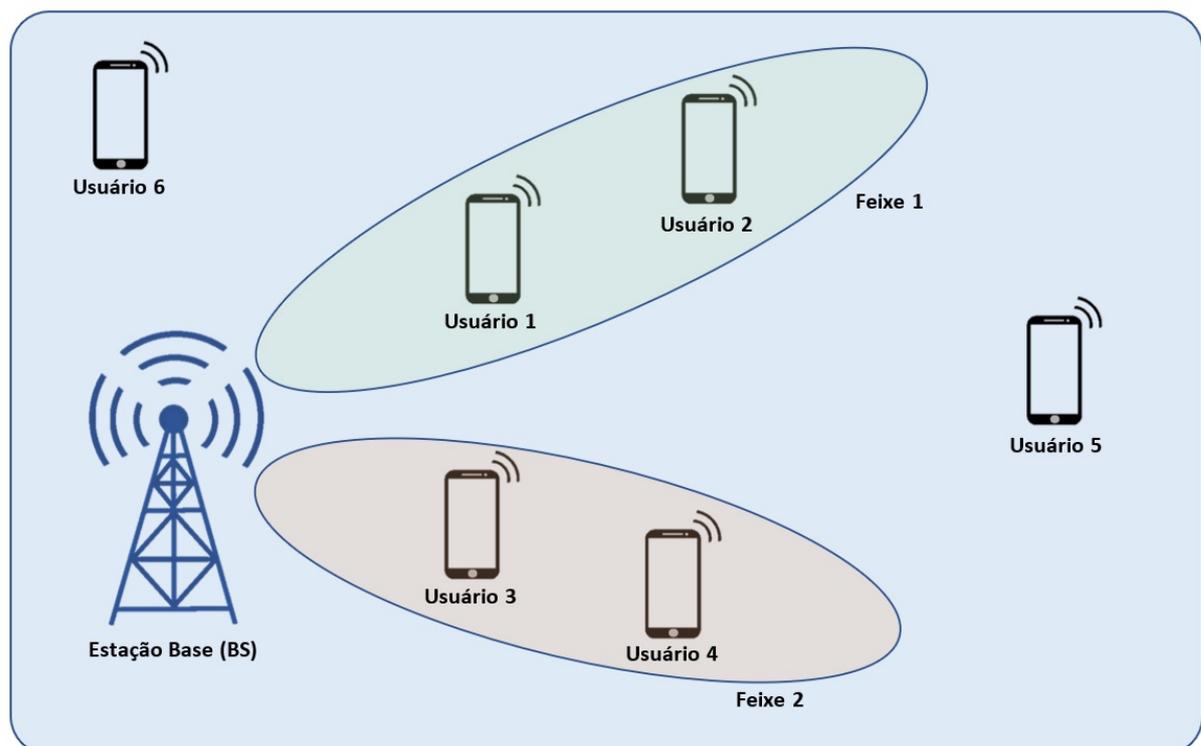
### **2.5.1 NOMA com Formatação de Feixe (*Beamforming*)**

A formatação de feixe, do inglês *beamforming*, é uma técnica de processamento de sinal usada em transmissões direcionais para melhorar a comunicação em redes sem fio, onde diferentes usuários são atendidos por diferentes feixes ortogonais aos canais de outros usuários. Ao aplicar projetos efetivos de pré-codificação e detecção de transmissão, torna-se possível garantir que o feixe associado a determinado grupo de usuários seja ortogonal aos canais de usuários de outros grupos (KUCUR *et al.*, 2018). Essa técnica tem o objetivo de eliminar interferências de outros usuários e maximizar a capacidade de soma alcançada. Quando aliada a sistemas MIMO-NOMA multiusuário, pode explorar o domínio da potência e o domínio espacial para melhorar a capacidade e aumentar a eficiência espectral, melhorando a SINR (KIM *et al.*, 2013).

Para ilustrar a ideia do MIMO-NOMA *beamforming* considere um sistema de quatro usuários como ilustrado na Figura 3. As antenas da BS são usadas para gerar diferentes feixes

no domínio espacial, formando dois grupos (*clusters*) de usuários. O usuário 1 e o usuário 2 pertencem ao grupo 1, enquanto que o usuário 3 e o usuário 4 pertencem ao grupo 2. Em cada grupo os canais espaciais dos usuários devem ser altamente correlacionados para que um feixe possa ser usado para transmitir sinais aos usuário no grupo. Devido ao *beamforming*, de um grupo para o outro os sinais dos usuários são suprimidos e dentro de cada grupo, os sinais dos 2 usuários podem ser transmitidos usando o conceito de codificação por superposição intra-feixe, semelhante ao NOMA básico usando o SIC conforme discutido na Seção 2.4.

Figura 3 – Esquema NOMA com MIMO *beamforming*.



Fonte: Autoria própria (2019).

Se cada usuário possui múltiplas antenas, a recepção do *beamforming* pode ser explorada nos usuários para suprimir a interferência entre os *clusters*, assim como mostrado em (HIGUCHI *et al.*, 2015). Para reduzir a interferência de usuários de outros feixes e a interferência de usuários que compartilham o mesmo vetor de feixe, o NOMA *beamforming* utiliza algoritmos de alocação de *cluster* e potência, baseado na correlação entre usuários e diferença de ganhos de canal, respectivamente (ISLAM *et al.*, 2017).

Em comparação com os sistemas convencionais com *beamforming* multiusuário, o sistema NOMA *beamforming* melhora a capacidade total e também garante a capacidade dos usuários fracos, assegurando a justiça dos usuários. Naturalmente, com o NOMA *beamforming*

mais usuários também podem ser atendidos simultaneamente porque mais de 2 usuários podem compartilhar um único vetor de formatação de feixe (DAI *et al.*, 2018).

### **2.5.2 NOMA com Multiplexação Espacial**

Em (SUN *et al.*, 2015), foi estudada a técnica NOMA com multiplexação espacial que é uma combinação das técnicas MIMO e NOMA. No NOMA com multiplexação espacial cada antena de transmissão envia um fluxo de dados independente para aumentar o ganho de multiplexação espacial usando várias antenas ao mesmo tempo. Várias antenas também podem ser usadas nos usuários e assim a taxa alcançável pode ser aumentada por um fator do número de antenas de transmissão. Essa taxa alcançável é estudada em (SUN *et al.*, 2015). Vale ressaltar que a taxa alcançável de canais MIMO cresce linearmente com o número mínimo de antenas de transmissão e recepção em ambientes ricos em dispersão e, portanto, essa propriedade da escala do MIMO também deve ser válida no NOMA com multiplexação espacial (DING *et al.*, 2017).

### **2.5.3 NOMA com MIMO Massivo**

O MIMO massivo é uma tecnologia capaz de aumentar substancialmente tanto a capacidade quanto a eficiência energética tornando-se uma das principais tecnologias para sistemas 5G (ANDREWS *et al.*, 2014; LARSSON *et al.*, 2014). Diante desses benefícios do MIMO massivo, pesquisas estão sendo realizadas no contexto do NOMA para melhorar tanto a SNR recebida quanto a eficiência da largura de banda. Um exemplo de MIMO massivo com o contexto do NOMA foi estudado em (DING; POOR, 2016). Este trabalho usa *beamforming* para atender diferentes usuários em um *cluster* e decompor os canais MIMO-NOMA em vários canais SISO-NOMA. Um esquema de realimentação CSI de um bit foi proposto para manter uma baixa carga de *feedback* e uma baixa complexidade de implementação.

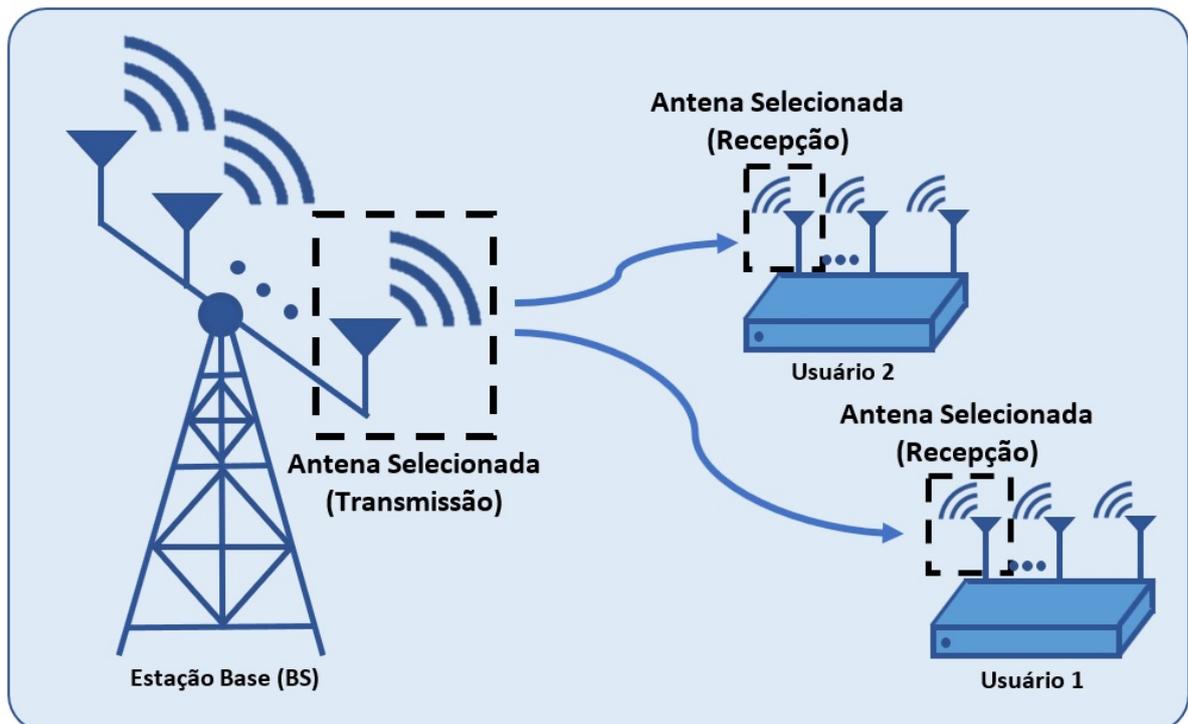
### **2.5.4 NOMA com Seleção de Antena de Transmissão (TAS)**

Embora a capacidade do sistema NOMA utilizando várias antenas possa ser potencialmente ampliada, esse desempenho superior custa o preço de cadeias de rádio-frequência caras, alto consumo de potência e maior complexidade computacional necessária para o processamento de sinal no transmissor e nos receptores. Além disso, existe a dificuldade na ordenação dos usuários com base nas condições dos seus canais para cenários MIMO-NOMA (Atente-se ao fato

que: para nós equipados com várias antenas, os canais dos usuários estão na forma de vetores ou matrizes, o que significa que é difícil ordenar usuários de acordo com as condições do canal). Uma solução eficaz para combinar MIMO e NOMA é explorar os graus de liberdade espacial decompondo o MIMO-NOMA em um canal SISO-NOMA a fim de reduzir significativamente a complexidade do projeto do sistema. Esses esquemas são gerais e podem ser aplicados na transmissão de *uplink* e *downlink*. Uma maneira de realizar essa conversão MIMO-NOMA em SISO-NOMA é utilizando uma técnica de seleção de antena de transmissão, do inglês TAS (DING *et al.*, 2017).

A TAS é frequentemente preferida para simplificar a estrutura do transmissor. Uma técnica TAS eficaz é a seleção oportuna da melhor antena dentre várias disponíveis no transmissor, para utilizar um único canal de rádio-frequência na transmissão. Isso pode ser realizado, por exemplo, selecionando uma antena da BS e a antena de melhor recepção correspondente em cada usuário que maximizem o ganho dos canais dos usuários para maximizar a taxa de soma, como mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Esquema MIMO-NOMA com seleção de antena.



Fonte: Autoria própria (2019).

Técnicas de TAS reduzem a complexidade do sistema, o consumo de potência e o custo do projeto, assim como o tamanho dos dispositivos, à custa de uma perda de desempenho aceitável (ISLAM *et al.*, 2017).

## 2.6 NOMA e as Comunicações Cooperativas

Devido às características hostis dos canais sem fio, a atenuação dos sinais pode variar drasticamente durante uma transmissão. Nesse cenário, a comunicação cooperativa ganhou uma atenção especial devido a sua capacidade de oferecer ganhos de diversidade espacial para atenuar o desvanecimento e estender a cobertura da rede, enquanto soluciona as dificuldades de equipar os pequenos terminais de comunicação com várias antenas (LANEMAN *et al.*, 2004; NOSRATINIA *et al.*, 2004).

Nas comunicações cooperativas alguns terminais são designados para serem nós colaboradores (*relays*), com o objetivo de auxiliar a transmissão da informação de uma fonte a um determinado destino. Observe que o uso do SIC no NOMA requer que usuários de canais fortes decodifiquem as informações de usuários de canais fracos perfeitamente. Essas informações podem ser usadas de várias maneiras para explorar a cooperação entre usuários de um *cluster* NOMA. Portanto, a integração da comunicação cooperativa com o NOMA é realizável e pode melhorar ainda mais a eficiência do sistema em termos de capacidade e confiabilidade (ISLAM *et al.*, 2017). Por exemplo, para redes de futura geração as transmissões dispositivo para dispositivo, do inglês *Device-to-Device* (D2D), podem ser bastante exploradas dentro de um *cluster* NOMA. No entanto, a transmissão D2D pode não ser possível se os usuários dos canais forte e fraco estiverem significativamente separados. Nesse caso, uma comunicação cooperativa poderia auxiliar a transmissão incrementando a cobertura, a diversidade e o desempenho dos usuários de borda de célula (TABASSUM *et al.*, 2016a).

Nas seções posteriores serão introduzidos os princípios do NOMA cooperativo e dois tipos de cooperação serão tratados nesse cenário.

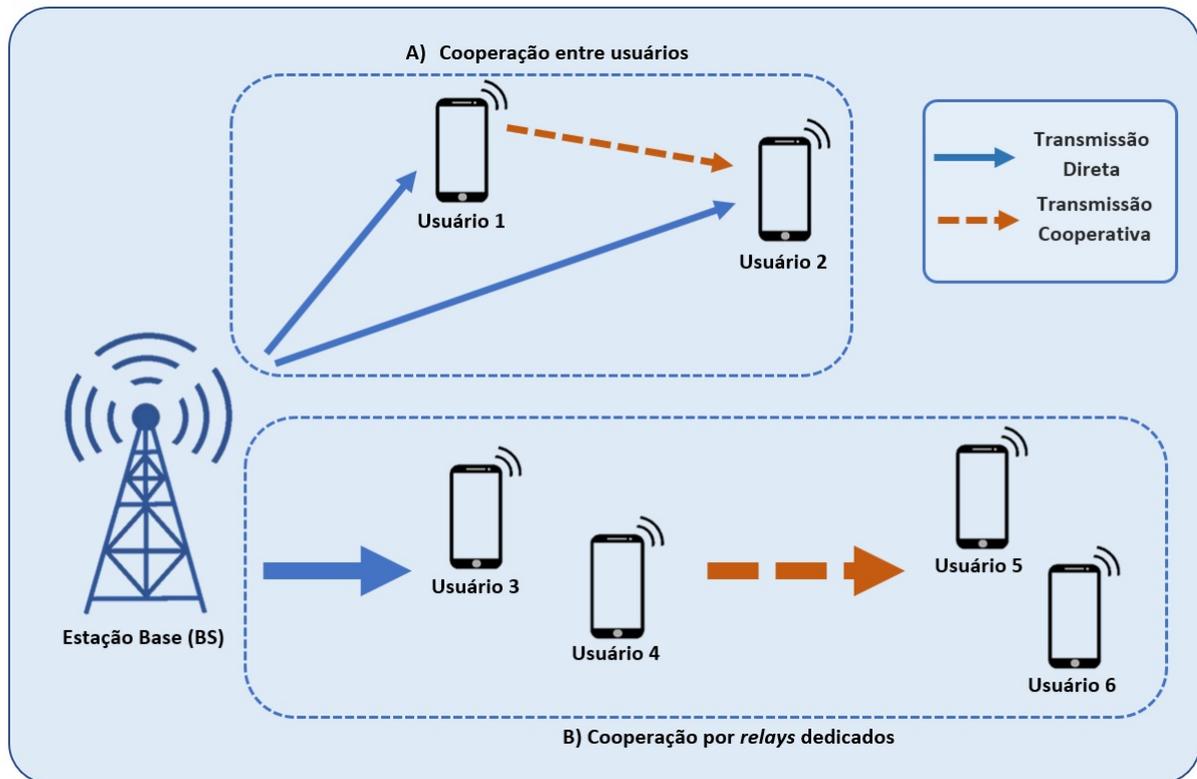
### 2.6.1 Cooperação entre Usuários do NOMA

A ideia básica da transmissão NOMA cooperativa considera a cooperação entre os usuários do NOMA, onde um usuário do NOMA atua como *relay* para outro. Em sistemas NOMA existem informações redundantes que podem ser empregadas para a transmissão cooperativa. Nesse sistema, usuários com condições de canal forte precisam decodificar as informações dos usuários fracos antes de decodificar seu próprio sinal. Isso significa que, em uma transmissão NOMA cooperativa, usuários com condições de canal mais forte podem atuar como *relays* para auxiliar os usuários com condições de canal mais fracas (DING *et al.*, 2017; TABASSUM *et al.*,

2016a).

Considere uma transmissão com dois usuários, como ilustrado na Figura 5 A) como exemplo, onde o usuário 2 tem condição de canal mais fraca e o usuário 1 tem condição de canal mais forte.

Figura 5 – Esquema de duas formas de NOMA cooperativo.



Fonte: Autoria própria (2019).

Um esquema típico de transmissão NOMA cooperativo pode ser dividido em duas fases, a fase da transmissão direta e a fase da transmissão cooperativa, respectivamente. Durante a fase da transmissão direta, o NOMA cooperativo se comporta da mesma maneira que o NOMA não cooperativo, indicado pelas setas azuis na Figura 5. A BS transmite uma mistura sobreposta dos sinais de mensagem para os dois usuários. Na segunda fase, fase da transmissão cooperativa, o usuário forte, após executar o SIC para decodificar a mensagem do usuário fraco, atua como um *relay* para encaminhar as informações decodificadas do usuário fraco para o mesmo. Portanto, duas cópias das mensagens são recebidas no usuário fraco oriundas de canais diferentes, melhorando a confiabilidade da recepção para usuários com conexões ruins à BS (DING *et al.*, 2017; DING *et al.*, 2017; KUCUR *et al.*, 2018). A comunicação cooperativa para usuários com condições de canal fortes pode ser implementada usando técnicas de comunicação de curto alcance, como *bluetooth* e banda ultralarga, do inglês *Ultra WideBand* (UWB) (DAI *et*

*al.*, 2018).

Em um sistema com  $N$  usuários, o NOMA cooperativo pode alcançar o ganho máximo de diversidade para todos os usuários, pois os coeficientes de alocação de potência são diferentes com base nas condições do canal local. O esquema NOMA cooperativo garante que o  $i$ -ésimo melhor usuário experimente uma diversidade da ordem de  $N$ , condicionada a uma taxa de alocação de potência específica (ISLAM *et al.*, 2017).

Em comparação com o OMA cooperativo, o desempenho do NOMA cooperativo é superior. Uma das razões para isso é que o NOMA cooperativo requer apenas dois intervalos de tempo para a comunicação, enquanto que o OMA cooperativo precisa de três intervalos de tempo para completar a comunicação, dois intervalos de tempo para a BS entregar as duas mensagens aos dois usuários, respectivamente, e um intervalo de tempo adicional para o usuário forte auxiliar o usuário fraco na retransmissão (DING *et al.*, 2017).

Comparando o NOMA convencional com o NOMA com transmissão cooperativa, podemos destacar as vantagens deste último, como (KUCUR *et al.*, 2018):

1. **Baixa redundância do sistema:** Como o SIC é empregado nos receptores do sistema NOMA, as mensagens para os usuários com condições de canal mais fraca já foram decodificadas pelos usuários com condições de canal mais forte, portanto, é natural recrutar os usuários com condições de canal mais forte como *relays* aplicando, por exemplo, o protocolo DF para auxiliar o usuário fraco. Explicitamente o sinal fraco pode ser remodulado e retransmitido de uma posição mais próxima para o destino.
2. **Melhor justiça entre os usuários:** Como consequência do item anterior, a confiabilidade da recepção dos usuários com condição de canal mais fraca é significativamente melhorada, ou seja, a justiça da transmissão do NOMA pode ser melhorada principalmente em cenários que usuários com condições de canal fraca estão na borda de célula.
3. **Maior ganho de diversidade:** Para usuários fracos do NOMA, o NOMA cooperativo é capaz de alcançar um melhor ganho de diversidade, superando o desvanecimento dos multipercursos, com ganhos de diversidade semelhantes aos das redes cooperativas convencionais (DING *et al.*, 2015; LIU *et al.*, 2016a).

### 2.6.2 NOMA com Relays Dedicados

Outra maneira de integrar a comunicação cooperativa com o NOMA é empregar *relays* dedicados para auxiliar os usuários do NOMA, como mostrado na Figura 5 B). Nesse

sistema, no primeiro intervalo de tempo a BS transmite o sinal sobreposto ao *relay* e ao destino. Na segunda fase, apenas o *relay* transmite o símbolo decodificado para o destino. Observe que o destino recebe um único símbolo de dados semelhante a retransmissão cooperativa convencional sem NOMA (ISLAM *et al.*, 2017).

O NOMA cooperativo com *relay* dedicado busca melhorar a eficiência espectral dos usuários de borda de célula. Para ilustrar os benefícios do NOMA cooperativo com *relays* dedicados em relação ao OMA cooperativo, considere o exemplo de uma transmissão em que exista um *relay* dedicado usado para auxiliar dois usuários localizados próximo a borda da célula. Quando o OMA cooperativo é usado, dois intervalos de tempo são necessários para que a BS transmita as informações dos dois usuários ao *relay* e mais dois intervalos de tempo são necessários para que o *relay* entregue as mensagens aos dois usuários finais, um total de quatro intervalos de tempo são necessários para a transmissão. Diferente, no NOMA cooperativo com *relays* dedicados são necessários apenas dois intervalos de tempo para que a comunicação aconteça. Um intervalo de tempo para a transmissão NOMA da BS ao *relay* dedicado e outro intervalo para a transmissão NOMA do *relay* para os dois usuários. Portanto, o número de intervalos de tempo necessários para a transmissão no NOMA cooperativo é reduzido de 4 para 2, o que implica em uma eficiência espectral superior em relação ao OMA cooperativo (DING *et al.*, 2017).

