



Universidade Federal do ABC
Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas
Graduação em Engenharia da Informação

Beatriz Bonafé Noronha Aikawa
Vanessa Tinami Tamashiro

Análise do uso da Técnica de Múltiplo Acesso Não-Ortogonal no Domínio da Potência no Enlace Direto de Sistemas Celulares

Santo André - SP

Agosto de 2023

Beatriz Bonafé Noronha Aikawa
Vanessa Tinami Tamashiro

**Análise do uso da Técnica de Múltiplo Acesso
Não-Ortogonal no Domínio da Potência no Enlace Direto
de Sistemas Celulares**

Trabalho de conclusão de curso apresentado
como parte dos requisitos necessários para a
obtenção do título de Bacharel em Engenharia
de Informação da Universidade Federal do
ABC

Universidade Federal do ABC – UFABC
Centro de Engenharia, Modelagem e Ciências Sociais Aplicadas
Graduação em Engenharia de Informação

Orientador: Ivan Roberto Santana Casella

Santo André - SP
Agosto de 2023

Agradecimentos

Aos nossos pais e familiares, que nos forneceram estrutura e incentivo para ingressarmos em uma universidade pública e compreenderam as ausências em momentos de final de quadrimestre.

Aos nossos companheiros pela compreensão e paciência demonstrada em momentos de foco e dedicação a este trabalho.

Aos amigos e professores que nos acompanharam e ensinaram durante todo o percurso da graduação.

Agradecemos ao nosso orientador Professor Doutor Ivan Casella pelas correções, ensinamentos e dedicação nas inúmeras horas de reuniões para sanar as dúvidas e discutir o direcionamento do trabalho.

E à Universidade Federal do ABC por manter sua excelência de ensino e permitir que nos tornássemos bons profissionais.

Resumo

Grande parte das pesquisas atuais na área de redes celulares está direcionada para o desenvolvimento de novas tecnologias para atender ao crescente número de dispositivos conectados à rede, fator diretamente relacionado à popularização do conceito de IoT (*Internet of Things*). Nessa conjuntura, as tecnologias de NOMA (*Non Orthogonal Multiple Access*), trazem soluções interessantes para esse cenário: as informações dos múltiplos usuários da rede celular podem ser alocados em um mesmo canal tanto no enlace direto, quanto no enlace reverso, permitindo aumentar a capacidade do sistema sem a necessidade de expandir a banda de frequência. Nesse contexto e considerando a familiarização com uma das tecnologias utilizadas no 5G (*Fifth Generation of Mobile Cellular Systems*), este trabalho tem como objetivo o estudo da aplicação da tecnologia PD-NOMA (*Power Domain NOMA*) no enlace direto das redes celulares modernas, focando na análise de seu desempenho em diferentes condições de operação e na comparação com as tecnologias clássicas de OMA (*Orthogonal Multiple Access*), por meio de simulações computacionais. Ao final do trabalho, o estudo teórico da técnica de PD-NOMA foi satisfatória e nas análises realizadas, identificou-se a inviabilidade de se ter uma quantidade muito grande de usuários em um mesmo canal PD-NOMA e que essa técnica apresenta resultados favoráveis em sistemas com SNR maiores que 40 dB. Já em valores menores de SNR, técnicas híbridas, PD-NOMA e OMA, demonstraram ser opções mais vantajosas.

Palavras-chaves: NOMA, acesso múltiplo não-ortogonal, técnicas de múltiplo acesso, cancelamento de interferência sucessiva, alocação de potência, redes celulares, 4G, 5G.

Abstract

A large part of the current research in the field of cellular networks is directed towards the development of new technologies to meet the growing number of connected devices, a factor directly related to the popularization of the Internet of Things (IoT) concept. In this sense, the Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) technique brings interesting solutions to this scenario, information from multiple users are of the cellular network can be allocated at the same channel both in downlink and in uplink transmission, allowing an increase to the system capacity without the need to expand the frequency band. At this context and considering a first familiarization with the technologies used in 5G (Fifth Generation of Mobile Cellular Systems), this work aims to study the application of power domain NOMA (PD-NOMA) in the downlink transmission of modern cellular networks, focusing on the analysis of its performance under different operating conditions and on the comparison with the classical technologies of OMA (Orthogonal Multiple Access), through computer simulations. At the end of this project, the theoretical study of the PD-NOMA technique was satisfactory and in the analyzes performed, it was identified the impossibility of having a very large number of users in a pure PD-NOMA channel and this technique presents favorable results in systems with SNR greater than 40 dB. In lower SNR values, hybrid techniques, PD-NOMA and OMA, proved to be more advantageous options.