Uma motivação para o uso de *relays* dedicados é a existência de um grande número de usuários ociosos em redes sem fio (ex. em redes implantadas em estádios esportivos ou centros de convenções). Esses usuários momentaneamente inativos podem melhorar a cobertura do sistema sendo utilizados como *relays* dedicados para ajudar outros usuários. Uma questão relevante é a seleção dos *relays* que serão utilizados quando muitos desses *relays* dedicados estão disponíveis. Essa questão foi estudada pela primeira vez para o NOMA em (DING *et al.*, 2016a).

## 2.7 NOMA e Outras Tecnologias

O NOMA é uma tecnologia promissora para as futuras gerações de redes de comunicações móveis e, com as pesquisas existentes, tem se mostrado compatível com outras tecnologias emergentes para atender os requisitos da futura geração. Nesta seção, serão abordados a utilização do NOMA coexistindo com outras propostas promissoras para as futuras gerações de telecomunicações.

### 2.7.1 NOMA e Rádio Cognitivo

Como já mencionado anteriormente, o NOMA do domínio da potência aloca mais potência para usuários com más condições de canal para garantir a justiça dos usuários. No entanto, o NOMA do domínio de potência convencional não pode garantir estritamente as metas de qualidade de serviço (QoS) dos usuários. Sabe-se também que o uso mais eficiente do espectro sem fio pode ser alcançado utilizando rádio cognitivo, do inglês *Cognitive Radio* (CR), onde os usuários secundários adaptam inteligentemente seus parâmetros operacionais para acessar uma banda do espectro ocupada pelos usuários primários de forma oportunística ou colaborativa. Dessa forma, o NOMA de domínio de potência e o rádio cognitivo podem ser usados em conjunto para garantir estritamente que alguns ou todos os requisitos de QoS dos usuários sejam atendidos (DING *et al.*, 2017; LV *et al.*, 2018).

Um dos principais objetivos do CR, tecnologia cunhada por Mitola (MITOLA, 2000), é obter o acesso/compartilhamento do espectro dinamicamente, adaptando seus parâmetros operacionais de acordo com os ambientes circundantes. A ideia básica de CR é que em determinada hora do dia ou em uma região geográfica, os usuários secundários não licenciados tem permissão para acessar oportunisticamente o espectro licenciado de usuários primários (KUCUR *et al.*, 2018; LV *et al.*, 2018). As técnicas de CR podem ser categorizadas em três paradigmas:

- **Interweave:** usuários secundários só podem transmitir quando nenhum usuário primário ocupa o espectro licenciado. A transmissão simultânea de usuários primários e secundários não é permitida sob o paradigma de *interweave*.
- **Underlay:** usuários secundários tem permissão para acessar o espectro alocado para usuários primários desde que a restrição de potência de interferência nos usuários primários seja satisfeita. Transmissões primárias e secundárias são permitidas simultaneamente.
- **Overlay:** usuários secundários são capazes de encaminhar as informações das redes primárias enquanto sobrepõe seus próprios sinais como recompensa pelos seus serviços de retransmissão.

O NOMA e o CR visam a utilização eficiente do espectro sob diferentes perspectivas. O CR auxilia a rede secundária de baixa prioridade de maneira oportunista ou de maneira colaborativa, enquanto que o NOMA permite que vários usuários transmitam simultaneamente em níveis de potência diferentes. Dessa forma, o NOMA cognitivo (CR-NOMA) combina o compartilhamento de espectro do CR e o compartilhamento de espectro do NOMA de maneira

construtiva, como forma de obter um compartilhamento de espectro mais inteligente. Até onde sabemos, os estudos do CR NOMA só existem no contexto do paradigma *Underlay* (KUCUR *et al.*, 2018; LV *et al.*, 2018).

A ideia principal por trás do CR-NOMA é tratar o NOMA como um caso especial de CR em que a política de alocação de potência é projetada de forma que os requisitos de QoS pré-definidos dos usuários sejam atendidos. Considere um cenário CR-NOMA onde uma BS atende dois usuários usando o princípio NOMA. O usuário com as piores condições de canal é visto como o usuário principal em uma rede CR. O usuário com condição de canal mais forte é introduzido no canal ocupado pelo usuário fraco, causando uma interferência controlável. Se o OMA for usado, a largura de banda ortogonal alocada ao usuário principal não poderá ser acessada por outros usuários, apesar de ter uma conexão ruim com a BS. Com o CR-NOMA, embora o usuário secundário cause interferência extra no usuário primário e reduza a taxa deste usuário, a taxa de transferência geral do sistema aumentará significativamente pois o usuário secundário possui uma forte conexão com a BS. Para que isso aconteça, uma política explícita de alocação de potência pode ser obtida para atender a QoS pré-definida dos usuários. Suponha que o usuário com condição de canal mais fraca possui uma taxa de dados alvo  $R_1$ . Esse usuário tem um requisito estrito de taxa de dados que precisa ser cumprido. O requisito de taxa de dados impõe uma restrição à política de alocação de potência e dessa maneira, o coeficiente de alocação de potência baseado no CR,  $\alpha_1$ , deve satisfazer a seguinte equação:

$$\log_2 \left( 1 + \frac{\alpha_1^2 |h_1|^2 \rho}{(1 - \alpha_1^2) |h_1|^2 \rho + 1} \right) \geq R_1. \quad (2.9)$$

Considerando essa restrição, o coeficiente de alocação de potência pode ser expresso da seguinte maneira:

$$\alpha_1^2 = \min \left\{ 1, \frac{(|h_1|^2 + 1/\rho) (2^{R_1} - 1)}{|h_1|^2 2^{R_1}} \right\}, \quad (2.10)$$

o que significa que toda a potência é alocada para o usuário 1 para  $R_1$  grande.

O objetivo dessa política de alocação de potência do CR-NOMA é garantir que o usuário primário sempre seja atendido com potência suficiente para satisfazer os seus requisitos de QoS. Se ainda houver potência, a BS pode explorar os graus de liberdade no domínio da potência para atender o usuário secundário de maneira oportunística (DING *et al.*, 2017; DING *et al.*, 2017).

Vale ressaltar que o CR-NOMA é particularmente útil em um cenário como esse: suponha que o usuário 1 seja um dispositivo de IoT que exija apenas uma baixa taxa de dados e o usuário 2 seja um usuário que exija uma alta taxa de dados. Quando OFDMA é usado, que é um exemplo típico de OMA, cada usuário é alocado para uma subportadora. Neste exemplo, a eficiência espectral do OMA é baixa, pois o dispositivo IoT é servido com mais largura de banda do que realmente precisa, enquanto o usuário de banda larga não recebe largura de banda suficiente. Por outro lado, o uso do NOMA incentiva o compartilhamento de espectro, ou seja, o usuário de banda larga também pode ter acesso à subportadora ocupada pelo dispositivo IoT. Como resultado, o uso do NOMA suporta eficientemente a conectividade massiva e atende aos diversos requisitos de QoS dos usuários. Ao usar o CR-NOMA, não apenas o dispositivo IoT pode ser atendido com os requisitos de QoS direcionados, mas também um usuário adicional pode ser admitido nessa subportadora, o que aumenta a taxa de transferência geral do sistema (DING *et al.*, 2017).

Os benefícios resultantes do compartilhamento inteligente do espectro do CR-NOMA são principalmente: **incremento na eficiência do espectro**, pois as redes CR-NOMA podem ativar usuários primários e secundários simultaneamente com uma qualidade de recepção aceitável; **conectividade massiva**, as redes CR-NOMA podem ser projetadas em redes sem fio de futuras gerações para suportar um grande número de dispositivos inteligentes, como realidade aumentada, realidade virtual e internet das coisas, onde vários usuários primários e/ou secundários podem ser atendidos simultaneamente em um bloco de recursos com diferentes níveis de potência; **baixa latência**, o atraso na transmissão de usuários secundários pode ser reduzido nas redes CR-NOMA já que vários usuários secundários podem ser conectados simultaneamente, gerando desempenho de baixa latência; **melhor justiça**, nas redes CR-NOMA o usuário secundário tem a mesma chance de utilizar o espectro licenciado e além disso, o usuário secundário com condição de canal fraco tem mais potência alocada para alcançar uma alta taxa de dados, gerando uma troca equilibrada entre justiça e taxa de transferência na rede secundária (LV *et al.*, 2018).

### 2.7.2 NOMA em Comunicações Milimétricas (mmWave)

As comunicações mmWave foram reconhecidas como uma das principais tecnologias para as redes 5G devido a sua grande largura de banda no espectro de alta frequência (RAPPAPORT *et al.*, 2013; PI; KHAN, 2011). As mmWave têm baixa capacidade de penetração e sofrem severas perdas de caminho de propagação de forma que é necessário uma técnica de

múltiplo acesso para suportar os requisitos das redes 5G, como por exemplo: conectividade massiva em redes densas, onde vários usuários precisam ser atendidos dentro de uma pequena área. Para garantir a aplicação da técnica de mmWave à sistemas 5G podemos considerar a utilização do NOMA como uma técnica de múltiplo acesso nesse cenário. A aplicação do NOMA em mmWave é capaz de aumentar a eficiência da largura de banda e fornecer uma ferramenta importante para suportar a conectividade massiva.

Alguns recursos da propagação de mmWave facilitam a combinação eficaz com o NOMA.

- Os feixes altamente direcionais usados na transmissão mmWave levam a canais fortemente correlacionados. Nas redes baseadas em OMA a correlação do canal reduz o ganho de multiplexação e a taxa de transferência do sistema, ou seja, a alta direcionalidade degrada o desempenho dos sistemas OMA. No entanto, quando os vetores de canal dos usuários estão fortemente correlacionados, o uso do NOMA pode produzir um desempenho mais atrativo (DING *et al.*, 2017).
- Os feixes focados nas redes mmWave efetivamente suprimem a interferência entre feixes entre os usuários. Dessa forma, podemos aplicar NOMA em cada feixe (KUCUR *et al.*, 2018).
- A aplicação do NOMA fornece uma ferramenta importante para suportar conectividade massiva e pode efetivamente melhorar a eficiência espectral das comunicações mmWave. Como exemplo, podemos citar uma rede mmWave implantada em um centro esportivo ou centro de convenções com milhares de usuários. Com o uso do NOMA podemos garantir que um grande número de usuários, com diferentes requisitos de QoS possam ser atendidos simultaneamente. Além disso, com o rápido crescimento da demanda por serviços de dados emergentes, como realidade virtual e realidade aumentada, o ganho obtido com o uso das bandas mmWave diminui rapidamente se usado OMA (DING *et al.*, 2017; KUCUR *et al.*, 2018).

Além desses recursos, outro motivo para utilização em conjunto das comunicações mmWave e NOMA é o fato de que os recursos de espectro abaixo de 6 GHz disponíveis para comunicações sem fio são limitados. As redes mmWave utilizam as faixas de frequência menos ocupadas, que em conjunto com o NOMA aumenta a eficiência do espectro.

A comunicação mmWave pode ser combinada com o MIMO massivo pois o uso

dessas tecnologias permite agrupar um grande número de elementos de antena em uma área pequena. Além disso, uma vez que o comprimento de onda das bandas mmWave é muito curto, sendo necessário que o transmissor e o receptor correspondente estejam localizados na mesma faixa de linha de visada. Assim, uma alternativa é a incorporação de técnicas cooperativas de transmissão nos sistemas de comunicação mmWave para garantir uma comunicação eficaz.

Um marco importante para as comunicações mmWave foi a aprovação pela Comissão Federal de Comunicações, do inglês *Federal Communications Commission* (FCC) dos Estados Unidos, de mais de 10 GHz do espectro nas bandas mmWave acima de 24 GHz que estarão disponíveis para as comunicações sem fio 5G, ocorrido em julho de 2016 (DING *et al.*, 2017).

### 2.7.3 NOMA e Redes Heterogêneas

As redes heterogêneas (*HetNets*) também são uma tecnologia atualmente proposta para melhorar a capacidade e a cobertura das redes sem fio 5G, com consumo de energia reduzido (ANDREWS *et al.*, 2014). Uma rede heterogênea é uma rede sem fio composta por estações base com diferentes potências de transmissão e diferentes tamanhos de cobertura. A ideia central é mover as BS de baixa potência para mais perto dos usuários servidos a fim de formar pequenas células (microcélulas) sob as macrocélulas, de forma que a infraestrutura apresentará a implantação de uma alta densidade de nós de baixa potência e a apresentação de menor densidade de nós com alta potência, o que pode aumentar significativamente a eficiência energética (ISLAM *et al.*, 2017; KUCUR *et al.*, 2018).

A utilização do NOMA em conjunto com as *HetNets* pode oferecer benefícios estendidos, uma vez que os objetivos dessas tecnologias coincidem. Devido a natureza co-canal de macro e microcélulas, os usuários sofrem tanto interferência dentro como entre as células. O trabalho feito em (XU *et al.*, 2016b) juntou essas duas tecnologias em um ambiente cooperativo com o intuito de lidar de forma inteligente com a interferência co-canal, minimizando-a com o auxílio da pré-codificação DPC, do inglês *Dirty Paper Coding*. Além disso, com o intuito de tirar o máximo proveito das técnicas de MIMO massivo, outra pesquisa proposta em (LIU *et al.*, 2016c), aplicou as técnicas de MIMO massivo, auxiliado por NOMA em *HetNets* em um esforço para aprimorar ainda mais a largura de banda das pequenas células. Nesse trabalho, um sistema de MIMO massivo foi adotado pelas macrocélulas para atender simultaneamente  $N$  usuários e em seguida, transmissões NOMA baseadas em emparelhamento foram adotadas em células pequenas, como ilustrado na Figura 12 de (KUCUR *et al.*, 2018).

#### 2.7.4 NOMA e SWIPT

Além de uma maior eficiência espectral que pode ser alcançada com a utilização do NOMA, outro objetivo principal para as futuras redes é a redução no consumo de energia para suporte aos dispositivos sem fio com restrições de energia, almejando redes de comunicação ecológicas e sustentáveis. Para as redes de futuras gerações, a eficiência energética é um dos parâmetros importantes que precisam ser alcançados, especialmente para dispositivos que necessitam de um alto custo para a substituição e/ou recarga das baterias. A colheita de energia, do inglês *Energy Harvesting* (EH), é uma técnica eficiente para alcançar esses objetivos e prolongar o período de recarga das baterias dos dispositivos. Uma motivação para utilização dessa abordagem é o fato de que a maioria dos dispositivos é cercado por sinais de rádio-frequência. Como consequência, até mesmo sinais interferentes podem ser considerados como fontes potenciais de EH (KUCUR *et al.*, 2018). As técnicas mais tradicionais de EH dependem de uma série de fatores como a vibração do vento solar e dos efeitos termoelétricos, os quais dependem da localização, ambiente, hora do dia, entre outros. Em contraste, um novo membro da família de EH é a transferência de energia e informação sem fio simultâneas, do inglês *Simultaneous Wireless Information and Power Transfer* (SWIPT), é uma abordagem mais flexível que deve fornecer uma solução viável para superar os problemas de eficiência energética (ISLAM *et al.*, 2017).

A aplicação do SWIPT para o NOMA foi motivada em cenários de NOMA cooperativo onde usuários de centro de célula atuam como *relays* de coleta energia para auxiliar os usuários de borda de célula (LIU *et al.*, 2016a; ISLAM *et al.*, 2017). Como tratado na Seção 2.6, no NOMA cooperativo usuários fortes retransmitem o sinal para auxiliar a comunicação de usuários com condições de canal fracas. Todavia, na prática, esses usuários fortes podem não querer atuar como *relays*, já que isso traz um custo da sua própria energia para execução da retransmissão e portanto pode reduzir a vida útil da bateria. Se nesse cenário, for utilizado o SWIPT o usuário forte terá mais incentivo para atuar como *relay* e ajudar na retransmissão para o usuário fraco, pois poderá coletar energia dos sinais enviados pela BS e explorar essa energia coletada para a recarga de sua bateria e retransmissão do sinal. Um cenário deste tipo foi investigado em (LIU *et al.*, 2016a), e em (SUN *et al.*, 2016) o projeto do transceptor para o SWIPT NOMA cooperativo foi investigado.

O SWIPT também pode ser aplicado em outros cenários de comunicação NOMA sem cooperação. Em transmissões de *uplink* NOMA com SWIPT os usuários coletam energia da

BS e enviam suas informações à BS simultaneamente, usando o princípio NOMA. Exemplos desse tipo de aplicação podem ser verificados em (DIAMANTOULAKIS *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2016c; YUAN; DING, 2016).

### **2.7.5 NOMA e Comunicação por Luz Visível**

A comunicação por luz visível, do inglês *Visible Light Communication* (VLC), e a comunicação óptica sem fio, do inglês *Optical Wireless Communication* (OWC), tem várias vantagens em comparação com a comunicação por rádio-frequência, como por exemplo, espectro livre de licença, *front-end* de baixo custo, alta segurança e forte imunidade à interferência eletromagnética, o que atraiu considerável atenção para as altas velocidades de comunicação de curto alcance recentemente (CHEN *et al.*, 2018). Os sinais nos sistemas VLC são transmitidos através de transmissores que usam diodos a *laser* projetados especificamente para uso em sistemas VLC para realizar a conversão eletro-óptica (ALJOHANI *et al.*, 2019). O principal desafio para o desenvolvimento dos sistemas VLC de grande capacidade é a pequena largura de banda de modulação dos LEDs prontos para uso. Em sistemas VLC práticos, geralmente é esperado que um transmissor de LED suporte vários usuários. Portanto, o acesso múltiplo é essencial nos sistemas VLC multiusuário. Para fornecer o acesso múltiplo, o NOMA pode ser uma técnica promissora para trabalhar em conjunto com sistemas VLC capaz de aprimorar a taxa de transferência alcançável nesses sistemas.

Considerando que sistemas VLC oferecem altas SNRs devido as curtas distâncias entre o transmissor e o receptor, é benéfico aplicar NOMA em sistemas VLC de *downlink*. O desempenho de sistemas que relacionam essas duas tecnologias foram analisados em (MARSHOUD *et al.*, 2015; YIN *et al.*, 2015; CHEN *et al.*, 2018; ALJOHANI *et al.*, 2019). Poucos estudos foram realizados para investigar a aplicação de NOMA em sistemas MIMO-VLC.

### **2.7.6 NOMA e Comunicação D2D**

Devido ao rápido aumento dos dispositivos de internet das coisas (IoT) e a vários casos de usos em sistemas 5G, uma técnica emergente denominada comunicação dispositivo-a-dispositivo (D2D) pode ser invocada para fornecer serviço de proximidade para usuários móveis e suportar comunicações diretas entre dispositivos sem assistência da BS (Young Bae Song *et al.*, 2017; DAI *et al.*, 2019).

Devido ao seu curto alcance de comunicação entre transmissor e receptor em um

par D2D o ganho de proximidade é aprimorado e a sobrecarga da BS é reduzida. Conforme especificado pelo *3rd Generation Partnership Project (3GPP)*, existem dois modos para permitir que a comunicação D2D coexista com a comunicação celular convencional: o modo *overlay* e o modo *underlay*. No modo *overlay* são atribuídos espectros dedicados às comunicações D2D diferentes do espectro alocado para usuários dos sistemas celulares convencionais. No modo *underlay* as comunicações D2D compartilham o mesmo espectro com os sistemas celulares convencionais, mas não podem danificar as transmissões do mesmo. Esse modo é muito semelhante à tecnologia de rádio cognitivo (CHEN *et al.*, 2019).

As principais vantagens da integração de redes D2D aos sistemas celulares convencionais são: suporte de baixa potência de serviços de proximidade para melhorar a eficiência energética, reutilizar a frequência das redes celulares para melhorar a eficiência da largura de banda utilizada e potencial para facilitar novos tipos de serviço *Peer-to-Peer (P2P)*. Para aumentar ainda mais a capacidade dessas redes, a tecnologia NOMA pode ser utilizada em conjunto às redes de celulares híbridas e D2D, com grande potencial de suportar conectividade massiva, alta capacidade, baixa latência e QoS de diversidade para pares D2D (DIAO *et al.*, 2019; KUCUR *et al.*, 2018).

Algumas pesquisas importantes já foram realizadas nessa área com o intuito de explorar os benefícios potenciais do D2D e do NOMA. Em (ZHAO *et al.*, 2016), vários grupos D2D compartilhavam a mesma BS com os usuários convencionais e um transmissor D2D foi capaz de se comunicar simultaneamente com vários receptores D2D com o auxílio do NOMA. Em (KIM; LEE, 2015; Young Bae Song *et al.*, 2017) uma comunicação D2D com retransmissão NOMA foi analisada. Outros trabalhos foram propostos em (QIAN *et al.*, 2017; LIU *et al.*, 2017; ZHAI *et al.*, 2018; LV *et al.*, 2017; DI *et al.*, 2017) que abordam o modo *overlay* e *underlay*.

## **2.8 Desafios e Tendências do NOMA**

### **2.8.1 Propagação de Erros no SIC**

O SIC é a principal técnica de detecção de usuários dos sistemas NOMA e o desempenho desses sistemas depende principalmente do sucesso do SIC dos sinais fortes. No entanto, a principal desvantagem da implementação do SIC é o problema de propagação de erro, onde se algum desses sinais for detectado erroneamente poderá acarretar que outros usuários na ordem de decodificação do SIC serão afetados e os sinais desses usuários também

serão detectados erroneamente. Diante disso, a interferência intracelular pode não ser eliminada apropriadamente e o sinal desejado do receptor pode não ser decodificado (TABASSUM *et al.*, 2016a; SHIN *et al.*, 2017b). Os efeitos dos erros de propagação podem ser compensados usando códigos mais fortes (por exemplo aumentando o comprimento do bloco), desde que o número de usuários não seja muito grande (ISLAM *et al.*, 2017).

Grande parte dos trabalhos existentes no contexto do NOMA pressupõe que os receptores SIC são capazes de cancelar perfeitamente a interferência. Na verdade, essa suposição não pode ser prontamente satisfeita na prática devido a alocação de potência imprecisa e a estimação imperfeita do canal (KUCUR *et al.*, 2018). Algumas pesquisas em sistemas NOMA verificaram o efeito do SIC imperfeito em redes *uplink* (TABASSUM *et al.*, 2016b), em redes NOMA *full-duplex* (YUE *et al.*, 2017), em redes NOMA C-RAM (ZHAO *et al.*, 2018), em redes MIMO-NOMA (LI *et al.*, 2011; KIM *et al.*, 2006). Algumas estratégias também já foram estudadas para resolver os problemas de propagação de erros e são descritas nos seguintes trabalhos: (ZHANG; HANZO, 2011; KOBAYASHI *et al.*, 2001; Michael Buehrer, 2001).

### 2.8.2 Transmissão NOMA Multicelular

Em cenários multicelular de sistemas NOMA alguns aspectos devem ser observados com mais atenção. Um desses aspectos é o desempenho dos usuários de borda de célula, uma vez que estes usuários são mais vulneráveis às transmissões de BS vizinhas do que à interferência intracelular. Observe que no NOMA de *downlink*, as operações de SIC geralmente são executadas em usuários de centro de célula e não em usuários de borda de célula, o que pode não garantir um bom serviço à esses usuários mais distantes da BS. Além disso, no NOMA de *uplink* a interferência entre células recebida em determinada BS é diretamente proporcional ao número de usuário por *cluster* NOMA das células vizinhas. No entanto, como essa interferência entre células é percebida na BS poderá afetar igualmente todos os usuários do *cluster* NOMA (TABASSUM *et al.*, 2016a; SHIN *et al.*, 2017b; KUCUR *et al.*, 2018).

Para aproveitar os benefícios do NOMA em cenários multicelular são necessárias estratégias adequadas para mitigar a interferência e otimizar a transmissão/recepção de *uplink* e *downlink*. Algumas pesquisas propõem uma transmissão coordenada multiponto para melhorar o desempenho de usuários de borda de célula, como o trabalho descrito em: (ALI *et al.*, 2018). Para o contexto de interferência entre células nas redes NOMA, várias contribuições de pesquisas são descritas em: (SHIN *et al.*, 2017a; HAN *et al.*, 2014; CHOI, 2014; TIAN *et al.*, 2016).

### 2.8.3 Agrupamento de Usuários

Em teoria, o número de usuários em um *cluster* NOMA pode ser ilimitado, ou seja, todos os usuários podem utilizar os recursos disponíveis simultaneamente, seja largura de banda, tempo, antenas, entre outros. Na prática, o NOMA é limitado por interferência intracelular/intercelular e erros de propagação SIC, tornando-se imprudente solicitar a todos os usuários do sistema executar NOMA em conjunto (TABASSUM *et al.*, 2016a; ISLAM *et al.*, 2017). Além disso, o uso de codificação por superposição e SIC podem causar complexidade extra ao sistema (DING *et al.*, 2017).

Para garantir o desempenho relacionado ao NOMA é importante selecionar com eficiência e limitar o número de usuários em um *cluster* NOMA. Nesse sentido, os usuários no sistema podem ser divididos em vários grupos, onde o NOMA é aplicado em cada grupo, e diferentes grupos são alocados com recursos ortogonais com o OMA convencional, de forma que a complexidade do sistema é reduzida, pois menos usuários são coordenados para a implementação do NOMA. Na prática, projetar esquemas de emparelhamento/agrupamento de usuários dinamicamente nos sistemas NOMA baseados em *cluster* é uma tarefa desafiadora para garantir os benefícios máximos oferecidos pelo NOMA, uma vez que esse desempenho depende de quais usuários serão agrupados e de que forma (DAI *et al.*, 2018). Vale ressaltar que o problema de otimização combinatória resultante do agrupamento dos usuários é geralmente NP-difícil, e realizar uma busca exaustiva por uma solução ótima é computacionalmente proibitivo. Portanto, é importante propor novos algoritmos de baixa complexidade para obter um *cluster* ideal de usuários (DING *et al.*, 2017). Alguns estudos já foram realizados para tratar o emparelhamento de usuários e o impacto desse agrupamento de usuário em sistemas NOMA são tratados nos seguintes trabalhos: (DING *et al.*, 2016b; LIU *et al.*, 2015; OTAO *et al.*, 2012; LIANG *et al.*, 2017).

Outro ponto importante sobre a programação dos usuários na prática nos sistemas NOMA é que o número de possíveis pares de usuários agrupados também é limitado, uma vez que é necessária uma diferença de cerca de 8 dB na perda de propagação para emparelhar um usuário de borda de célula com um usuário de centro de célula, o que reduz o ganho da capacidade do NOMA. Encontrar a estratégia apropriada de detecção e decodificação de sinal que aumenta o número de pares de usuário é uma questão importante (YAZAKI; SANADA, 2014; ISLAM *et al.*, 2017).

#### 2.8.4 Alocação de potência

Comparado ao OMA, a alocação de potência do NOMA deve ser mais elaborada, pois os usuários são multiplexados no domínio da potência. Nos sistemas NOMA, a capacidade de cancelamento de interferência dos receptores, a taxa de transferência e até a admissão de novos usuários, são afetados diretamente pela precisão do esquema de alocação de potência utilizado. O esquema de alocação de potência adequado pode ser determinado pela condição dos canais dos usuários, disponibilidade de requisitos de CSI, QoS, restrição total de potência e objetivo do sistema. Por exemplo, ao ajustar a alocação de potência sob uma restrição total de potência do sistema, a BS consegue controlar de maneira flexível a taxa de transferência geral, a taxa de transferência de borda de célula e a taxa de justiça dos usuários. Uma alocação de potência inadequada não só inviabiliza esse controle como também pode causar interrupção do sistema, pois o SIC pode falhar.

Esquemas ideais de alocação de potência precisam da utilização de uma ampla gama de métricas, tais como: o número de usuários admitidos, taxa de soma, justiça de usuário, probabilidade de interrupção e consumo total de energia, com o objetivo de alcançar um consumo mínimo de energia pelo sistema. Portanto, alcançar um esquema ideal pode se tornar uma tarefa excessivamente complexa (ISLAM *et al.*, 2018; DAI *et al.*, 2018). A Fig. 4 de (ISLAM *et al.*, 2018) mostra uma classificação das diferentes estratégias de alocação de potência propostas na literatura. A alocação de potência nas redes NOMA tem uma atenção significativa entre os pesquisadores. Diferentes abordagens podem ser vistas em: (LEI *et al.*, 2016; ZENG *et al.*, 2018; TIMOTHEOU; KRIKIDIS, 2015; FANG *et al.*, 2016).

#### 2.8.5 CSI Imperfeito e Erro de Estimativa de Canal

Na maioria dos trabalhos existentes sobre o NOMA é assumido um CSI perfeito. No entanto, obter CSI perfeito em sistemas práticos é uma tarefa difícil, pois o envio de mais sinais pilotos para melhorar a precisão da estimativa de canal reduz a eficiência espectral, o que se torna um dos principais obstáculos para obtenção do ganho de desempenho do NOMA na prática (DING *et al.*, 2017; DAI *et al.*, 2018). Normalmente, podemos classificar o CSI imperfeito em diferentes categorias nomeadamente: erros de estimativa de canal, CSI parcial e *feedback* limitado do canal (DING *et al.*, 2017).

- A estimativa do canal é mais significativa para sistemas NOMA do que para

sistemas OMA, uma vez que os erros na estimação do canal resultarão em uma ordenação ambígua dos usuários, bem como o controle de potência impreciso, que por sua vez afetará a precisão da decodificação SIC. Esses erros são causados pelo projeto imperfeito de algoritmos de estimativa de canal e observações ruidosas. Além disso, algoritmos convencionais de estimativa de canal quase ótimos de alto desempenho impõem uma inaceitável sobrecarga e complexidade computacional nos sistemas NOMA (KUCUR *et al.*, 2018). O impacto da estimativa de canal imperfeita foi investigado em (YAMAMOTO *et al.*, 2014; NONAKA *et al.*, 2014a) e o projeto de esquemas de transmissão piloto foi investigado em (MA *et al.*, 2017) com o objetivo de reduzir o erro de estimativa de canal. No entanto, mais interferência entre os usuários será causada com o aumento do número de usuários em futuros sistemas de comunicações móveis, o que por sua vez pode resultar em graves erros de estimativa de canal. Portanto, são necessários propor projetos de estimativa de canal mais eficazes para obtenção de uma boa relação complexidade/desempenho em sistemas NOMA.

- O CSI parcial é motivado pelo fato que o desvanecimento em larga escala flutua com menos rapidez do que o desvanecimento em pequena escala. Isso significa menor sobrecarga no transmissor para obter informações de perda de caminho do que estimar o desvanecimento de múltiplos percursos. O uso de CSI parcial no NOMA foi estudado em (YANG *et al.*, 2016b; SHI *et al.*, 2016; CUI *et al.*, 2016) e mostra que o CSI parcial é suficiente para obter ganhos de desempenho melhores no NOMA do que no OMA.
- Com a utilização de *feedback* limitado do canal, a sobrecarga do sistema é reduzida em comparação com o caso em que cada receptor envia todas as informações do canal ao transmissor. Um esquema NOMA de *feedback* de 1 bit foi proposto em (XU *et al.*, 2016a; DING; POOR, 2016; DING *et al.*, 2017).

### 2.8.6 Segurança no NOMA

As questões de segurança são de grande importância em cada geração de redes sem fio. Assim como em outras técnicas de acesso múltiplo de outras gerações, prover segurança em um sistema NOMA para as redes de futuras gerações é uma tarefa importante que precisa ser estudada. O risco de segurança associado a uma comunicação baseada em NOMA é o fato

de que em uma transmissão, para que o SIC seja executado, o usuário com condição de canal forte deve ser capaz de decodificar o sinal do usuário com condição de canal fraco, o que traz novas preocupações nesse sentido. Assim, quando o usuário fraco se torna malicioso ou está sob ataque, as operações de decodificação de sinal de usuários fortes e fracos não são mais confiáveis (DING *et al.*, 2017; SHIN *et al.*, 2017b; ISLAM *et al.*, 2018).

Em CR-NOMA, por exemplo, uma fraqueza crítica que pode ser explorada por um invasor é a negação de serviço através da emissão de sinais de rádio prejudiciais para interferir no processamento do SIC nos usuários secundários assistidos pelo NOMA. Em redes NOMA cooperativas, os *relays* retransmitem uma cópia dos símbolos de informação que são transmitidos pela mesma banda de frequência, o que significa que uma vez que essa frequência de portadora é localizada com sucesso pelo interceptador, toda as mensagens dos usuários podem ser interceptadas. Outro exemplo de falta de segurança, é a presença de um *relay* malicioso que pode ser usado na cooperação. Esse *relay* não confiável pode espionar as informações confidenciais para seu próprio benefício (LV *et al.*, 2018; WAN *et al.*, 2018).

É importante deixar claro que o risco à segurança também existe para outras técnicas de acesso múltiplo. Podemos citar como exemplo, um usuário de TDMA poderá ser ativado durante um intervalo de tempo não atribuído a ele e tentar decodificar as informações de outro usuário (DING *et al.*, 2017).

As abordagens de segurança mais comuns nos sistemas de telecomunicações de hoje, são as abordagens de camada superior, como aquelas fornecidas por técnicas de criptografia, em que apenas um usuário legítimo tem uma chave para decodificar sua mensagem (DING *et al.*, 2017; SHIN *et al.*, 2017b). No entanto, estudos iniciais mostraram que os esquemas de segurança da camada física são interessantes para melhorar a segurança da transmissão com o uso do NOMA e podem ser soluções promissoras para evitar vazamento de informações.

A segurança da camada física, do inglês *Physical Layer Security* (PLS), visa explorar as características específicas dos canais sem fio na camada física para a transmissão de mensagens confidenciais, alcançando um sigilo perfeito nos canais e fazendo com que a capacidade do canal desejado seja maior do que o canal do interceptador. PLS foi proposta inicialmente por Winner em (WYNER, 1975) e se tornou uma medida atraente para melhorar a confidencialidade das comunicações sem fio baseadas em NOMA a fim de combater a espionagem (KUCUR *et al.*, 2018). Alguns estudos desse aspecto do NOMA estão descritos nos trabalhos: (ZHANG *et al.*, 2016; QIN *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2017; HE *et al.*, 2017; QIN *et al.*, 2016; LIU *et al.*, 2017;

ZHANG *et al.*, 2016; DING *et al.*, 2017).

É importante dizer que o uso do NOMA possibilita uma melhoria na segurança das comunicações, uma vez que os coeficientes de alocação de potência do NOMA são projetados de acordo com as condições do canal dos usuários legítimos, o que significa que os intrusos podem não conseguir realizar o SIC e, portanto, a interceptação pode ser efetivamente suprimida. Além disso, por exemplo no NOMA com *beamforming*, os feixes na BS são projetados cuidadosamente para aumentar artificialmente a diferença entre as condições de canal dos usuários, o que é útil para aumentar a taxa de sigilo (DING *et al.*, 2017).

Realizar comunicações seguras em redes NOMA é uma área de pesquisa rica e promissora, uma vez que ainda são necessários desenvolver esquemas práticos e de baixa complexidade para obter segurança no NOMA.

#### **2.8.7 *Desenvolvimento de hardware***

Desenvolver *hardware* adequado para aplicação em sistemas NOMA é uma tarefa complexa. Os usuários móveis devem ser capazes de executar detecção multiusuário e cancelamento de interferência, o que necessita de um projeto mais robusto para esses terminais com capacidade limitada de processamento. Além disso, uma das razões pelas quais o NOMA supera o OMA é que ele permite que mais usuários acessem a rede simultaneamente. Portanto, uma unidade de SIC de alto desempenho é necessária para o terminal móvel. O desenvolvimento do *hardware* adequado é um desafio importante para a implementação prática do NOMA no futuro (ISLAM *et al.*, 2017; WAN *et al.*, 2018).

### 3 MIMO-NOMA COOPERATIVO

Neste capítulo serão apresentadas as contribuições originais desta dissertação, que consiste na análise de desempenho de um sistema NOMA cooperativo com múltiplas antenas transmissoras na estação base, uma única antena no *relay* e dois usuários móveis com múltiplas antenas. Os dois usuários da rede são ordenados de acordo com a qualidade dos canais entre o nó de retransmissão e os mesmos, levando em consideração a perda de percurso. A retransmissão acontece sobre o protocolo DF. Além disso, a antena transmissora que maximiza o ganho do canal entre a estação base e o nó *relay* é selecionada enquanto que a combinação por seleção é aplicada aos usuários móveis. A Seção 3.1 traz as principais notações utilizadas no capítulo. Na Seção 3.2, o modelo de sistema proposto é descrito onde a estação base utiliza codificação por superposição para enviar o sinal sobreposto a dois usuários móveis com o auxílio de um *relay* sobre a mesma faixa de frequência. Na Seção 3.3 a análise da probabilidade de *outage* é desenvolvida e uma equação analítica e em forma fechada é encontrada para a probabilidade de *outage* do sistema proposto. Na Seção 3.4 é desenvolvida a probabilidade de *outage* para altas SNRs para encontrar a ordem de diversidade do sistema. A Seção 3.5 o MIMO-NOMA cooperativo inspirado em rádio cognitivo é proposto.

#### 3.1 Notações

Ao longo deste capítulo,  $\Pr\{\cdot\}$  simboliza a probabilidade;  $f_x(\cdot)$  e  $F_x(\cdot)$  representam a função de densidade de probabilidade, do inglês *Probability Density Function* (PDF) e a função de distribuição cumulativa, do inglês *Cumulative Distribution Function* (CDF) de uma variável aleatória  $x$ , respectivamente;  $\rightarrow \infty$  simboliza uma expressão assintótica que se mantém em regime de alta SNR;  $\sim \mathcal{CN}(w, \beta)$  denotam uma distribuição gaussiana complexa com média  $w$  e variância  $\beta$ ;  $E[x]$  significa o operador de esperança de uma variável aleatória  $x$ .

#### 3.2 Modelo Sistêmico

O NOMA pode ser aplicado em um sistema para obter alta capacidade, justiça entre os usuários e melhor eficiência espectral. Para aprimorar ainda mais o desempenho do NOMA podemos integrar várias tecnologias a ele. MIMO pode ser usado em conjunto com NOMA para melhorar ainda mais a eficiência espectral do sistema e, para diminuir a complexidade, TAS pode ser usado para selecionar uma única antena de transmissão dentre as várias disponíveis.

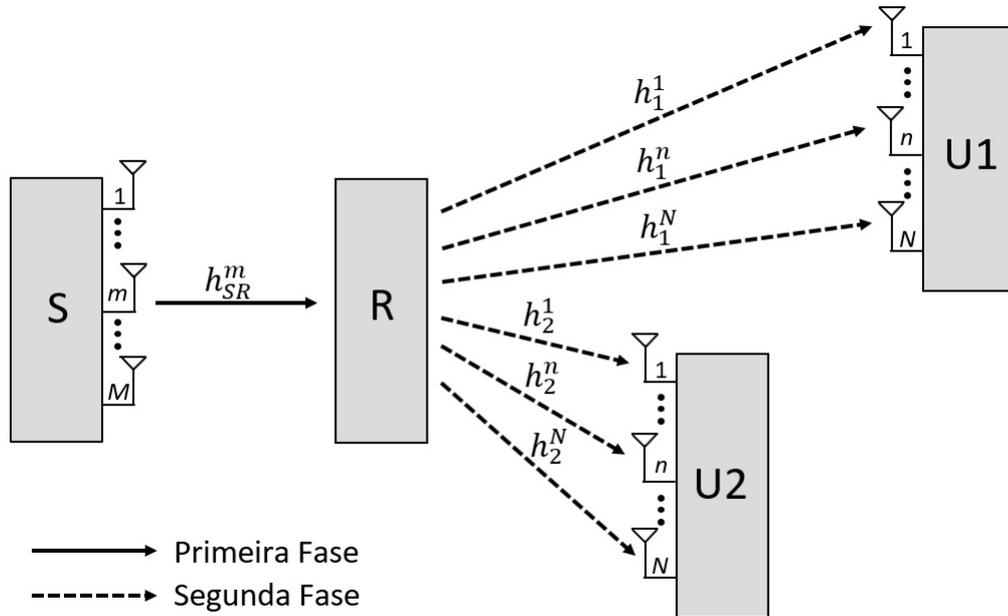
Além disso, a retransmissão cooperativa pode ser aplicada para aumentar a cobertura da rede, aprimorar a confiabilidade da transmissão e melhorar a capacidade do sistema. Portanto, é considerável projetar cenários NOMA que agrupem essas diferentes tecnologias. Essa estrutura de comunicação apresenta potencial para implementação nas redes de comunicação sem fio de futuras gerações como em sistemas de comunicação celular e redes de sensores sem fio, por exemplo. O foco deste trabalho é apresentar um cenário capaz de trabalhar com essas tecnologias.

Considera-se um cenário MIMO-NOMA cooperativo de dois saltos, como mostrado na Figura 6, em que uma estação base (S) transmite simultaneamente os sinais de dois usuários (usuário distante - U1, usuário próximo - U2) com a ajuda de um *relay* R dedicado do tipo DF. Todos os nós operam no modo *half-duplex*. A estação base e os usuários são equipados com  $M$  e  $N$  antenas transmissoras e receptoras, respectivamente, e o *relay* é equipado com uma única antena e retransmite o sinal utilizando o protocolo DF. Sem perda de generalidade, uma topologia de rede homogênea é considerada e a distância entre os nós são denotadas como  $d_{SR}$ ,  $d_1$  e  $d_2$ , entre S-R, R-U1 e R-U2, respectivamente, em que  $d_1 > d_2$ . Devido a longa distância ou obstáculos significativos entre S e os usuários móveis, nenhum *link* direto existe entre eles. Os *links* sem fio experimentam desvanecimento Rayleigh não seletivo em frequência e um ruído aditivo gaussiano branco, do inglês AWGN e são afetados pela perda de percurso. Considera-se também que todos os nós conhecem perfeitamente as informações do estado do canal CSI de todos os links. Para a transmissão NOMA, com o auxílio de SC e SIC, cada subcanal pode transmitir mais de um sinal com a mesma frequência, ou seja, todos os usuários compartilham os mesmos recursos de largura de banda, como o intervalo de tempo, códigos de espalhamento e canais de subportadoras. Com base nos valores do CSI, neste primeiro cenário, S aloca uma quantidade de potência fixa de transmissão para cada usuário móvel. A transmissão de S para os usuários é dividida em duas fases: uma fase de transmissão das mensagens para o *relay* e outra do *relay* para os usuários móveis. Como a estação base e os usuários possuem várias antenas, foram adotadas as seguintes estratégias: TAS é empregada para selecionar a antena de transmissão na estação base na primeira fase e SC é utilizado na segunda fase para a recepção dos sinais.

Os coeficientes do canal correspondente ao *link* S-R são denotados por  $h_{SR}^m \sim \mathcal{CN}(0, \beta_{SR}^m)$ ,  $m = 1, 2, \dots, M$ . Assume-se também que os coeficientes dos canais para os *links* R-U1 e R-U2 são denotados por  $h_1^n \sim \mathcal{CN}(0, 1)$  e  $h_2^n \sim \mathcal{CN}(0, 1)$ ,  $n = 1, 2, \dots, N$ , respectivamente.

Na primeira fase, S seleciona uma antena transmissora que maximize o ganho de

Figura 6 – Sistema MIMO-NOMA cooperativo com *relay* dedicado DF.



Fonte: Autoria própria (2018).

canal entre S e R, e usa a única antena selecionada para transmitir o sinal sobreposto  $x_S$  para U1 e U2 com o auxílio de R seguindo os princípios do NOMA. O sinal sobreposto  $x_S$  pode ser expresso como:

$$x_S = \sum_{i=1}^2 \sqrt{a_i P_S} x_i = \sqrt{a_1 P_S} x_1 + \sqrt{a_2 P_S} x_2, \quad (3.1)$$

em que  $a_i > 0$  é o coeficiente de alocação de potência para  $U_i$ ,  $x_i$  é a mensagem destinada a  $U_i$ , com  $E[|x_i|^2] = 1$ ,  $i \in \{1, 2\}$  e  $P_S$  é a potência transmitida por S. Seguindo o princípio de NOMA, assume-se que  $|a_1| > |a_2|$  devido  $|h_1|^2 < |h_2|^2$ , com  $\sum_{i=1}^2 a_i = 1$ .

O sinal recebido por R da  $m$ -ésima antena é dado por:

$$y_R^m = h_{SR}^m \sqrt{\frac{P_S}{d_{SR}^\tau}} \sum_{i=1}^2 \sqrt{a_i} x_i + \eta_R, \quad (3.2)$$

em que  $h_{SR}^m$  é o coeficiente do canal associado a  $m$ -ésima antena de S,  $\eta_R \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$  denota o ruído AWGN com média zero e variância  $N_0$  e  $\tau$  é o coeficiente de perda de percurso.

O *relay* R recebe o sinal da fonte e implementa SIC. SIC perfeito é considerado no sistema, o *relay* primeiro decodifica  $x_1$  tratando  $x_2$  como interferência e o remove do sinal recebido. Então,  $x_2$  é decodificado do sinal remanescente. Assim sendo, a SINR associada a decodificação de  $x_1$  e a SNR associada a decodificação de  $x_2$  para cada antena  $m$  são expressas, respectivamente, por:

$$\gamma_{R1}^m = \frac{|h_{SR}^m|^2 a_1 \rho_S}{|h_{SR}^m|^2 a_2 \rho_S + d_{SR}^\tau}, \quad (3.3)$$

$$\gamma_{R2}^m = \frac{|h_{SR}^m|^2 a_2 \rho_S}{d_{SR}^\tau}. \quad (3.4)$$

em que  $\rho_S = \frac{P_S}{N_0}$ .

Considerando o esquema TAS em S, a antenna selecionada,  $m^*$ , é escolhida para maximizar o ganho do canal de forma que seja calculada como  $m^* = \arg \max_{1 \leq m \leq M} |h_{SR}^m|$ . Dessa forma, a SINR para  $x_1$  e a SNR para  $x_2$  são dadas, respectivamente por  $\gamma_{R1} = \max_{1 \leq m \leq M} \{\gamma_{R1}^m\}$  e  $\gamma_{R2} = \max_{1 \leq m \leq M} \{\gamma_{R2}^m\}$  na primeira fase.

Na segunda fase, o *relay* retransmite o sinal sobreposto detectado  $x_R$  para U1 e U2. O sinal  $x_R$  pode ser escrito como:

$$x_R = \sum_{i=1}^2 \sqrt{P_R b_i} \tilde{x}_i = \sqrt{P_R b_1} \tilde{x}_1 + \sqrt{P_R b_2} \tilde{x}_2, \quad (3.5)$$

em que  $b_i$  é o coeficiente de alocação de potência no *relay*, com  $\sum_{i=1}^2 b_i = 1$ ,  $P_R$  é a potência transmitida por R e  $\tilde{x}_i$  é a mensagem detectada do usuário  $i$  por parte do *relay*.

O sinal recebido por U $_i$  pela  $n$ -ésima antenna receptora é descrito por:

$$y_i^n = h_i^n \sqrt{\frac{P_R}{d_i^\tau}} (\sqrt{b_1} \tilde{x}_1 + \sqrt{b_2} \tilde{x}_2) + \eta_i^n, \quad (3.6)$$

em que  $\eta_i^n \sim \mathcal{CN}(0, N_0)$  é o ruído AWGN e  $h_i^n$  é o coeficiente do canal R-U $_i$  para a  $n$ -ésima antenna. U1 trata a mensagem  $\tilde{x}_2$  como ruído para adquirir a mensagem  $\tilde{x}_1$  de (3.6). Dessa forma, a SINR recebida em U1 para cada antenna receptora é dada por:

$$\gamma_1^n = \frac{|h_1^n|^2 b_1 \rho_R}{|h_1^n|^2 b_2 \rho_R + d_1^\tau}, \quad (3.7)$$

em que  $\rho_R = \frac{P_R}{N_0}$ .

U2 implementa SIC para detectar  $\tilde{x}_1$  considerando sua própria mensagem como ruído. A SINR pode ser escrita como:

$$\gamma_{2 \rightarrow 1} = \frac{|h_2^n|^2 b_1 \rho_R}{|h_2^n|^2 b_2 \rho_R + d_2^\tau}. \quad (3.8)$$

Considerando SIC perfeito, U2 extrai a mensagem detectada do sinal remanescente e finalmente detecta sua própria mensagem com a seguinte SNR para cada antenna receptora:

$$\gamma_2^n = \frac{|h_2^n|^2 b_2 \rho_R}{d_2^\tau}. \quad (3.9)$$

Finalmente, os usuários combinam os sinais das  $N$  antenas, empregando SC para excluir os efeitos dos *links* mais fracos, de tal forma que a SINR e a SNR alcançáveis pelos dois usuários são expressas, respectivamente, como  $\gamma_1 = \max_{1 \leq n \leq N} \{\gamma_1^n\}$  e  $\gamma_2 = \max_{1 \leq n \leq N} \{\gamma_2^n\}$ .

Baseado no esquema de transmissão descrito acima, a taxa de transmissão alcançável para as mensagens dedicadas aos usuários U1 e U2 podem ser determinadas a partir da equação abaixo:

$$R_i = \frac{1}{2} \log_2(1 + \min(\gamma_{Ri}, \gamma_i)), i = 1, 2. \quad (3.10)$$

### 3.3 Probabilidade de Outage

O desempenho da rede cooperativa NOMA em estudo será investigado em termos da probabilidade de *outage*. Para este fim, expressões exatas e em forma fechada serão obtidas. Além disso, uma análise assintótica será realizada com o intuito de determinar a ordem de diversidade para cada usuário.

De acordo com o cenário proposto, ocorre uma interrupção para o  $i$ -ésimo usuário quando a taxa de transmissão para esse usuário está abaixo de um certo limiar de taxa, de tal forma que um evento de interrupção é representado por  $\{R_i < R_{th}\}$ , em que  $R_i$  corresponde a taxa de transmissão para cada usuário  $U_i$  com  $i \in \{1, 2\}$  e  $R_{th}$  o limiar de taxa de desempenho mínimo aceitável.

Sendo a probabilidade de *outage* de cada usuário definida como a probabilidade de ocorrência de um evento de interrupção, ou seja, definida como a probabilidade de que a taxa alcançada para cada usuário esteja abaixo de um certo limiar  $R_{th}$ . A probabilidade de *outage* para U1 e U2 pode ser expressa como:

$$P_{out}^i = \Pr\{R_i < R_{th}\}, i = 1, 2, \quad (3.11)$$

em que  $\Pr\{\cdot\}$  denota probabilidade e  $R_{th}$  representa o limiar da taxa de desempenho mínima aceitável.

Como os coeficientes de canal seguem uma distribuição de Rayleigh, a função densidade de probabilidade PDF de  $z_j = |h_j|^2$ ,  $j \in \{SR, 1, 2\}$  é dada por  $f_{z_j}(z) = 1/\bar{z}_j e^{-z/\bar{z}_j}$ , em que  $\bar{z}_j = E[z_j]$ .

Para U1, a Eq. (3.11) pode ser reescrita alternativamente através de transformações

de probabilidade e estatística como:

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^1 &= \Pr \left\{ \frac{1}{2} \log_2(1 + \min(\gamma_{R1}, \gamma_1)) < R_{th} \right\} \\
&= \Pr \{ \min(\gamma_{R1}, \gamma_1) < u \} = 1 - \Pr\{\gamma_{R1} > u\} \Pr\{\gamma_1 > u\} \\
&= 1 - \Pr\left\{ \max_{1 \leq m \leq M} \{\gamma_{R1}^m\} > u \right\} \Pr\left\{ \max_{1 \leq n \leq N} \{\gamma_1^n\} > u \right\}, \tag{3.12}
\end{aligned}$$

em que  $u = 2^{2R_{th}} - 1$ . Sendo  $F_X(\cdot)$  a CDF de uma variável aleatória arbitrária  $X$ , segue que:

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^1 &= 1 - (1 - (\Pr\{\gamma_{R1}^m \leq u\})^M)(1 - (\Pr\{\gamma_1^n \leq u\})^N) \\
&= (F_{\gamma_{R1}^m}(u))^M + (F_{\gamma_1^n}(u))^N - (F_{\gamma_{R1}^m}(u))^M * (F_{\gamma_1^n}(u))^N, \tag{3.13}
\end{aligned}$$

em que:

$$\begin{aligned}
F_{\gamma_{R1}^m}(u) &= \Pr \left\{ \frac{|h_{SR}^m|^2 a_1 \rho_S}{|h_{SR}^m|^2 a_2 \rho_S + d_{SR}^\tau} \leq u \right\} \\
&= \Pr \left\{ |h_{SR}^m|^2 \leq \frac{u d_{SR}^\tau}{a_1 \rho_S - u a_2 \rho_S} \right\} \\
&= F_{|h_{SR}^m|^2} \left( \frac{u d_{SR}^\tau}{\rho_{Sv}} \right) = 1 - e^{-\frac{u d_{SR}^\tau}{\rho_{Sv} \beta_{SR}^m}}, \tag{3.14}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
F_{\gamma_1^n}(u) &= \Pr \left\{ \frac{|h_1^n|^2 b_1 \rho_R}{|h_1^n|^2 b_2 \rho_R + d_1^\tau} \leq u \right\} \\
&= \Pr \left\{ |h_1^n|^2 \leq \frac{u d_1^\tau}{b_1 \rho_R - u b_2 \rho_R} \right\} \\
&= F_{|h_1^n|^2} \left( \frac{u d_1^\tau}{\rho_{Rw}} \right) = 1 - e^{-\frac{u d_1^\tau}{\rho_{Rw} \beta_1}}, \tag{3.15}
\end{aligned}$$

em que  $v = a_1 - u a_2$  e  $w = b_1 - u b_2$ .

Substituindo (3.14) e (3.15) em (3.13), a probabilidade de *outage* para U1 é obtida.

Similarmente, para U2, a Eq. (3.11) pode ser reescrita alternativamente como:

$$\begin{aligned}
P_{\text{out}}^2 &= \Pr \left\{ \frac{1}{2} \log_2(1 + \min(\gamma_{R2}, \gamma_2)) < R_{th} \right\} \\
&= \Pr \{ \min(\gamma_{R2}, \gamma_2) < u \} = 1 - \Pr\{\gamma_{R2} > u\} \Pr\{\gamma_2 > u\} \\
&= 1 - \Pr\left\{ \max_{1 \leq m \leq M} \{\gamma_{R2}^m\} > u \right\} \Pr\left\{ \max_{1 \leq n \leq N} \{\gamma_2^n\} > u \right\} \\
&= 1 - (1 - (\Pr\{\gamma_{R2}^m \leq u\})^M)(1 - (\Pr\{\gamma_2^n \leq u\})^N) \\
&= (F_{\gamma_{R2}^m}(u))^M + (F_{\gamma_2^n}(u))^N - (F_{\gamma_{R2}^m}(u))^M * (F_{\gamma_2^n}(u))^N, \tag{3.16}
\end{aligned}$$

em que:

$$\begin{aligned}
F_{\gamma_2^n}(u) &= \Pr \left\{ \frac{|h_2^n|^2 b_2 \rho_R}{d_2^\tau} \leq u \right\} \\
&= \Pr \left\{ |h_2^n|^2 \leq \frac{u d_2^\tau}{b_2 \rho_R} \right\} \\
&= F_{|h_2^n|^2} \left( \frac{u d_2^\tau}{b_2 \rho_R} \right) = 1 - e^{-\frac{u d_2^\tau}{b_2 \rho_R \beta_2^m}}, \tag{3.17}
\end{aligned}$$

e

$$\begin{aligned}
F_{\gamma_{R2}^m}(u) &= \Pr \left\{ \frac{|h_{SR}^m|^2 a_2 \rho_S}{d_{SR}^\tau} \leq u \right\} \\
&= \Pr \left\{ |h_{SR}^m|^2 \leq \frac{u d_{SR}^\tau}{a_2 \rho_S} \right\} \\
&= F_{|h_{SR}^m|^2} \left( \frac{u d_{SR}^\tau}{a_2 \rho_S} \right) = 1 - e^{-\frac{u d_{SR}^\tau}{a_2 \rho_S \beta_{SR}^m}}. \tag{3.18}
\end{aligned}$$

Fazendo a substituição de (3.17) e (3.18) em (3.16) a probabilidade de *outage* para U2 é obtida.

### 3.4 Probabilidade de Outage Assintótica

Com base nos resultados precedentes, realizar-se-á agora uma análise de *outage* assintótica para U1 e U2 com o intuito de avaliar o comportamento da  $P_{\text{out}}^1$  e  $P_{\text{out}}^2$ , respectivamente, para regimes de alta SNR.

Assim como em trabalhos anteriores, definimos a SNR de transmissão como  $\rho = \rho_S = \rho_R$ . Usando o fato de que  $e^{-a/x} \approx 1 - a/x$  quando  $x \rightarrow \infty$ , temos que:

$$F_{\gamma_{R1}^m}^{\rho \rightarrow \infty}(u) = 1 - \left( 1 - \frac{u d_{SR}^\tau}{\rho v \beta_{SR}^m} \right) = \frac{u d_{SR}^\tau}{\rho v \beta_{SR}^m}, \tag{3.19}$$

$$F_{\gamma_1^n}^{\rho \rightarrow \infty}(u) = 1 - \left( 1 - \frac{u d_1^\tau}{\rho w \beta_1^m} \right) = \frac{u d_1^\tau}{\rho w \beta_1^m}. \tag{3.20}$$

Sabendo que  $P_{\text{out}}^1 = (F_{\gamma_{R1}^m}(u))^M + (F_{\gamma_1^n}(u))^N - (F_{\gamma_{R1}^m}(u))^M * (F_{\gamma_1^n}(u))^N$  e dado que  $(F_{\gamma_{R1}^m}(u))^M * (F_{\gamma_1^n}(u))^N \ll (F_{\gamma_{R1}^m}(u))^M + (F_{\gamma_1^n}(u))^N$  quando  $\rho \rightarrow \infty$ , uma expressão assintótica para a probabilidade de *outage* pode ser determinada como:

$$P_{\text{out}, \rho \rightarrow \infty}^1 = \begin{cases} (F_{\gamma_{R1}^m}(u))^M, & \text{se } M < N, \\ (F_{\gamma_{R1}^m}(u))^M + (F_{\gamma_1^n}(u))^N, & \text{se } M = N, \\ (F_{\gamma_1^n}(u))^N, & \text{se } M > N. \end{cases} \tag{3.21}$$

Similarmente, para U2 tem-se:

$$F_{\gamma_{R2}}^{\rho \rightarrow \infty}(u) = 1 - \left(1 - \frac{ud_{SR}^{\tau}}{a_2 \rho \beta_{SR}^m}\right) = \frac{ud_{SR}^{\tau}}{a_2 \rho \beta_{SR}^m}, \quad (3.22)$$

$$F_{\gamma_2}^{\rho \rightarrow \infty}(u) = 1 - \left(1 - \frac{ud_2^{\tau}}{b_2 \rho \beta_2^m}\right) = \frac{ud_2^{\tau}}{b_2 \rho \beta_2^m}. \quad (3.23)$$

E novamente,  $P_{\text{out}}^2 = (F_{\gamma_{R2}}^m(u))^M + (F_{\gamma_2}^n(u))^N - (F_{\gamma_{R2}}^m(u))^M * (F_{\gamma_2}^n(u))^N$  e dado que  $(F_{\gamma_{R2}}^m(u))^M * (F_{\gamma_2}^n(u))^N \ll (F_{\gamma_{R2}}^m(u))^M + (F_{\gamma_2}^n(u))^N$  quando  $\rho \rightarrow \infty$ , a expressão assintótica para a probabilidade de *outage* para U2 pode ser determinada como:

$$P_{\text{out}, \rho \rightarrow \infty}^2 = \begin{cases} (F_{\gamma_{R2}}^m(u))^M, & \text{se } M < N, \\ (F_{\gamma_{R2}}^m(u))^M + (F_{\gamma_2}^n(u))^N, & \text{se } M = N, \\ (F_{\gamma_2}^n(u))^N, & \text{se } M > N. \end{cases} \quad (3.24)$$

A ordem de diversidade é definida matematicamente como:

$$d = - \lim_{\text{SNR} \rightarrow \infty} \frac{\log P_{\text{out}, \text{asym}}(\text{SNR})}{\log \text{SNR}}, \quad (3.25)$$

e representa a inclinação das curvas de desempenho em regimes de altas SNRs. Dessa forma, de (3.21) e (3.24), pode-se concluir que a ordem de diversidade para ambos os usuários é dada por  $d = \min(M, N)$ , ou seja, pelo valor mínimo do número de antenas.

### 3.5 NOMA Inspirado em Rádio Cognitivo

Nas seções anteriores, foi considerada uma opção fixa de coeficientes de alocação de potência e, nesta seção, será utilizada uma opção mais sofisticada. Nos concentramos no mesmo caso da Seção 3.2, em que a antena que maximiza o ganho do canal é selecionada para a transmissão na estação base e a combinação por seleção é usada nos terminais móveis. Uma observação importante é que existe um dilema nos sistemas NOMA para a escolha de  $a_1$  e  $a_2$ . Da perspectiva da taxa de transferência geral do sistema, uma escolha ideal de  $a_1$  é  $a_1 = 0$ , já que U1 possui condições de canais ruins e toda a potência seria alocada ao usuário com melhores condições de canal. Mas essa escolha ignora completamente a justiça do usuário, que é um dos benefícios da aplicação do NOMA.

Nesta seção focamos o nosso cenário em um sistema NOMA cooperativo inspirado em rádio cognitivo (CR-NOMA). Neste caso, tratamos usuários com conexões ruins como usuários primários e usuários com condições de canais boas como usuários secundários. Se o NOMA for usado, a largura de banda ortogonal alocada ao usuário U1 não poderá ser acessada por outros usuários, apesar do usuário U1 ter uma conexão ruim com o BS; isto é, o recurso de largura de banda alocado para esse usuário não pode ser usado com eficiência.

Ao considerar NOMA como um caso especial de rádio cognitivo, um usuário com más condições de canal é considerado como usuário primário compartilhando o mesmo espectro com o usuário secundário que possui boas condições de canal. A vantagem desse cenário é que o requisito de QoS do usuário fraco pode ser estritamente garantido. Seguindo o conceito de redes rádio cognitivas, uma rede CR-NOMA pode ser projetada da seguinte maneira. Suponha que a estação base precise atender o usuário com condição de canal ruim que não seja atendido por um longo tempo. Devido a alta prioridade das mensagens desse usuário, ou à justiça do usuário, ele pode ser visto como um usuário primário em um sistema de rádio cognitivo. Um usuário forte pode ser admitido no mesmo canal do usuário fraco com a condição de que não cause muita degradação de desempenho ao usuário fraco (DING *et al.*, 2016b).

Lembre-se que, no cenário proposto, os ganhos de desvanecimento do canal foram ordenados como  $|h_1|^2 \leq |h_2|^2$ , o que significa que U1 pode ser considerado como usuário primário e deve ser atendido com alta prioridade, com base nos conceitos das redes rádio cognitivas. U2, o usuário com condição de canal mais forte, é introduzido no canal utilizado por U1 (HUSSEIN *et al.*, 2016). Considere  $I$  como a SINR alvo para o usuário U1, o que significa que a escolha do coeficiente de alocação de potência  $b_1$  e  $b_2$  precisa atender a seguinte restrição:

$$\frac{|h_1|^2 b_1 \rho_R}{|h_1|^2 b_2 \rho_R + d_1^\tau} \geq I, \quad (3.26)$$

o que implica que o fator de potência máxima transmitida  $b_2$  que pode ser alocado para a transmissão da mensagem de U2 será dado por:

$$b_2 = \max \left\{ 0, \frac{|h_1|^2 - \frac{I d_1^\tau}{\rho_R}}{|h_1|^2 (I + 1)} \right\}. \quad (3.27)$$

Da Eq. (3.27), pode-se verificar que  $b_2 = 0$  se  $|h_1|^2 < \frac{I d_1^\tau}{\rho_R}$ . Note que, diferente da escolha do coeficiente de alocação de potência constante usada no NOMA fixo, no CR-NOMA

a escolha de  $b_2$  é uma função do coeficiente de canal  $h_1$ . O objetivo desta política de alocação de potência inspirada por rádio cognitivo é para garantir que os requisitos de QoS do usuário 1 sejam cumpridos rigorosamente, e a BS possa explorar os graus de liberdade no domínio da potência para servir o usuário 2 oportunisticamente, ou seja, o usuário 1 sempre será atendido com potência suficiente para satisfazer seus requisitos de QoS e se ainda houver potência, o usuário 2 será atendido usando a potência restante.

Como a QoS de U1 pode ser garantida devido à restrição imposta pela Eq. (3.26), nós precisamos somente analisar o desempenho experimentado por U2. Em particular, o desempenho de *outage* de U2 é definido da seguinte maneira:

$$P_{out}^2 = \Pr\{R_2 < R_{th}\} = \Pr\left(\frac{1}{2} \log_2(1 + \min(\gamma_{R_2}, \gamma_2)) < R_{th}\right), \quad (3.28)$$

em que  $R_2$  é a taxa de transmissão de U2 descrita pela Eq. (3.10) e  $R_{th}$  é a taxa de desempenho alvo. Resolvendo a Eq. (3.28) temos que:

$$\begin{aligned} P_{out}^2 &= \Pr\left(\frac{1}{2} \log_2(1 + \min(\gamma_{R_2}, \gamma_2)) < R_{th}\right) \\ &= 1 - \Pr\left(\frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{R_2}) > R_{th}\right) \Pr\left(\frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_2) > R_{th}\right) \\ &= 1 - \left(1 - \Pr\left(\frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_{R_2}) \leq R_{th}\right)\right) \left(1 - \Pr\left(\frac{1}{2} \log_2(1 + \gamma_2) \leq R_{th}\right)\right) \\ &= 1 - \left(1 - \left(\underbrace{\Pr\left(\frac{1}{2} \log_2\left(1 + \frac{|h_{SR}|^2 a_2 \rho_S}{d_{SR}^\tau}\right) \leq R_{th}\right)}_{Q_1}\right)^M\right) \times \\ &\quad \left(1 - \left(\underbrace{\Pr\left(\frac{1}{2} \log_2\left(1 + \frac{|h_2|^2 b_2 \rho_R}{d_2^\tau}\right) \leq R_{th}\right)}_{Q_2}\right)^N\right). \end{aligned} \quad (3.29)$$

Sabendo que  $b_2$  foi definido pela Eq.(3.27), vamos calcular  $Q_2$  da Eq.(3.29),

$$\begin{aligned} Q_2 &= \Pr\left(\frac{1}{2} \log_2\left(1 + \frac{b_2 \rho_R |h_2|^2}{d_2^\tau}\right) < R_{th}\right) \\ &= \Pr\left(\frac{1}{2} \log_2\left(1 + \frac{|h_1|^2 - \frac{Id_1^\tau}{\rho_R}}{|h_1|^2 (I+1)} \frac{\rho_R}{d_2^\tau} |h_2|^2\right) < R_{th} \mid |h_1|^2 > \frac{Id_1^\tau}{\rho_R}\right) \times \Pr\left(|h_1|^2 > \frac{Id_1^\tau}{\rho_R}\right) \\ &\quad + \Pr\left(|h_1|^2 < \frac{Id_1^\tau}{\rho_R}\right). \end{aligned} \quad (3.30)$$

Calculando  $Q_3$  da equação anterior, temos que:

$$\begin{aligned}
Q_3 &= \Pr \left( \frac{|h_1|^2 \rho_R |h_2|^2}{|h_1|^2 (1+I) d_2^\tau} - \frac{Id_1^\tau |h_2|^2}{|h_1|^2 (1+I) d_2^\tau} < 2^{2R_{th}} - 1 \mid |h_1|^2 > \frac{Id_1^\tau}{\rho_R} \right) \\
&= \Pr \left( \frac{\rho_R |h_2|^2}{(1+I) d_2^\tau} - \frac{Id_1^\tau}{(1+I) d_2^\tau} \frac{|h_2|^2}{|h_1|^2} < 2^{2R_{th}} - 1 \mid |h_1|^2 > \frac{Id_1^\tau}{\rho_R} \right) \\
&= \Pr \left( \frac{|h_2|^2}{|h_1|^2} > \frac{\rho_R |h_2|^2}{Id_1^\tau} - \frac{u(1+I) d_2^\tau}{Id_1^\tau} \mid |h_1|^2 > \frac{Id_1^\tau}{\rho_R} \right) \\
&= 1 - \Pr \left( \frac{|h_2|^2}{|h_1|^2} \leq \frac{\rho_R |h_2|^2}{Id_1^\tau} - \frac{u(1+I) d_2^\tau}{Id_1^\tau} \mid |h_1|^2 > \frac{Id_1^\tau}{\rho_R} \right),
\end{aligned} \tag{3.31}$$

em que  $u = 2^{2R_{th}} - 1$ . Seja  $x = |h_1|^2$ ,  $y = |h_2|^2$  e  $z = \frac{|h_2|^2}{|h_1|^2} = \frac{y}{x}$  podemos fazer uso dos conceitos de teoria de probabilidade (GARCIA, 2008), dessa forma podemos reescrever a Eq. (3.31) como:

$$Q_3 = 1 - \int \int_S f_{Z,Y}(z,y) dz dy = 1 - \int \int_S f_{Z|Y}(z|y) f_Y(y) dz dy. \tag{3.32}$$

A PDF e a CDF de  $Z$  condicionada a  $Y$  podem ser determinadas, respectivamente como:

$$f_{Z|Y}(z|y) = \int_0^\infty x \frac{1}{x} e^{-\frac{x}{\bar{x}}} \frac{1}{y} e^{-\frac{zx}{y}} dx = \frac{1}{\bar{x}y \left( \frac{1}{\bar{x}} + \frac{z}{y} \right)^2}, \tag{3.33}$$

$$F_{Z|Y}(\gamma) = \int_0^\gamma \frac{1}{\bar{x}y \left( \frac{1}{\bar{x}} + \frac{z}{y} \right)^2} dz = \frac{\gamma \bar{x}}{\gamma \bar{x} + y}. \tag{3.34}$$

Baseado nos resultados acima,  $Q_3$  na Eq. (3.32) pode ser reescrito como:

$$\begin{aligned}
Q_3 &= 1 - \int_0^\infty F_{Z|Y} \left( \frac{\rho_R y}{Id_1^\tau} - \frac{u(1+I) d_2^\tau}{Id_1^\tau} \mid y \right) \frac{1}{y} e^{-\frac{y}{\bar{y}}} dy \\
&= 1 - \int_0^\infty \frac{\left( \frac{\rho_R y}{Id_1^\tau} - \frac{u(1+I) d_2^\tau}{Id_1^\tau} \right) \bar{x}}{\left( \frac{\rho_R y}{Id_1^\tau} - \frac{u(1+I) d_2^\tau}{Id_1^\tau} \right) \bar{x} + y} \frac{1}{y} e^{-\frac{y}{\bar{y}}} dy \\
&= 1 - \left( \frac{\bar{y} - \frac{Id_1^\tau e^{-\frac{(1+I) d_2^\tau u \bar{x}}{\rho_R \bar{x}}}}{\rho_R \bar{x}} \bar{y} \times \Gamma \left( 0, \frac{Id_1^\tau - \frac{(1+I) d_2^\tau u \bar{x}}{\rho_R \bar{x}}}{\rho_R \bar{x}} \right)}{\rho_R \bar{x}}}{\bar{y}} \right),
\end{aligned} \tag{3.35}$$

em que  $\Gamma(\cdot)$  denota a função gamma incompleta [Eq. 8.350.1 de (GRADSHTEYN; RYZHIK, 2007)]. A última integral da equação anterior foi obtida com ajuda do *software* Mathematica.

Substituindo a Eq. (3.35) na Eq. (3.30), temos que  $Q_2$  é dado por:

$$\begin{aligned}
Q_2 &= Q_3 \times \left( 1 - \Pr \left( |h_1|^2 \leq \frac{Id_1^\tau}{\rho_R} \right) \right) + \Pr \left( |h_1|^2 < \frac{Id_1^\tau}{\rho_R} \right) \\
&= Q_3 \times \left( 1 - \int_0^{\frac{Id_1^\tau}{\rho_R}} \frac{1}{\bar{x}} e^{-\frac{x}{\bar{x}}} dx \right) + \int_0^{\frac{Id_1^\tau}{\rho_R}} \frac{1}{\bar{x}} e^{-\frac{x}{\bar{x}}} dx \\
&= Q_3 \times \left( e^{-\frac{Id_1^\tau}{\rho_R \bar{x}}} \right) + 1 - e^{-\frac{Id_1^\tau}{\rho_R \bar{x}}}.
\end{aligned} \tag{3.36}$$

Fazendo  $a_2 = b_2$  e aplicando a mesma estratégia realizada na Eq.(3.30), vamos calcular agora  $Q_1$  da Eq.(3.29). Temos que  $Q_1$  é dado por:

$$\begin{aligned}
Q_1 &= \Pr \left( \frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{a_2 \rho_S |h_{SR}|^2}{d_{SR}^\tau} \right) < R_{th} \right) \\
&= \Pr \left( \underbrace{\frac{1}{2} \log_2 \left( 1 + \frac{|h_1|^2 - \frac{Id_1^\tau}{\rho_R}}{|h_1|^2 (I+1)} \frac{\rho_S}{d_{SR}^\tau} |h_{SR}|^2 \right)}_{Q_4} < R_{th} \mid |h_1|^2 > \frac{Id_1^\tau}{\rho_R} \right) \times \Pr \left( |h_1|^2 > \frac{Id_1^\tau}{\rho_R} \right) \\
&\quad + \Pr \left( |h_1^n|^2 < \frac{Id_1^\tau}{\rho_R} \right).
\end{aligned} \tag{3.37}$$

Calculando  $Q_4$  da equação anterior, temos que:

$$\begin{aligned}
Q_4 &= \Pr \left( \frac{\rho_S |h_{SR}|^2}{(1+I)d_{SR}^\tau} - \frac{|h_{SR}|^2}{|h_1|^2} \frac{\rho_S}{\rho_R} \frac{Id_1^\tau}{(1+I)d_{SR}^\tau} < 2^{2R_{th}} - 1 \mid |h_1|^2 > \frac{Id_1^\tau}{\rho_R} \right) \\
&= \Pr \left( \frac{|h_{SR}|^2}{|h_1|^2} > \frac{\rho_R |h_{SR}|^2}{Id_1^\tau} - \frac{u(1+I)d_{SR}^\tau \rho_R}{Id_1^\tau \rho_S} \mid |h_1|^2 > \frac{Id_1^\tau}{\rho_R} \right) \\
&= 1 - \Pr \left( \frac{|h_{SR}|^2}{|h_1|^2} < \frac{\rho_R |h_{SR}|^2}{Id_1^\tau} - \frac{u(1+I)d_{SR}^\tau \rho_R}{Id_1^\tau \rho_S} \mid |h_1|^2 > \frac{Id_1^\tau}{\rho_R} \right).
\end{aligned} \tag{3.38}$$

Seja  $x = |h_1|^2$ ,  $w = |h_{SR}|^2$ ,  $k = \frac{|h_{SR}|^2}{|h_1|^2} = \frac{w}{x}$ , novamente podemos fazer uso dos conceitos de teoria de probabilidade, dessa forma podemos reescrever (3.38) como:

$$Q_4 = 1 - \int \int_S f_{K,W}(k,w) dk dw = 1 - \int \int_S f_{K|W}(k|w) f_W(w) dk dw. \tag{3.39}$$

A PDF e a CDF de  $K$  condicionada a  $W$  podem ser determinadas, respectivamente como:

$$f_{K|W}(k|w) = \int_0^\infty x \frac{1}{\bar{x}} e^{-\frac{x}{\bar{x}}} \frac{1}{\bar{w}} e^{-\frac{kx}{\bar{w}}} dx = \frac{1}{\bar{x}\bar{w} \left( \frac{1}{\bar{x}} + \frac{k}{\bar{w}} \right)^2}, \tag{3.40}$$

$$F_{K|W}(\gamma) = \int_0^\gamma \frac{1}{\bar{x}\bar{w} \left( \frac{1}{\bar{x}} + \frac{k}{\bar{w}} \right)^2} dk = \frac{\gamma \bar{x}}{\gamma \bar{x} + \bar{w}}. \tag{3.41}$$

Baseado nos resultados acima,  $Q_4$  na Eq. (3.39) pode ser reescrito como:

$$\begin{aligned}
Q_4 &= 1 - \int_0^\infty F_{K|W} \left( \frac{\rho_{RW}}{Id_1^\tau} - \frac{u(1+I)d_{SR}^\tau \rho_R}{Id_1^\tau \rho_S} \middle| w \right) \frac{1}{\bar{w}} e^{-\frac{w}{\bar{w}}} dw \\
&= 1 - \int_0^\infty \frac{\left( \frac{\rho_{RW}}{Id_1^\tau} - \frac{u(1+I)d_{SR}^\tau \rho_R}{Id_1^\tau \rho_S} \right) \bar{x}}{\left( \frac{\rho_{RW}}{Id_1^\tau} - \frac{u(1+I)d_{SR}^\tau \rho_R}{Id_1^\tau \rho_S} \right) \bar{x} + \bar{w}} \frac{1}{\bar{w}} e^{-\frac{w}{\bar{w}}} dw \\
&= 1 - \left( \frac{\rho_R \bar{x} - Id_1^\tau e^{\frac{Id_1^\tau \rho_S \bar{w} - d_{SR}^\tau \rho_R u \bar{x} - Id_{SR}^\tau \rho_R u \bar{x}}{\rho_R \rho_S \bar{w} \bar{x}}} \times \Gamma \left( 0, -\frac{(1+I)d_{SR}^\tau u}{\rho_S \bar{w}} + \frac{Id_1^\tau}{\rho_R \bar{x}} \right)}{\rho_R \bar{x}} \right),
\end{aligned} \tag{3.42}$$

em que a última integral da equação anterior foi obtida com ajuda do *software* Mathematica.

Substituindo a Eq. (3.42) na Eq. (3.37), temos que  $Q_1$  é dado por:

$$\begin{aligned}
Q_1 &= Q_4 \times \left( 1 - \Pr \left( |h_1|^2 < \frac{Id_1^\tau}{\rho_R} \right) \right) + \Pr \left( |h_1|^2 < \frac{Id_1^\tau}{\rho_R} \right) \\
&= Q_4 \times \left( 1 - \int_0^{\frac{Id_1^\tau}{\rho_R}} \frac{1}{\bar{x}} e^{-\frac{x}{\bar{x}}} dx \right) + \int_0^{\frac{Id_1^\tau}{\rho_R}} \frac{1}{\bar{x}} e^{-\frac{x}{\bar{x}}} dx \\
&= Q_4 \times \left( e^{-\frac{Id_1^\tau}{\rho_R \bar{x}}} + 1 - e^{-\frac{Id_1^\tau}{\rho_R \bar{x}}} \right).
\end{aligned} \tag{3.43}$$

Substituindo a Eq.(3.36) e a Eq.(3.43) na Eq.(3.29), temos a probabilidade de *outage* para U2:

$$P_{out}^2 = 1 - (1 - (Q_1)^M)(1 - (Q_2)^N). \tag{3.44}$$

O uso do CR-NOMA no ambiente cooperativo permite a admissão de um usuário com melhor condição de canal (usuário secundário) no mesmo canal que um usuário com pior condição de canal (usuário primário), sem causar grande degradação de desempenho no mesmo. Isso pode garantir estritamente a QoS do usuário primário e portanto, alcançar uma maior justiça entre os usuários, quando comparado com o NOMA com alocação de potência fixa.

A aplicação de NOMA e CR pode aumentar significativamente a chance de conexão de usuários secundários. Por exemplo, sem usar o NOMA, são necessários recursos separados de largura de banda para atender diferentes usuários secundários, o que pode potencialmente apresentar um longo atraso para que os usuários secundários sejam atendidos. O uso do NOMA pode garantir que vários usuários secundários sejam atendidos simultaneamente, o que aumenta efetivamente a conectividade dos usuários secundários. A alocação de potência nos transmissores secundários é fundamental para a aplicação do NOMA nas redes CR. Especificamente, é importante garantir que os usuários secundários sejam atendidos sem causar muita degradação

no desempenho no receptor primário, em que a interferência total observada no receptor primário é um critério importante. Por essa razão, é interessante que o estudo de CR e NOMA sejam aplicados em diferentes cenários.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Resultados Numéricos e Discussões

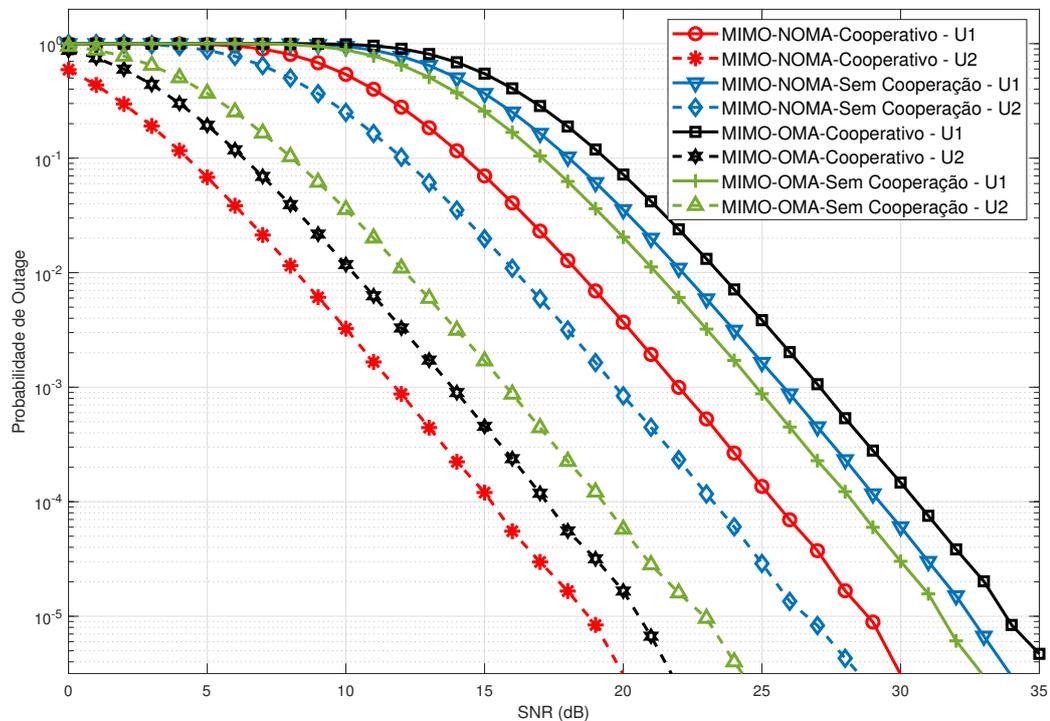
Nesta seção, resultados numéricos serão apresentados com o intuito de investigar o desempenho de *outage* de um sistema MIMO-NOMA cooperativo com seleção de antena na transmissão (TAS) e combinação por seleção (SC) na recepção. Simulações de Monte Carlo foram realizadas utilizando o *software* de simulação computacional MATLAB<sup>®</sup> com o intuito de validar as expressões para a probabilidade de *outage* desenvolvidas no Capítulo 3. As expressões serão validadas por meio da comparação dos resultados numéricos das simulações computacionais, e uma perfeita concordância será encontrada entre os mesmos, o que valida toda a análise apresentada durante o trabalho.

Consideramos um cenário com uma única estação base (S) equipada com  $M$  antenas, que transmite uma mensagem com o auxílio de um *relay* (R) dedicado do tipo DF equipado com uma única antena, para dois usuários móveis (U1 e U2) equipados com  $N$  antenas cada, como mostrado na Figura 6. Sem perda de generalidade, assume-se uma topologia plana  $(x, y)$  para todos os nós presentes no sistema. Dessa forma, a potência média do canal desvanecido entre um nó  $M$  e um nó  $N$  foi denotada como  $l^{-\tau}$ , em que  $\tau$  simboliza o expoente de perda de percurso e  $l = \sqrt{(x_M - x_N)^2 + (y_M - y_N)^2}$  representa a distância entre M e N. Denota-se a distância entre S e R como  $d_{SR} = 0,5$ , e denota-se  $d_1$  e  $d_2$  como a distância entre R e U1, e R e U2, respectivamente. Os canais associados a cada *link* são independentes e identicamente distribuídos (i.i.d.) com desvanecimento Rayleigh. Para cada simulação numérica foram consideradas  $10^7$  amostras de Monte Carlo. Além disso, considerou-se os coeficientes de alocação de potência em S e R iguais, ou seja,  $a_1 = b_1$  e  $a_2 = b_2$ . Considerou-se também o expoente de perda de percurso  $\tau = 3$  e assumiu-se que as SINRs alvos para os usuários U1 e U2 são as mesmas, isto é,  $u = 3$  dB.

A Figura 7 mostra a probabilidade de *outage versus* a SNR para quatro diferentes cenários: o MIMO-NOMA com cooperação e sem cooperação e o MIMO-OMA com cooperação e sem cooperação, para os dois usuários do sistema. Para todos os cenários considerou-se o número de antenas de transmissão da estação base  $M = 3$  e o número de antenas de recepção dos usuários móveis  $N = 3$ . Para o NOMA, considerou-se: os coeficientes de alocação de potência fixos em  $a_1 = b_1 = 0,8$  e  $a_2 = b_2 = 0,2$ , as distâncias para o NOMA cooperativo  $d_1 = 1,5$ ,  $d_2 = 0,5$  e  $d_{SR} = 0,5$  e para sem cooperação a distância S-U1 e S-U2 como 2 e 1, respectivamente,

para uma justa comparação. Para o OMA cooperativo, considerou-se as mesmas distâncias do NOMA cooperativo. No OMA sem cooperação, para uma justa comparação, também foram consideradas as seguintes distâncias entre S-U1 e S-U2 como 2 e 1, respectivamente. Além disso, para o OMA, considerou-se o dobro de intervalos de tempo de transmissão em relação ao NOMA. A partir da Figura 7 é possível perceber que os esquemas cooperativos fornecem um desempenho melhor que os esquemas não cooperativos, além da superioridade do esquema MIMO-NOMA cooperativo proposto em relação aos demais citados.

Figura 7 – Probabilidade de *outage* vs SNR. Comparação entre os protocolos MIMO-NOMA e MIMO-OMA com e sem cooperação.



Fonte – Autoria própria (2019).

#### 4.1.1 Impacto dos coeficientes de alocação de potência

Considerou-se inicialmente um cenário em que os coeficientes de alocação de potência são fixos. A Figura 8 plota a probabilidade de *outage versus* a SNR de transmissão a fim de avaliar o comportamento dos coeficientes de alocação de potência no desempenho sistêmico dos dois usuários. Como parâmetros, considerou-se  $M = N = 3$ ,  $d_1 = 1,5$  e  $d_2 = 0,5$ . Respeitando o princípio do NOMA,  $|a_1| > |a_2|$ , utilizou-se os seguintes coeficientes de alocação de potên-

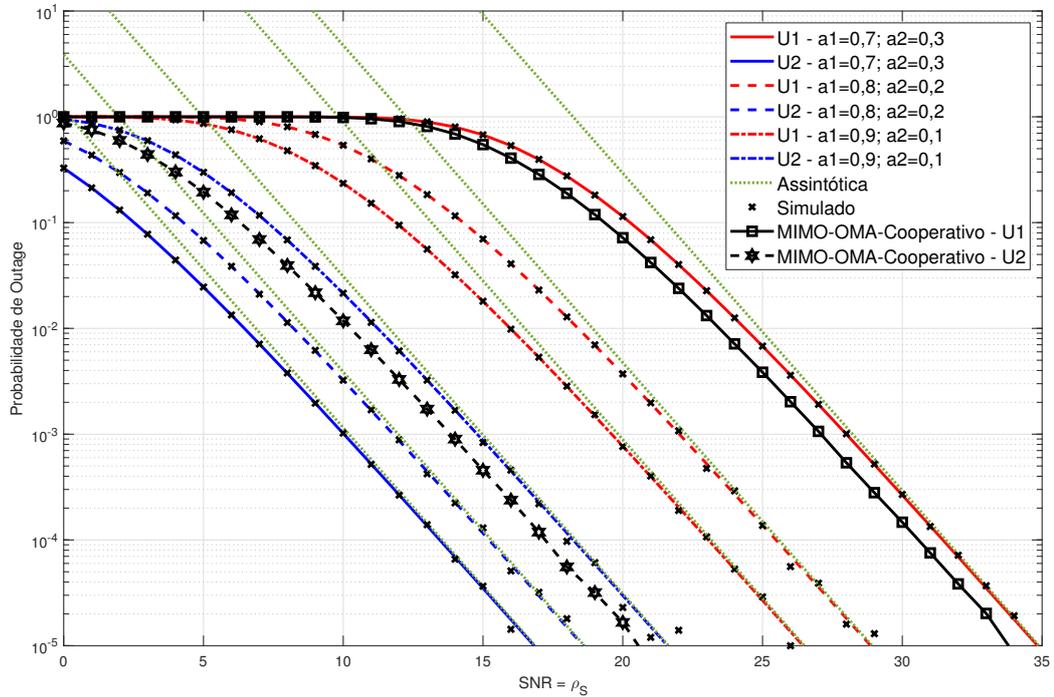
cia:  $\{a_1; a_2\} = \{0,7; 0,3\}, \{0,8; 0,2\}, \{0,9; 0,1\}$ , respeitando a restrição  $\sum_{i=1}^2 a_i = 1$ . Observe uma menor probabilidade de *outage* de U2 em relação à U1, o que ocorre devido às melhores condições de canal de U2 bem como a estratégia de alocação de potência fixa utilizada nesse cenário. Como pode ser visto na Figura 8, aumentar o valor de  $a_1$  causa diferentes alterações de desempenho nos diferentes usuários. Em particular, ao aumentar  $a_1$ , a probabilidade de *outage* no usuário com CSI mais forte está se deteriorando, mas o desempenho de *outage* no outro usuário é aprimorado, uma vez que mais potência é alocada para o usuário com CSI mais fraco. Observa-se também que o incremento da potência alocada para o usuário com as piores condições de canal e o decremento da potência do usuário com melhores condições de canal provoca uma aproximação das curvas dos dois usuários, que acontece com a melhoria da justiça entre os usuários frente ao balanceamento entre potência e qualidade do canal. Além disso, o comportamento das curvas assintóticas estão coerentes com a teoria, tangenciando as curvas analíticas nas regiões de altas SNR's. Por fim, uma perfeita concordância entre os resultados analíticos e as simulações é atestada.

Como já mencionado anteriormente, existe um dilema nos sistemas NOMA fixo para a escolha de  $a_1$  e  $a_2$ . Quando os fatores de alocação de potência fixa não forem escolhidos corretamente, para o NOMA fixo nem sempre é possível garantir o desempenho de *outage* superior ao OMA. Por exemplo, na Figura 8, para um fator de alocação de potência  $a_1 = 0,7$  e  $a_2 = 0,3$  o desempenho de U1 é pior do que para um sistema MIMO-OMA; para um fator de alocação de potência  $a_1 = 0,9$  e  $a_2 = 0,1$ , o desempenho de U2 é pior do que para um usuário nas mesmas condições em um sistema MIMO-OMA.

#### 4.1.2 Impacto do número de antenas

Os sistemas NOMA utilizando várias antenas, apesar de ampliar o desempenho do sistema, demandam uma maior complexidade computacional. No nosso cenário, em busca da redução dessa complexidade, decompomos um sistema MIMO-NOMA em SISO-NOMA aplicando técnica de seleção de antena em S e combinação por seleção nos receptores. A Figura 9 plota a probabilidade de *outage versus* SNR do sistema para diferentes configurações de antenas transmissoras e receptoras. Considerou-se  $d_1 = 1,5$ ,  $d_2 = 0,5$ ,  $a_1 = b_1 = 0,8$  e  $a_2 = b_2 = 0,2$ . Considerou-se o número de antenas transmissoras de S,  $M \in \{3,4\}$ , e o número de antenas receptoras de U1 e U2,  $N \in \{2,3\}$ . Como pode ser visto na figura, aumentar o número de antenas, tanto em S quanto em U1 e U2, a probabilidade de *outage* do sistema diminui, pois há

Figura 8 – Probabilidade de *outage* vs SNR para  $M = 3$  e  $N = 3$ ,  $d_{sr} = 0,5$ ,  $d_1 = 1,5$  e  $d_2 = 0,5$ . Variação dos coeficientes de alocação de potência fixa.



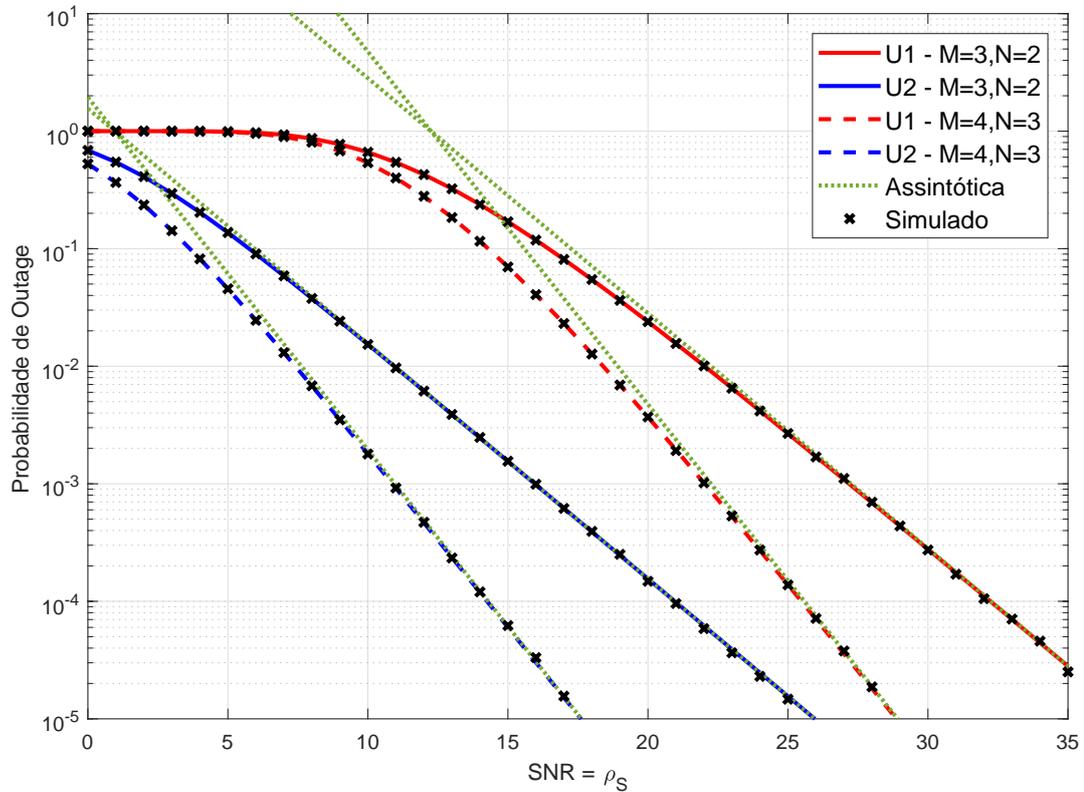
Fonte – Autoria própria (2019).

mais opções possíveis para selecionar a antena que maximize o ganho do canal na transmissão e o canal com maior SNR na recepção. Observe que o aumento do número de antenas melhora o desempenho para os dois usuários, fato que corrobora a superioridade do uso de esquema de seleção de antenas. Além disso, a inclinação das curvas de *outage* também aumenta, o que indica um aumento na ordem de diversidade e portanto, confirma as aferições demonstradas ao longo da análise em que a ordem de diversidade de cada curva é dada pelo valor mínimo entre o número de antenas. Percebe-se uma perfeita concordância entre os resultados analíticos desenvolvidos e as simulações numéricas realizadas.

#### 4.1.3 Impacto da posição do Usuário 1

A Figura 10 investiga o efeito da posição de U1 na probabilidade de *outage* do sistema. Fixou-se  $M = 3$ ,  $N = 3$  e os coeficientes de alocação de potência em  $a_1 = b_1 = 0,8$  e  $a_2 = b_2 = 0,2$ . Além disso, o usuário 2 foi posicionado a uma distância  $d_2 = 0,5$  de R, e variou-se a distância de U1 com relação a R em  $d_1 = 0,5$ ,  $d_1 = 1,0$  e  $d_1 = 1,5$ . Quando os dois usuários estão à mesma distância, isto é,  $d_1 = d_2 = 0,5$  de R, U1 tem o desempenho melhor do que U2 pois uma maior potência está sendo alocada para ele. A medida que U1 se afasta de R o

Figura 9 – Probabilidade de *outage* vs SNR para um sistema MIMO-NOMA cooperativo com  $a_1 = b_1 = 0,8$  e  $a_2 = b_2 = 0,2$ ,  $d_{sr} = 0,5$ ,  $d_1 = 1,5$  e  $d_2 = 0,5$ . Variação do número de antenas de transmissão e recepção.



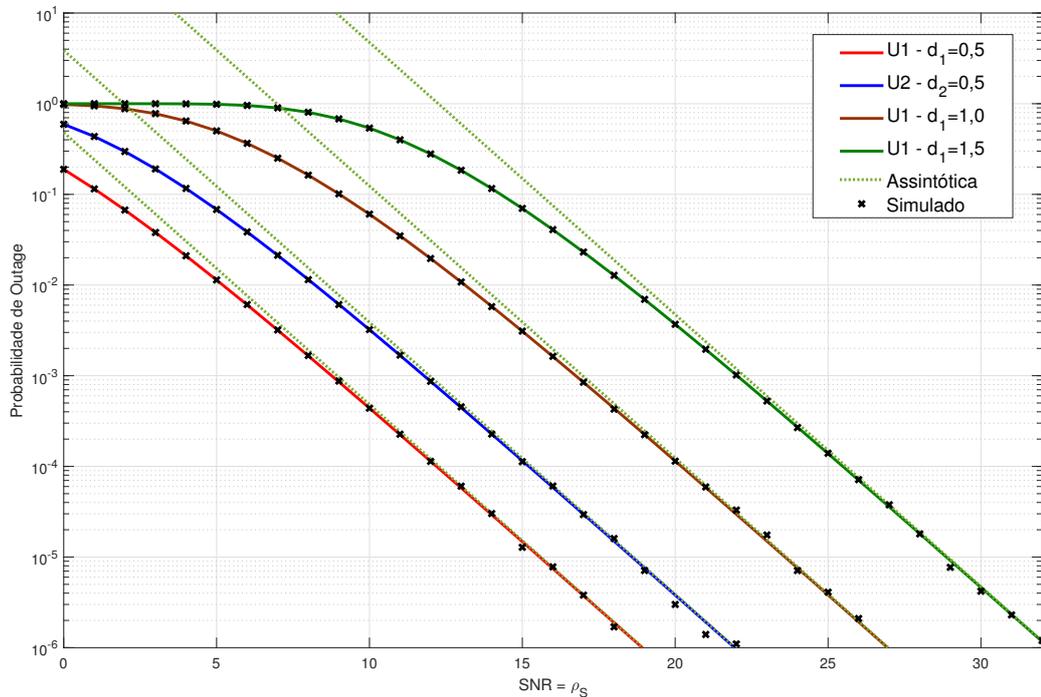
Fonte – Autoria própria (2019).

seu desempenho piora em relação a U2, mesmo que possua uma maior alocação de potência, devido às condições ruins de canal.

#### 4.1.4 Impacto da localização do relay

A Figura 11 ilustra o efeito da localização do *relay* na probabilidade de *outage* do sistema. Fixamos  $\rho_R = \rho_S = \rho = 20$  dB, e mantivemos a distância entre S e U1 fixa em 1, e S e U2 fixa em 0,75, e variamos a posição do *relay* em relação à S ( $d_{SR}$ ) entre 0 e 1. U1 é o usuário que apresenta os piores ganhos de canal e possui os níveis de potência de transmissão mais altos, e portanto sua alocação ótima de *relay* ocorre na metade da distância entre S e U1. O U2 apresenta as melhores condições de canal, com menos potência alocada para transmissão, portanto a localização ideal do *relay* é mais próxima à S. Para a rede OMA convencional, a SNR alvo satisfaz a equação:  $(1/2) \sum_{i=1}^2 \log(1 + \gamma_{hi}) = (1/2) \log(1 + \gamma_h)$  (MEN *et al.*, 2017). Para o OMA, o desempenho ideal do sistema ocorre com o *relay* posicionado na metade da distância

Figura 10 – Probabilidade de *outage* vs SNR para  $M = 3$  e  $N = 3$ ,  $a_1 = b_1 = 0,8$  e  $a_2 = b_2 = 0,2$ .  
Variação do posicionamento do usuário 1 com relação a BS.



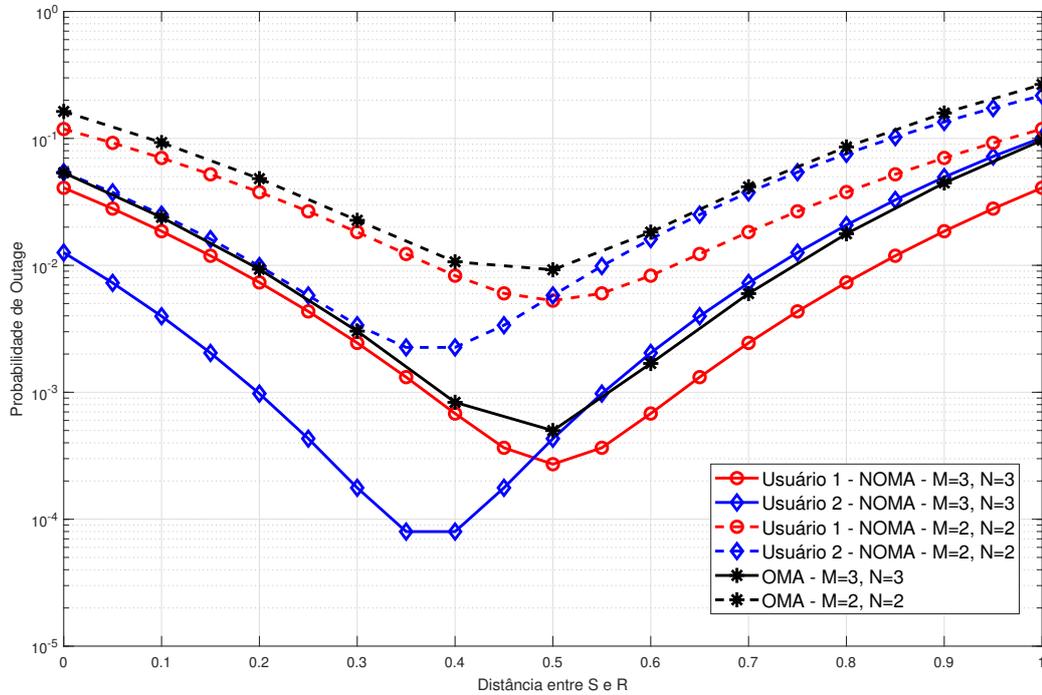
Fonte – Autoria própria (2018).

entre S e U1.

#### 4.1.5 Análise da taxa de dados

Na Figura 12 mostramos a taxa de dados alcançável *versus* a SNR do sistema. Utilizamos  $a_1 = b_1 = 0,8$  e  $a_2 = b_2 = 0,2$ ,  $d_1 = 1$ ,  $d_2 = 0,5$  e  $d_{SR} = 1$  para a rede MIMO-NOMA cooperativa. Para as redes sem cooperação, utilizou-se a distância S-U1 e S-U2 igual a 2 e 1.5, respectivamente para justa comparação entre os cenários. Podemos ver que a taxa de soma alcançada pela rede MIMO-NOMA cooperativa proposta supera a rede MIMO-OMA cooperativa convencional, além da MIMO-OMA e MIMO-NOMA sem cooperação. Como pode ser visto nesta figura, o MIMO-NOMA cooperativo supera os outros esquemas pois pode garantir que o ganho máximo de diversidade seja alcançado. Uma desvantagem do NOMA com alocação de potência fixa é que a taxa para o usuário com más condições de canal é muito menor do que a taxa do OMA, particularmente para altas SNR's.

Figura 11 – Probabilidade de *outage* vs Distância entre S e R para  $\rho_R = \rho_S = \rho = 20$  dB e  $a_1 = b_1 = 0,8$  e  $a_2 = b_2 = 0,2$ . Variação do posicionamento do *relay* em relação a BS.



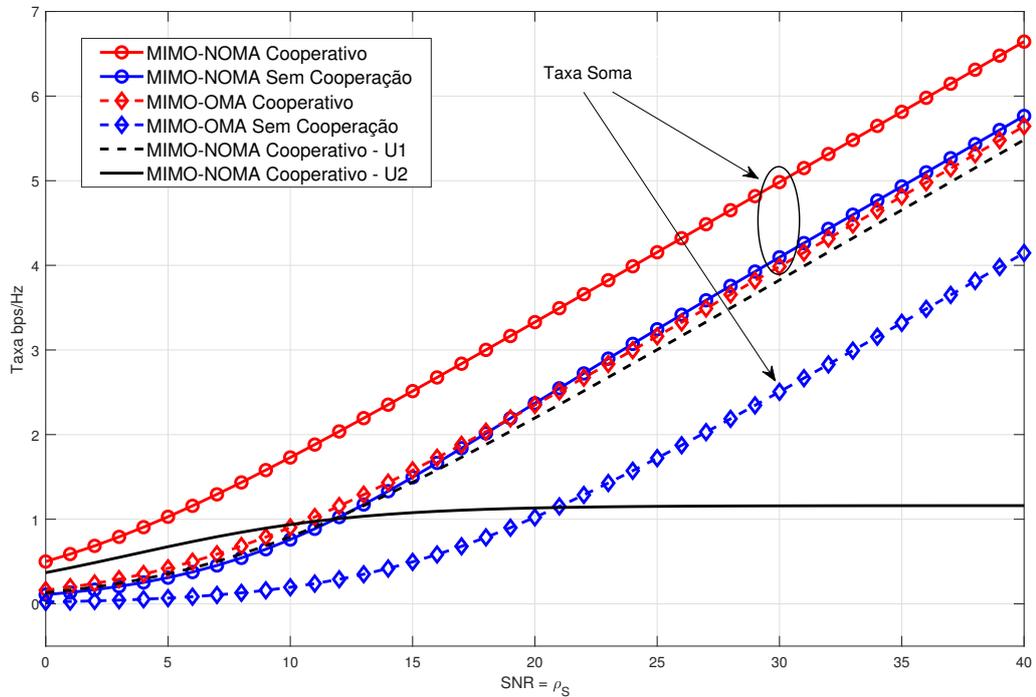
Fonte – Autoria própria (2018).

#### 4.1.6 Análise do CR-NOMA

Na Figura 13 a probabilidade de *outage* de U2 encontrada para o cenário CR-NOMA proposto na Seção 3.5, dada pela Eq. (3.44), é mostrada em função da SNR. A Figura 13 mostra o impacto do número de antenas em um sistema CR-NOMA. Para esta figura, apresentamos diferentes conjuntos de números de antenas de transmissão e recepção,  $\{M, N\} = \{2, 2\}$ ,  $\{3, 3\}$  e  $\{4, 4\}$ . Observa-se que a probabilidade de *outage* pode ser significativamente aprimorada aumentando-se o número de antenas na fonte e nos usuários. Além disso, conforme o aumento do número de antenas, a ordem de diversidade se torna maior.

Na Figura 14 fazemos uma comparação entre o NOMA com alocação de potência fixa e o NOMA inspirado em rádio cognitivo (CR-NOMA) proposto na Seção 3.5 em relação à probabilidade de *outage*. Para comparação, alocamos os coeficientes  $a_1 = b_1 = 0.8$  e  $a_2 = b_2 = 0.2$  para o NOMA com alocação fixa e variamos a restrição de SINR dada pela Eq. (3.26) em  $I = \{1, 2, 3, 5, 20\}$  dB. Comparando o cenário NOMA com alocação de potência fixa com o cenário do NOMA inspirando em rádio cognitivo é interessante notar que U2 tem o melhor desempenho para o CR-NOMA, entretanto seu desempenho piora a medida em que a restrição

Figura 12 – SNR vs Taxa de Transmissão para  $M = 3$  e  $N = 3$  e  $a_1 = b_1 = 0,8$  e  $a_2 = b_2 = 0,2$ . Análise da taxa de dados para os sistemas MIMO-NOMA e MIMO-OMA com e sem cooperação.

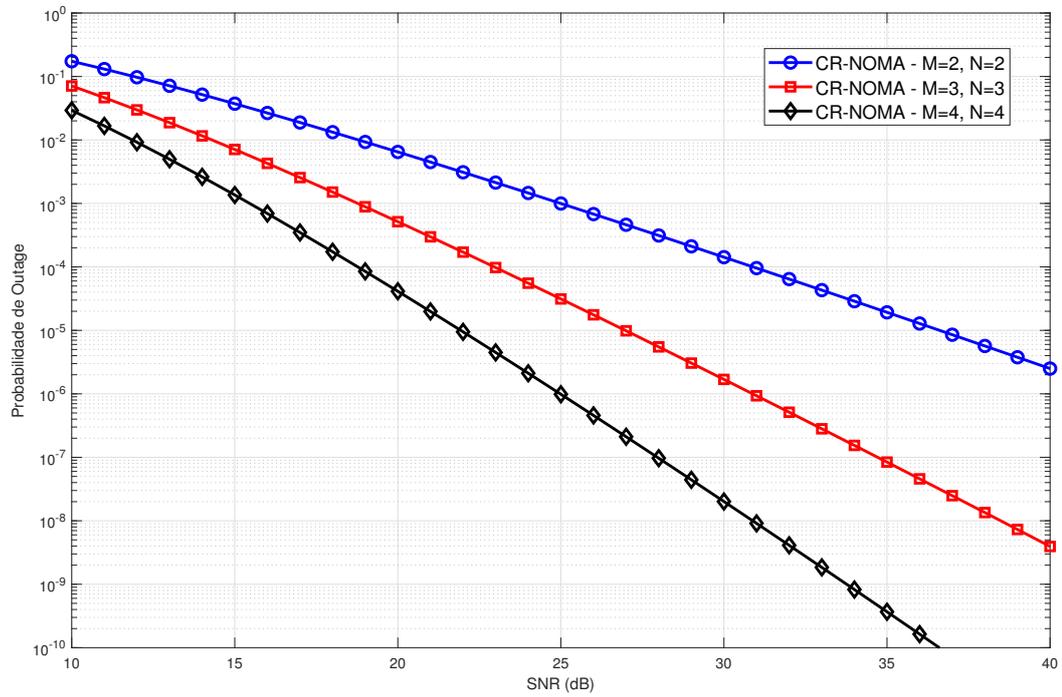


Fonte – Autoria própria (2019).

de SINR para U1 aumenta ( $I > 3dB$ ), com sua probabilidade de *outage* severamente prejudicada. Observe também que para uma SINR alta, a probabilidade de *outage* para U2 se aproxima de 1, o que significa que toda a potência do sistema foi usada para a transmissão de U1. Isso ocorre porque os fatores de alocação de potência  $a_2$  e  $b_2$  são uma função do ganho do canal do usuário fraco (U1) como mostra a Eq. (3.27), e o usuário forte (U2) pode não obter potência suficiente para a sua transmissão.

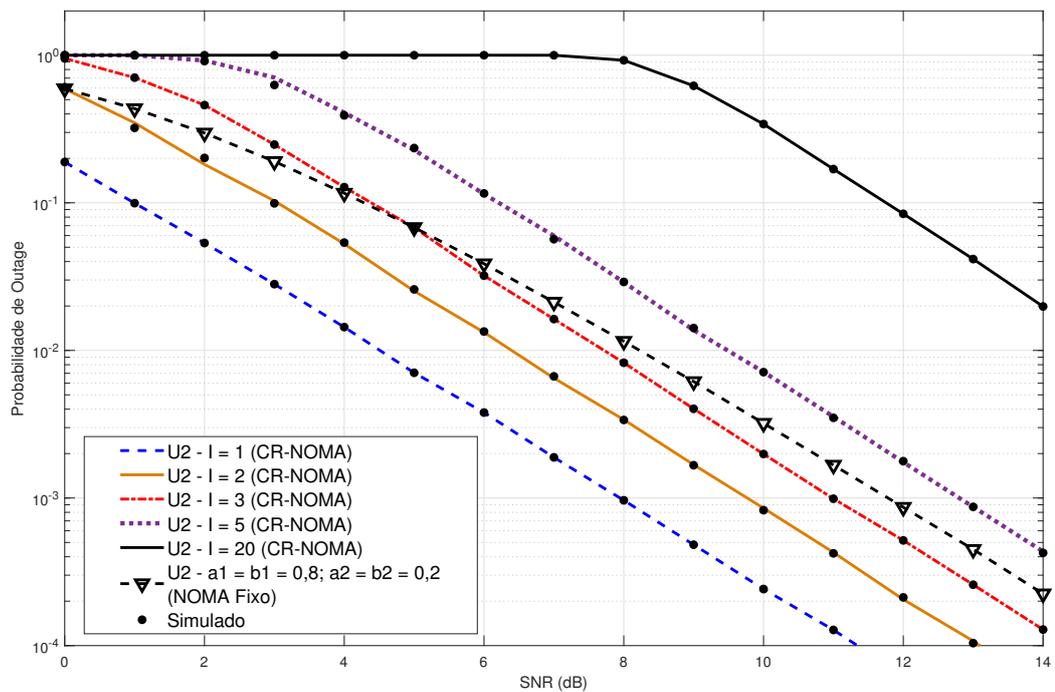
Na Figura 15 a probabilidade de *outage* para um sistema MIMO-NOMA inspirado em rádio cognitivo é comparada a um sistema MIMO-NOMA com alocação de potência fixa. Para análise nessa figura, variou-se os coeficientes de alocação de potência  $a_1 = b_1$  e  $a_2 = b_2$  para o MIMO-NOMA fixo em  $\{0.55, 0.45\}$ ,  $\{0.6, 0.4\}$ ,  $\{0.7, 0.3\}$ ,  $\{0.8, 0.2\}$  e  $\{0.9, 0.1\}$ , respectivamente. Para o CR-NOMA, foram mantidas as curvas para a SINR alvo do usuário 1 em  $I = 1$  e  $3$  dB. A partir da figura, percebe-se que o CR-NOMA tem um melhor desempenho que o NOMA fixo para algumas situações. Por exemplo, para uma SINR alvo de 1 dB, todas as estratégias de alocação de potência para o NOMA fixo obtêm um desempenho inferior. Para uma SINR alvo de 3 dB alguns esquemas de alocação de potência para o NOMA fixo superam

Figura 13 – SNR vs Probabilidade de *outage* para  $I = 1dB$ . Impacto do número de antenas em um sistema CR-NOMA.



Fonte – Autoria própria (2019).

Figura 14 – SNR vs Probabilidade de *outage* para  $M = 3$  e  $N = 3$ . Comparação entre o NOMA com alocação de potência fixa e o CR-NOMA.



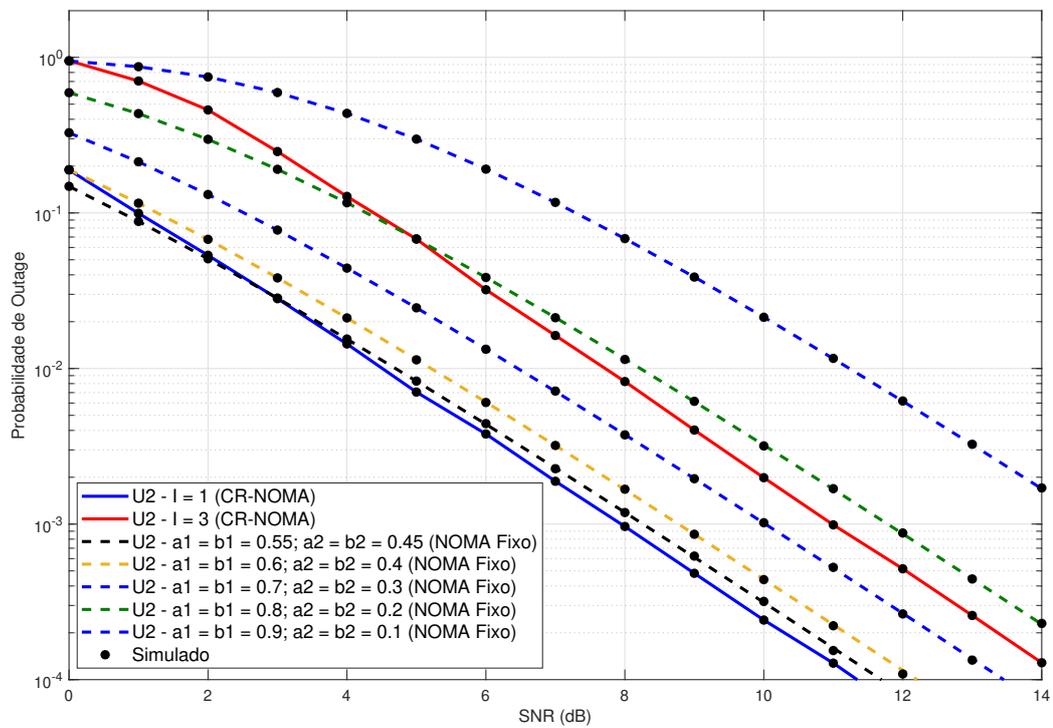
Fonte – Autoria própria (2019).

o desempenho de *outage* do CR-NOMA. Ou seja, de acordo com a escolha do coeficiente de alocação de potência para o NOMA fixo e da SINR alvo para o U1 no CR-NOMA, a probabilidade de *outage* em U2 pode ser severamente degradada. Isso é consistente com outros trabalhos, como por exemplo (DING *et al.*, 2016b; YANG *et al.*, 2016a), que mostram que o usuário com condições de canal mais fortes sofrerão alguma perda de desempenho devido a restrição imposta para o CR-NOMA pela Eq. (3.27), uma vez que U2 será servido oportunisticamente somente se os requisitos de QoS de U1 forem cumpridos.

É importante mencionar aqui que a escolha dos coeficientes de alocação de potência é a chave para alcançar uma troca favorável de equidade e rendimento nos sistemas NOMA. E que, apesar das diferenças de desempenho entre o CR-NOMA e o NOMA fixo, a estratégia de alocação de potência fixa pode atender a diferentes requisitos de QoS a longo prazo, enquanto que a estratégia de alocação de potência inspirada em rádio cognitivo pode garantir que os requisitos de QoS dos usuários sejam atendidos instantaneamente. Além disso, outras observações de trabalhos (DING *et al.*, 2016b; YANG *et al.*, 2016a) mostram que, apesar do desempenho de *outage* de U2 para o cenário do NOMA inspirado em rádio cognitivo não ser sempre superior ao NOMA fixo, a taxa de transferência total do sistema é melhorada. Vale ressaltar também que, se o OMA fosse utilizado no mesmo cenário, U2 não poderia ser admitido no canal ocupado por U1. Já com o CR-NOMA, esse usuário adicional pode ser atendido no mesmo canal sem degradar o desempenho de U1, visto que seus requisitos de QoS certamente serão atendidos.

A Figura 15 mostra que, na prática, se os requisitos de QoS de U1 forem rigorosos, exigindo uma maior SINR alvo para U1, o NOMA com alocação de potência fixa será a melhor escolha para U2, visto que a probabilidade de *outage* será menor. Caso contrário, o CR-NOMA é preferível, pois o desempenho de *outage* pode ser melhorado, uma vez que o sistema não gastará uma potência excessivamente alta para compensar o usuário com condições de canal ruins. A desvantagem do NOMA fixo é que a QoS pré-definida dos usuários não pode ser rigorosamente atendida. Por exemplo, o NOMA fixo não pode ser usado se a taxa de dados de destino para um usuário com condições de canal ruins for grande.

Figura 15 – SNR vs Probabilidade de *outage* para  $M = 3$  e  $N = 3$ . Variação dos coeficientes de alocação de potência fixa no NOMA vs a variação da SINR alvo para U1 no CR-NOMA.



Fonte – Autoria própria (2019).

## 5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O Acesso Múltiplo Não-Ortogonal (NOMA) se tornou o mais recente membro da família das técnicas de acesso múltiplo e é considerado um componente essencial das redes de futuras gerações, por melhorar significativamente a eficiência espectral das redes de comunicações móveis. Aliado a essa tecnologia, sistemas com terminais dotados de múltiplas antenas na transmissão e na recepção (MIMO) são introduzidos para obter diferentes vantagens, como confiabilidade da recepção e maiores taxas de dados, em vista da utilização dos graus espaciais de liberdade para melhorar a relação sinal-ruído ou a taxa de transferência do sistema. Além disso, utilizar cooperação entre usuários dos sistemas NOMA é uma escolha natural, uma vez que alguns desses usuários conhecem as informações enviadas aos outros e portanto, podem ser usados como *relays*. O NOMA cooperativo, com seu potencial de explorar a natureza heterogênea das futuras redes móveis, nas quais alguns usuários podem ter melhores recursos do que outros, pode melhorar a confiabilidade na recepção dos usuários fracos (como por exemplo os de borda de célula) solicitando que outros terminais atuem como *relays*. Finalmente, o NOMA pode ser tratado como um caso especial de rádio cognitivo, permitindo que os recursos de largura de banda sejam utilizados de forma eficiente.

Nessa dissertação, propomos a análise de um sistema NOMA que usa o domínio da potência para realizar a sobreposição dos sinais. O sistema NOMA está inserido em um ambiente cooperativo em que a estação base e os usuários móveis são equipados com múltiplas antenas e a transmissão das informações da estação base para os usuários móveis é auxiliada por um *relay* equipado com uma única antena. Os usuários compartilham os mesmos recursos de tempo/frequência e, para a transmissão pela fonte e pelo *relay*, os sinais dos diferentes usuários são multiplexados no domínio da potência. A retransmissão acontece sob o protocolo decodifica e encaminha (DF) e para a detecção dos sinais utiliza-se o cancelamento sucessivo de interferência (SIC). Para reduzir a complexidade computacional necessária para o processamento do sinal na transmissão e na recepção, adotou-se um esquema de seleção de antena (TAS) que maximize o ganho do canal entre os terminais e combinação por seleção (SC), respectivamente. Por fim, foi analisado um cenário MIMO-NOMA cooperativo inspirado em rádio cognitivo, em que o usuário com a pior condição de canal é tratado como um usuário principal e o usuário com melhor condição de canal é considerado um usuário secundário, que ocupa o canal utilizado prioritariamente pelo usuário primário causando uma interferência controlada, em que uma política de alocação de potência é obtida para atender a QoS do usuário primário.

O desempenho do sistema proposto ao longo dessa dissertação foi avaliado através de expressões analíticas para a probabilidade de *outage* e validado através de simulações de Monte Carlo apresentadas no Capítulo 4. Através das simulações, ratificamos a superioridade do sistema NOMA proposto em relação a ambientes sem cooperação e a ambientes com acesso múltiplo ortogonal. Avaliamos o efeito da variação dos coeficientes de alocação de potência no sistema proposto e obtivemos os resultados esperados. O desempenho do usuário com as piores condições de canal melhora a medida que aumentamos a potência alocada para a transmissão de sua mensagem, garantindo uma melhoria na justiça do sistema. Avaliamos também a influência do número de antenas presentes na estação base e nos usuários móveis. Verificou-se que o aumento no número de antenas aumenta a ordem de diversidade do sistema e garante uma melhoria no desempenho dos dois usuários. Outra avaliação realizada foi em relação a localização do Usuário 1 e o posicionamento do *relay* em relação a estação base e os usuários. Quando os dois usuários estão à mesma distância, o usuário 1 tem o melhor desempenho. A medida em que ele se afasta do *relay*, seu desempenho piora devido às condições de canal ruins. Em relação à melhor posição do *relay*, para o usuário 1 ocorre na metade da distância entre ele e a estação base, e para o usuário 2 a localização ideal é mais próxima da estação base. A taxa de dados também foi analisada, e mais uma vez corroborou a superioridade do sistema proposto em relação aos outros cenários apresentados. Por fim, para o cenário MIMO-NOMA cooperativo inspirado em rádio cognitivo, como a QoS do usuário 1 pode ser garantida pela restrição imposta ao coeficiente de alocação de potência, apenas o desempenho de *outage* do usuário 2 foi avaliado, com apresentação dos resultados esperados.

Como trabalhos futuros, o sistema apresentado e analisado pode ser estendido para os seguintes casos:

- Estudo de outras técnicas de transmissão e recepção por múltiplas antenas (diferentes esquemas MIMO) dentro do cenário proposto, além de diferentes esquemas de seleção de *relays* quando vários terminais colaboradores estiverem disponíveis.
- O cenário considerado pode também ser generalizado para o caso em que múltiplos usuários estejam disponíveis na rede, entretanto o aumento na quantidade de usuários aumenta a complexidade e a sobrecarga nos receptores dos usuários, uma vez que MIMO foi considerado no cenário. Para mais de dois usuários é relevante o estudo de alocação de recursos e técnicas de agrupamento/emparelhamento de

usuários com o objetivo de diminuir a complexidade do sistema.

- Expandir o cenário cooperativo proposto para um ambiente em que permita uma forma de colheita de energia (por exemplo, SWIPT) motivando os terminais a atuarem como *relays*, uma vez que a energia coletada poderá servir para a recarga de suas baterias e retransmissão do sinal, a fim de aliviar as restrições práticas de consumo de energia.
- A desvantagem do sistema NOMA inspirado em rádio cognitivo proposto no trabalho é que o usuário forte só poderá ser atendido pela estação base quando a QoS do usuário fraco for atendida. Diante disso, de acordo com a taxa alvo do usuário fraco, toda a potência disponível no sistema poderá ser alocada para dar suporte à esse usuário, e o usuário forte poderá não ser atendido. Para garantir que o usuário forte no sistema NOMA também possa ser atendido, pode-se estudar um outro cenário de NOMA inspirado em rádio cognitivo com requisito de QoS dinâmico baseado no usuário forte, impondo uma restrição de que esse usuário atinja pelo menos a mesma taxa de transferência que em um sistema OMA.
- Estudo do cenário NOMA cooperativo proposto em um ambiente de SIC imperfeito e considerando os efeitos da estimação imperfeita dos canais.
- Analisar o cenário proposto considerando uma alocação de potência adaptativa ótima para obter as melhores escolhas dos coeficientes de alocação de potência fixa  $a_1, a_2, b_1$  e  $b_2$ .

## REFERÊNCIAS

- ALI, M. S.; HOSSAIN, E.; KIM, D. I. Coordinated Multipoint Transmission in Downlink Multi-Cell NOMA Systems: Models and Spectral Efficiency Performance. **IEEE Wireless Communications**, IEEE, v. 25, n. 2, p. 24–31, 2018. ISSN 15361284.
- ALJOHANI, M. K.; MUSA, M. O.; ALRESHEEDI, M. T.; ELMIRGHANI, J. M. WDM NOMA VLC systems. **International Conference on Transparent Optical Networks**, IEEE, v. 2019-July, n. X, p. 1–5, 2019. ISSN 21627339.
- ANDREWS, J. G.; BUZZI, S.; CHOI, W.; HANLY, S. V.; LOZANO, A.; SOONG, A. C.; ZHANG, J. C. What will 5G be? **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, IEEE, v. 32, n. 6, p. 1065–1082, 2014. ISSN 07338716.
- BOCCARDI, F.; HEATH, R.; LOZANO, A.; MARZETTA, T. L.; POPOVSKI, P. Five disruptive technology directions for 5G. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 52, n. 2, p. 74–80, 2014. ISSN 01636804.
- CHEN, C.; ZHONG, W. D.; YANG, H.; DU, P. On the Performance of MIMO-NOMA-Based Visible Light Communication Systems. **IEEE Photonics Technology Letters**, IEEE, v. 30, n. 4, p. 307–310, 2018. ISSN 10411135.
- CHEN, J.; JIA, J.; LIU, Y.; WANG, X.; AGHVAMI, A. H. Optimal Resource Block Assignment and Power Allocation for D2D-Enabled NOMA Communication. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 90023–90035, 2019. ISSN 21693536.
- CHOI, J. Non-orthogonal multiple access in downlink coordinated two-point systems. **IEEE Communications Letters**, IEEE, v. 18, n. 2, p. 313–316, 2014. ISSN 10897798.
- COVER, T. M. Broadcast Channels. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 18, n. 1, p. 2–14, 1972. ISSN 15579654.
- CUI, J.; DING, Z.; FAN, P. A novel power allocation scheme under outage constraints in NOMA systems. **IEEE Signal Processing Letters**, IEEE, v. 23, n. 9, p. 1226–1230, 2016. ISSN 10709908.
- DAI, L.; WANG, B.; DING, Z.; WANG, Z.; CHEN, S.; HANZO, L. A survey of non-orthogonal multiple access for 5G. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, IEEE, v. 20, n. 3, p. 2294–2323, 2018. ISSN 1553877X.
- DAI, L.; WANG, B.; YUAN, Y.; HAN, S.; I, C. L.; WANG, Z. Non-orthogonal multiple access for 5G: Solutions, challenges, opportunities, and future research trends. **IEEE Communications Magazine**, v. 53, n. 9, p. 74–81, 2015. ISSN 01636804.
- DAI, Y.; SHENG, M.; LIU, J.; CHENG, N.; SHEN, X.; YANG, Q. Joint Mode Selection and Resource Allocation for D2D-Enabled NOMA Cellular Networks. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 68, n. 7, p. 6721–6733, 2019. ISSN 19399359.
- DI, B.; SONG, L.; LI, Y.; HAN, Z. V2x meets noma: Non-orthogonal multiple access for 5g-enabled vehicular networks. **IEEE Wireless Communications**, v. 24, n. 6, p. 14–21, 2017. ISSN 15580687.

- DIAMANTOULAKIS, P. D.; PAPPIS, K. N.; DING, Z.; KARAGIANNIDIS, G. K. Wireless-Powered Communications with Non-Orthogonal Multiple Access. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE, v. 15, n. 12, p. 8422–8436, 2016. ISSN 15361276.
- DIAO, X.; ZHENG, J.; WU, Y.; CAI, Y. Joint computing resource, power, and channel allocations for D2D-Assisted and NOMA-Based mobile edge computing. **IEEE Access**, IEEE, v. 7, p. 9243–9257, 2019. ISSN 21693536.
- DING, Z.; DAI, H.; POOR, H. V. Relay Selection for Cooperative NOMA. **IEEE Wireless Communications Letters**, IEEE, v. 5, n. 4, p. 416–419, 2016. ISSN 21622345.
- DING, Z.; FAN, P.; POOR, H. V. Impact of User Pairing on 5G Nonorthogonal Multiple-Access Downlink Transmissions. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 65, n. 8, p. 6010–6023, 2016. ISSN 00189545.
- DING, Z.; FAN, P.; POOR, H. V. Random Beamforming in Millimeter-Wave NOMA Networks. **IEEE Access**, v. 5, p. 7667–7681, 2017. ISSN 21693536.
- DING, Z.; LEI, X.; KARAGIANNIDIS, G. K.; SCHOBER, R.; YUAN, J.; BHARGAVA, V. K. A Survey on Non-Orthogonal Multiple Access for 5G Networks: Research Challenges and Future Trends. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 35, n. 10, p. 2181–2195, 2017. ISSN 07338716.
- DING, Z.; LIU, Y.; CHOI, J.; SUN, Q.; ELKASHLAN, M.; CHIH-LIN, I.; POOR, H. V. Application of Non-Orthogonal Multiple Access in LTE and 5G Networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 55, n. 2, p. 185–191, 2017. ISSN 01636804.
- DING, Z.; PENG, M.; POOR, H. V. Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems. **IEEE Communications Letters**, IEEE, v. 19, n. 8, p. 1462–1465, 2015. ISSN 10897798.
- DING, Z.; POOR, H. V. Design of Massive-MIMO-NOMA with Limited Feedback. **IEEE Signal Processing Letters**, IEEE, v. 23, n. 5, p. 629–633, 2016. ISSN 10709908.
- DING, Z.; ZHAO, Z.; PENG, M.; POOR, H. V. On the Spectral Efficiency and Security Enhancements of NOMA Assisted Multicast-Unicast Streaming. **IEEE Transactions on Communications**, IEEE, v. 65, n. 7, p. 3151–3163, 2017. ISSN 00906778.
- DO, T. N.; Da Costa, D. B.; DUONG, T. Q.; AN, B. Improving the Performance of Cell-Edge Users in MISO-NOMA Systems Using TAS and SWIPT-Based Cooperative Transmissions. **IEEE Transactions on Green Communications and Networking**, IEEE, v. 2, n. 1, p. 49–62, 2018. ISSN 24732400.
- FANG, F.; ZHANG, H.; CHENG, J.; LEUNG, V. C. Energy-Efficient Resource Allocation for Downlink Non-Orthogonal Multiple Access Network. **IEEE Transactions on Communications**, IEEE, v. 64, n. 9, p. 3722–3732, 2016. ISSN 00906778.
- GARCIA, A. L. **Probability, Statistics, and Random Processes for Electrical Engineering**. Third. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2008. 818 p.
- GRADSHTEYN, I. S.; RYZHIK, I. M. **Table of integrals, series, and products: Seventh edition**. Seventh. [S.l.: s.n.], 2007. 1–1171 p. ISBN 9780080471112.

- HAN, S.; I, C.-L.; XU, Z.; SUN, Q. Energy Efficiency and Spectrum Efficiency Co-Design: From NOMA to Network NOMA. **IEEE COMSOC MMTTC E-Letter**, v. 9, n. 5, p. 21 – 24, 2014. Disponível em: <<http://www.comsoc.org/{~}mm>>.
- HAN, W.; GE, J.; MEN, J. Performance analysis for NOMA energy harvesting relaying networks with transmit antenna selection and maximal-ratio combining over nakagami-m fading. **IET Communications**, v. 10, n. 18, p. 2687–2693, 2016. ISSN 17518628.
- HE, B.; LIU, A.; YANG, N.; LAU, V. K. On the Design of Secure Non-Orthogonal Multiple Access Systems. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 35, n. 10, p. 2196–2206, 2017. ISSN 07338716.
- HIGUCHI, K.; BENJEBBOUR, A.; MEMBER, S. Non-orthogonal Multiple Access ( NOMA ) with Successive. **IEICE transaction Communicatons**, Vol. E98-B, n. 3, p. 403–414, 2015.
- HIGUCHI, K.; KISHIYAMA, Y. Non-orthogonal access with random beamforming and intra-beam SIC for cellular MIMO downlink. **IEEE Vehicular Technology Conference**, IEEE, p. 1–5, 2013. ISSN 15502252.
- HUSSEIN, J. A.; IKKI, S. S.; BOUSSAKTA, S.; TSIMENIDIS, C. C. Performance Analysis of Opportunistic Scheduling in Dual-Hop Multiuser Underlay Cognitive Network in the Presence of Cochannel Interference. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, IEEE, v. 65, n. 10, p. 8163–8176, 2016. ISSN 00189545.
- ISLAM, S. M.; AVAZOV, N.; DOBRE, O. A.; KWAK, K. S. Power-Domain Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in 5G Systems: Potentials and Challenges. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, v. 19, n. 2, p. 721–742, 2017. ISSN 1553877X.
- ISLAM, S. M.; ZENG, M.; DOBRE, O. A.; KWAK, K. S. Resource Allocation for Downlink NOMA Systems: Key Techniques and Open Issues. **IEEE Wireless Communications**, IEEE, v. 25, n. 2, p. 40–47, 2018. ISSN 15361284.
- JHA, P. K.; KUMAR, D. S. Achievable rate analysis of relay assisted cooperative NOMA over Rician fading channels. **Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Recent Advances in Information Technology, RAIT 2018**, IEEE, p. 1–5, 2018.
- KAUR, J.; SINGH, M. L. User assisted cooperative relaying in beam-space massive MIMO NOMA based systems for millimeter wave communications. **China Communications**, China Institute of Communications, v. 16, n. 6, p. 103–113, 2019. ISSN 16735447.
- KHALID, F.; JANGSHER, S. Upper Bound of Capacity for a MU-MIMO NOMA in a Two Way Relaying Network. **Proceedings - 2018 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications, WINCOM 2018**, IEEE, p. 1–6, 2019.
- KIM, B.; LIM, S.; KIM, H.; SUH, S.; KWUN, J.; CHOI, S.; LEE, C.; LEE, S.; HONG, D. Non-orthogonal multiple access in a downlink multiuser beamforming system. **Proceedings - IEEE Military Communications Conference MILCOM**, n. 2012, p. 1278–1283, 2013.
- KIM, J.; KIM, D.; YUN, S. Mitigating Error Propagation in Successive Interference Cancellation. **IEICE Transactions**, v. 89-B, p. 2956–2960, 2006.
- KIM, J. B.; LEE, I. H. Non-orthogonal multiple access in coordinated direct and relay transmission. **IEEE Communications Letters**, IEEE, v. 19, n. 11, p. 2037–2040, 2015. ISSN 10897798.

KOBAYASHI, M.; BOUTROS, J.; CAIRE, G. Successive interference cancellation with SISO decoding and EM channel estimation. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 19, n. 8, p. 1450–1460, 2001. ISSN 07338716.

KUCUR, O.; Karabulut Kurt, G.; SHAKIR, M. Z.; ANSARI, I. S. Nonorthogonal Multiple Access for 5G and beyond. **Wireless Communications and Mobile Computing**, v. 2018, n. 12, p. 2347–2381, 2018. ISSN 15308677.

LANEMAN, J. N.; TSE, D. N.; WORNELL, G. W. Cooperative diversity in wireless networks: Efficient protocols and outage behavior. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 50, n. 12, p. 3062–3080, 2004. ISSN 00189448.

LARSSON, E. G.; EDFORS, O.; TUFVESSON, F.; MARZETTA, T. L. Massive MIMO for next generation wireless systems. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 52, n. 2, p. 186–195, 2014. ISSN 01636804.

LEE, S.; COSTA, D. B. da; VIEN, Q. T.; DUONG, T. Q.; SOUSA, R. T. de. Non-orthogonal multiple access schemes with partial relay selection. **IET Communications**, v. 11, n. 6, p. 846–854, 2017. ISSN 17518628.

LEI, L.; YUAN, D.; HO, C. K.; SUN, S. Power and Channel Allocation for Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems: Tractability and Computation. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE, v. 15, n. 12, p. 8580–8594, 2016. ISSN 15361276.

LI, A.; LAN, Y.; CHEN, X.; JIANG, H. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for future downlink radio access of 5G. **China Communications**, China Institute of Communications, v. 12, p. 28–37, 2015. ISSN 16735447.

LI, P.; De Lamare, R. C.; FA, R. Multiple feedback successive interference cancellation detection for multiuser MIMO systems. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE, v. 10, n. 8, p. 2434–2439, 2011. ISSN 15361276.

LI, Y.; JIANG, M.; ZHANG, Q.; LI, Q.; QIN, J. Cooperative non-orthogonal multiple access in multiple-input-multiple-output channels. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE, v. 17, n. 3, p. 2068–2079, 2018. ISSN 15361276.

LIANG, W.; DING, Z.; LI, Y.; SONG, L. User pairing for downlink non-orthogonal multiple access networks using matching algorithm. **IEEE Transactions on Communications**, v. 65, n. 12, p. 5319–5332, 2017. ISSN 15580857.

LIU, F.; MAHONEN, P.; PETROVA, M. Proportional fairness-based user pairing and power allocation for non-orthogonal multiple access. **IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC**, v. 2015-Decem, p. 1127–1131, 2015.

LIU, J.; SHENG, M.; LIU, L.; LI, J. Interference Management in Ultra-Dense Networks: Challenges and Approaches. **IEEE Network**, v. 31, n. 6, p. 70–77, 2017. ISSN 08908044.

LIU, Y.; DING, Z.; ELKASHLAN, M.; POOR, H. V. Cooperative Non-orthogonal Multiple Access with Simultaneous Wireless Information and Power Transfer. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, IEEE, v. 34, n. 4, p. 938–953, 2016. ISSN 07338716.

LIU, Y.; PAN, G.; ZHANG, H.; SONG, M. On the capacity comparison between MIMO-NOMA and MIMO-OMA. **IEEE Access**, IEEE, v. 4, p. 2123–2129, 2016. ISSN 21693536.

LIU, Y.; QIN, Z.; ELKASHLAN, M.; GAO, Y.; NALLANATHAN, A. Non-orthogonal multiple access in massive MIMO aided heterogeneous networks. **2016 IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2016 - Proceedings**, IEEE, p. 1–6, 2016.

LIU, Y.; QIN, Z.; ELKASHLAN, M.; GAO, Y.; HANZO, L. Enhancing the Physical Layer Security of Non-Orthogonal Multiple Access in Large-Scale Networks. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE, v. 16, n. 3, p. 1656–1672, 2017. ISSN 15361276.

LV, L.; CHEN, J.; NI, Q.; DING, Z.; JIANG, H. Cognitive Non-Orthogonal Multiple Access with Cooperative Relaying: A New Wireless Frontier for 5G Spectrum Sharing. **IEEE Communications Magazine**, v. 56, n. 4, p. 188–195, 2018. ISSN 01636804.

LV, L.; NI, Q.; DING, Z.; CHEN, J. Application of Non-Orthogonal Multiple Access in Cooperative Spectrum-Sharing Networks over Nakagami- $m$  Fading Channels. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 66, n. 6, p. 5510–5515, 2017. ISSN 00189545.

MA, J.; LIANG, C.; XU, C.; PING, L. On orthogonal and superimposed pilot schemes in massive MIMO NOMA systems. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 35, n. 12, p. 2696–2707, 2017. ISSN 07338716.

MARSHOUD, H.; KAPINAS, V. M.; KARAGIANNIDIS, G. K.; MUHAIDAT, S. Non-orthogonal multiple access for visible light communications. **IEEE Photonics Technology Letters**, IEEE, v. 28, n. 1, p. 51–54, 2015. ISSN 10411135.

MEN, J.; GE, J.; ZHANG, C. Performance Analysis of Nonorthogonal Multiple Access for Relaying Networks over Nakagami- $m$  Fading Channels. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 66, n. 2, p. 1200–1208, 2017. ISSN 00189545.

Michael Buehrer, R. Equal BER performance in linear successive interference cancellation for CDMA systems. **IEEE Transactions on Communications**, v. 49, n. 7, p. 1250–1258, 2001. ISSN 00906778.

MITOLA, J. **Cognitive Radio An Integrated Agent Architecture for Software Defined Radio Dissertation**. 313 p. Tese (Dissertation) — Royal Institute of Technology (KTH), 2000.

NONAKA, N.; BENJEBBOUR, A.; HIGUCHI, K. System-level throughput of NOMA using intra-beam superposition coding and SIC in MIMO downlink when channel estimation error exists. **2014 IEEE International Conference on Communication Systems, IEEE ICCS 2014**, IEEE, p. 202–206, 2014.

NONAKA, N.; KISHIYAMA, Y.; HIGUCHI, K. Non-Orthogonal multiple access using intra-beam superposition coding and sic in base station cooperative MIMO cellular downlink. **IEEE Vehicular Technology Conference**, IEEE, p. 1–5, 2014. ISSN 15502252.

NOSRATINIA, A.; HUNTER, T. E.; HEDAYAT, A. Cooperative communication in wireless networks. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 42, n. 10, p. 74–80, 2004. ISSN 01636804.

OTAO, N.; KISHIYAMA, Y.; HIGUCHI, K. Performance of non-orthogonal access with SIC in cellular downlink using proportional fair-based resource allocation. **Proceedings of the International Symposium on Wireless Communication Systems**, IEEE, p. 476–480, 2012. ISSN 21540217.

- PI, Z.; KHAN, F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 49, n. 6, p. 101–107, 2011. ISSN 01636804.
- QIAN, L. P.; WU, Y.; ZHOU, H.; SHEN, X. Joint Uplink Base Station Association and Power Control for Small-Cell Networks with Non-Orthogonal Multiple Access. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 16, n. 9, p. 5567–5582, 2017. ISSN 15361276.
- QIN, Z.; LIU, Y.; DING, Z.; GAO, Y.; ELKASHLAN, M. Physical layer security for 5G non-orthogonal multiple access in large-scale networks. **2016 IEEE International Conference on Communications, ICC 2016**, IEEE, p. 1–6, 2016.
- RAPPAPORT, T. S.; SUN, S.; MAYZUS, R.; ZHAO, H.; AZAR, Y.; WANG, K.; WONG, G. N.; SCHULZ, J. K.; SAMIMI, M.; GUTIERREZ, F. Millimeter wave mobile communications for 5G cellular: It will work! **IEEE Access**, IEEE, v. 1, p. 335–349, 2013. ISSN 21693536.
- SAITO, Y.; KISHIYAMA, Y.; BENJEBBOUR, A.; NAKAMURA, T.; LI, A.; HIGUCHI, K. Non-orthogonal multiple access (NOMA) for cellular future radio access. **IEEE Vehicular Technology Conference**, IEEE, p. 1–5, 2013. ISSN 15502252.
- SHI, S.; YANG, L.; ZHU, H. Outage Balancing in Downlink Nonorthogonal Multiple Access with Statistical Channel State Information. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE, v. 15, n. 7, p. 4718–4731, 2016. ISSN 15361276.
- SHIMOJO, T.; UMESH, A.; FUJISHIMA, D.; MINOKUCHI, A. Special articles on 5G technologies toward 2020 deployment. **NTT DOCOMO Technical Journal**, vol. 17, n. no. 4, p. pp. 50–59, 2016.
- SHIN, W.; VAEZI, M.; LEE, B.; LOVE, D. J.; LEE, J.; POOR, H. V. Coordinated beamforming for multi-cell MIMO-NOMA. **IEEE Communications Letters**, IEEE, v. 21, n. 1, p. 84–87, 2017. ISSN 10897798.
- SHIN, W.; VAEZI, M.; LEE, B.; LOVE, D. J.; LEE, J.; POOR, H. V. Non-orthogonal multiple access in multi-cell networks: Theory, performance, and practical challenges. **IEEE Communications Magazine**, IEEE, v. 55, n. 10, p. 176–183, 2017. ISSN 01636804.
- SUN, Q.; HAN, S.; CHIN-LIN, I.; PAN, Z. On the Ergodic Capacity of MIMO NOMA Systems. **IEEE Wireless Communications Letters**, IEEE, v. 4, n. 4, p. 405–408, 2015. ISSN 21622345.
- SUN, R.; WANG, Y.; WANG, X.; ZHANG, Y. Transceiver design for cooperative non-orthogonal multiple access systems with wireless energy transfer. **IET Communications**, v. 10, n. 15, p. 1947–1955, 2016. ISSN 17518628.
- TABASSUM, H.; ALI, M. S.; HOSSAIN, E.; HOSSAIN, M. J.; KIM, D. I. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in Cellular Uplink and Downlink: Challenges and Enabling Techniques. p. 1–8, 2016. Disponível em: <<http://arxiv.org/abs/1608.05783>>.
- TABASSUM, H.; HOSSAIN, E.; HOSSAIN, J. Modeling and Analysis of Uplink Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) in Large-Scale Cellular Networks Using Poisson Cluster Processes. 2016. Disponível em: <<https://arxiv.org/pdf/1610.06995.pdf>>.
- TAO, Y.; LIU, L.; LIU, S.; ZHANG, Z. A survey: Several technologies of non-orthogonal transmission for 5G. **China Communications**, v. 12, n. 10, p. 1–15, 2015. ISSN 16735447.

TIAN, Y.; NIX, A. R.; BEACH, M. On the Performance of Opportunistic NOMA in Downlink CoMP Networks. **IEEE Communications Letters**, IEEE, v. 20, n. 5, p. 998–1001, 2016. ISSN 10897798.

TIMOTHEOU, S.; KRIKIDIS, I. Fairness for Non-Orthogonal Multiple Access in 5G Systems. **IEEE Signal Processing Letters**, IEEE, v. 22, n. 10, p. 1647–1651, 2015. ISSN 10709908.

UDDIN, M. B.; KADER, M. F.; SHIN, S. Y. Cooperative Relaying Using MIMO NOMA. **Proceeding of 2018 4th International Conference on Wireless and Telematics, ICWT 2018**, IEEE, p. 1–6, 2018.

WAN, D.; WEN, M.; JI, F.; YU, H.; CHEN, F. Non-orthogonal multiple access for cooperative communications: Challenges, opportunities, and trends. **IEEE Wireless Communications**, v. 25, n. 2, p. 109–117, 2018. ISSN 15361284.

WYNER, A. D. The Wire-Tap Channel. **The Bell System Technical Journal**, v. 54, n. 8, p. 1355–1387, 1975.

XU, P.; YUAN, Y.; DING, Z.; DAI, X.; SCHOBER, R. On the Outage Performance of Non-Orthogonal Multiple Access With 1-bit Feedback. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE, v. 15, n. 10, p. 6716–6730, 2016. ISSN 15361276.

XU, Y.; SUN, H.; HU, R. Q.; QIAN, Y. Cooperative Non-Orthogonal Multiple Access in Heterogeneous Networks. **2015 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)**, IEEE, p. 1–6, 2016.

YAMAMOTO, K.; SAITO, Y.; HIGUCHI, K. System-level throughput of non-orthogonal access with SIC in cellular downlink when channel estimation error exists. **IEEE Vehicular Technology Conference**, IEEE, v. 2015-Janua, n. January, p. 1–5, 2014. ISSN 15502252.

YANG, Z.; DING, Z.; FAN, P.; AL-DHAHIR, N. A General Power Allocation Scheme to Guarantee Quality of Service in Downlink and Uplink NOMA Systems. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, IEEE, v. 15, n. 11, p. 7244–7257, 2016.

YANG, Z.; DING, Z.; FAN, P.; KARAGIANNIDIS, G. K. On the Performance of Non-orthogonal Multiple Access Systems With Partial Channel Information. **IEEE Transactions on Communications**, IEEE, v. 64, n. 2, p. 654–667, 2016. ISSN 00906778.

YAZAKI, T.; SANADA, Y. Effect of joint detection and decoding in non-orthogonal multiple access. **2014 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems, ISPACS 2014**, IEEE, p. 245–250, 2014.

YIN, L.; WU, X.; HAAS, H. On the performance of non-orthogonal multiple access in visible light communication. **IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC**, IEEE, v. 2015-Decem, p. 1354–1359, 2015.

Young Bae Song; Hyeon Su Kang; Duk Kyung Kim. 5G cellular systems with D2D assisted NOMA relay. **2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)**, IEEE, p. 1–3, 2017.

YUAN, Y.; DING, Z. The application of non-orthogonal multiple access in wireless powered communication networks. **IEEE Workshop on Signal Processing Advances in Wireless Communications, SPAWC**, IEEE, p. 1–5, 2016.

YUE, X.; LIU, Y.; KANG, S.; NALLANATHAN, A.; DING, Z. Exploiting Full/Half-Duplex User Relaying in NOMA Systems. **IEEE Transactions on Communications**, IEEE, v. 66, n. 2, p. 560–575, 2018. ISSN 00906778.

YUE, X.; LIU, Y.; LIU, R.; NALLANATHAN, A.; DING, Z. Full/half-duplex relay selection for cooperative NOMA Networks. **2017 IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2017 - Proceedings**, v. 2018-Janua, p. 1–6, 2017.

ZENG, M.; YADAV, A.; DOBRE, O. A.; Vincent Poor, H. Energy-Efficient Power Allocation for MIMO-NOMA with Multiple Users in a Cluster. **IEEE Access**, IEEE, v. 6, p. 5170–5181, 2018. ISSN 21693536.

ZHAI, D.; ZHANG, R.; CAI, L.; LI, B.; JIANG, Y. Energy-efficient user scheduling and power allocation for NOMA-based wireless networks with massive IoT devices. **IEEE Internet of Things Journal**, IEEE, v. 5, n. 3, p. 1857–1868, 2018. ISSN 23274662.

ZHANG, R.; HANZO, L. A unified treatment of superposition coding aided communications: Theory and practice. **IEEE Communications Surveys and Tutorials**, IEEE, v. 13, n. 3, p. 503–520, 2011. ISSN 1553877X.

ZHANG, Y.; GE, J. Performance analysis for non-orthogonal multiple access in energy harvesting relaying networks. **IET Communications**, v. 11, n. 11, p. 1768–1774, 2017. ISSN 17518628.

ZHANG, Y.; WANG, H. M.; YANG, Q.; DING, Z. Secrecy Sum Rate Maximization in Non-orthogonal Multiple Access. **IEEE Communications Letters**, IEEE, v. 20, n. 5, p. 930–933, 2016. ISSN 10897798.

ZHAO, J.; LIU, Y.; CHAI, K. K.; CHEN, Y.; ELKASHLAN, M.; ALONSO-ZARATE, J. NOMA-based D2D communications: Towards 5G. **2016 IEEE Global Communications Conference, GLOBECOM 2016 - Proceedings**, IEEE, p. 1–6, 2016.

ZHAO, J.; LIU, Y.; MAHMOODI, T.; CHAI, K. K.; CHEN, Y.; HAN, Z. Resource allocation in cache-enabled CRAN with non-orthogonal multiple access. **IEEE International Conference on Communications**, IEEE, v. 2018-May, p. 1–6, 2018. ISSN 15503607.