Keywords: *NOMA, non-orthogonal multiple access, successive interference cancellation, power allocation, cellular networks, 4G, 5G.*

Lista de Figuras

Figura 1 – Crescimento global do tráfego de dados entre 2015 e 2022.	2
Figura 2 – Diagrama básico de um sistema de comunicação.	8
Figura 3 – Representação de uma estrutura da rede celular, a) célula unitária e b) um <i>cluster</i> de sete células.	9
Figura 4 – Enlaces de comunicação para N usuários.	10
Figura 5 – Técnicas de múltiplo acesso.	11
Figura 6 – Enlace direto da técnica de OMA com N usuários.	13
Figura 7 – Enlace reverso de um sistema OMA com N usuários.	15
Figura 8 – Classes de NOMA, domínio do código.	17
Figura 9 – Comparação entre OMA e PD-NOMA para dois usuários distintos com relação à sua potência de transmissão.	18
Figura 10 – Representação do conceito de superposição de sinais em PD-NOMA.	19
Figura 11 – Representação do SIC.	20
Figura 12 – Enlace direto da técnica de PD-NOMA com dois usuários.	22
Figura 13 – Enlace reverso da técnica de PD-NOMA com N usuários.	25
Figura 14 – BER em função de SNR para sistema PD-NOMA em canal AWGN no enlace direto.	32
Figura 15 – Taxa alcançável de U_2 utilizando SIC imperfeito.	34
Figura 16 – Gráfico de taxa de dados por número de usuários.	36
Figura 17 – Capacidade PD-NOMA e OMA, considerando dois usuários.	38
Figura 18 – Capacidade PD-NOMA e OMA, considerando três usuários.	39
Figura 19 – Representação de cada usuário em uma portadora utilizando TDMA.	40
Figura 20 – Representação de todos usuários em uma mesma portadora utilizando PD-NOMA.	41
Figura 21 – Representação de agrupamento na representação longe-longe, prox-prox.	42
Figura 22 – Representação de agrupamentos na representação prox-longe.	43
Figura 23 – Comparação entre TDMA, NOMA, TDMA-NOMA prox-longe e TDMA-NOMA prox-prox, longe-longe.	44
Figura 24 – Relação entre fator de potência e BER, com diferentes valores de potência.	46
Figura 25 – Probabilidade de interrupção de funcionamento por R^* de U_1	47
Figura 26 – Comparativo entre métodos de alocação de potência fixa e dinâmica no enlace direto para PD-NOMA com dois usuários.	48

Lista de abreviaturas e siglas

1G	<i>First Generation of Mobile Cellular Systems</i> - Primeira Geração de Sistemas Celulares Móveis
2G	<i>Second Generation of Mobile Cellular Systems</i> - Segunda Geração de Sistemas Celulares Móveis
3G	<i>Third Generation of Mobile Cellular Systems</i> - Terceira Geração de Sistemas Celulares Móveis
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i> - Projeto de Parceria de Terceira Geração
4G	<i>Fourth Generation of Mobile Cellular Systems</i> - Quarta Geração de Sistemas Celulares Móveis
5G	<i>Fifth Generation of Mobile Cellular Systems</i> - Quinta Geração de Sistemas Celulares Móveis
AWGN	<i>Additive White Gaussian Noise</i> - Ruído Gaussiano Aditivo Branco
BER	<i>Bit Error Rate</i> - Taxa de Erro de Bit
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i> - Modulação por Deslocamento de Fase Binária
BS	<i>Base Station</i> - Estação Base
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i> - Acesso Múltiplo por Divisão de Código
CD-NOMA	<i>Code Domain NOMA</i> - NOMA no Domínio do Código
eMBB	<i>enhanced Mobile Broadband</i> - Banda Larga Móvel Melhorada
FDMA	<i>Frequency Division Multiple Access</i> - Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência
IoT	<i>Internet of Things</i> - Internet das Coisas
LDS-CDMA	<i>Low-Density Spread CDMA</i> - CDMA com Dispersão de Baixa Densidade
LDS-OFDM	<i>Low-Density Spread OFDM</i> - OFDM com Dispersão de Baixa Densidade

MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i> - Múltiplas Entradas Múltiplas Saídas
mMTC	<i>massive Machine Type Communications</i> - Comunicações Massivas para Máquinas
M2M	<i>Machine to Machine</i> - Máquina para Máquina
MUD	<i>Multi-user detection</i> - Detecção de múltiplos usuários
NMA	<i>New Multiple Access</i> - Novo Acesso Múltiplo
NOMA	<i>Non Orthogonal Multiple Access</i> - Acesso Múltiplo Não-Ortogonal
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i> - Multiplexação por Divisão de Frequências Ortogonais
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i> - Acesso Múltiplo por Divisão Ortogonal de Frequência
OMA	<i>Orthogonal Multiple Access</i> - Acesso Múltiplo Ortogonal
PD-NOMA	<i>Power Domain NOMA</i> - NOMA no Domínio da Potência
QoS	<i>Quality of Service</i> - Qualidade de Serviço
RAN	<i>Radio Access Network</i> - Rede de Acesso via Rádio
SCMA	<i>Sparse Code Multiple Access</i> - Acesso Múltiplo de Código Esperso
SIC	<i>Successive Interference Cancellation</i> - Cancelamento de Interferência Sucessiva
SINR	<i>Signal-to-Interference-Plus-Noise Ratio</i> - Relação Sinal-interferência mais Ruído
SNR	<i>Signal-to-noise Ratio</i> - Relação Sinal-ruído
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i> - Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo

Lista de símbolos

α_n	Fator de alocação de potência para o n -ésimo usuário
ξ	SINR para o usuário com taxa R^*
ϵ	Fração residual gerada por SIC imperfeito
ω	Ruído gaussiano
β_n	Fração de banda total disponível para o n -ésimo usuário
C	Capacidade de um canal
h_n	Ganho de canal para o n -ésimo usuário
k	Usuário desejado
n	n -ésimo
N	Quantidade máxima de usuários
N_0	Densidade espectral de potência de ruído
P	Potência total (máxima) de transmissão
p_n	Potência de sinal do n -ésimo usuário
R_n	Capacidade de um canal para o n -ésimo usuário
R'_n	Taxa de transmissão do n -ésimo usuário
R^*	Taxa de transmissão do usuário mais afastado
U_n	n -ésimo usuário
W	Largura de banda total disponível no canal
x	Sinal transmitido
x_n	Sinal transmitido para o n -ésimo usuário
y	Sinal recebido
y_n	Sinal recebido pelo n -ésimo usuário

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	3
1.3	Revisão bibliográfica	3
1.4	Organização do trabalho	5
2	CONCEITOS FUNDAMENTAIS	7
2.1	Sistema de comunicação	7
2.2	Estrutura da rede celular	8
2.3	Enlaces de comunicação	9
2.4	Técnicas de OMA	11
2.4.1	Desempenhos das técnicas de OMA no enlace direto	12
2.4.2	Desempenhos das técnicas de OMA no enlace reverso	14
2.5	Técnicas de NOMA	16
2.5.1	Classificação das técnicas de NOMA	16
2.5.2	Domínio do código	17
2.5.3	Domínio da potência	17
2.5.4	Superposição de sinais no enlace direto	18
2.5.5	Cancelamento de interferência sucessiva (SIC)	20
2.5.6	Desempenhos das técnicas de PD-NOMA no enlace direto	22
2.5.7	Desempenhos das técnicas de PD-NOMA no enlace reverso	25
2.6	Alocação de potência	27
2.6.1	Alocação de potência fixa	28
2.6.2	Alocação de potência dinâmica	28
3	ANÁLISES DE PD-NOMA NO ENLACE DIRETO	31
3.1	Taxa de erro de bits para o enlace direto de uma rede celular empregando a técnica PD-NOMA em canais AWGN	31
3.2	Efeito do SIC imperfeito na decodificação do sinal.	33
3.3	Análise de quantidade de usuários em um canal	35
3.4	Análise de capacidade de técnica de OMA e PD-NOMA	37
3.5	Análise de sistemas híbridos	40
3.6	Relação entre alocação de potência e BER	45
3.7	Análise do uso de alocação dinâmica de potência	47
4	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	49

4.1	Conclusões	49
4.2	Trabalhos Futuros	50
	REFERÊNCIAS	52

1 Introdução

Este capítulo inicia com a contextualização do trabalho na seção 1.1, onde é apresentada brevemente a história das redes celulares, seu estado atual e principais conceitos. Em seguida, apresenta-se a técnica de NOMA (*Non-Orthogonal Multiple Access*) e o atual estágio de evolução. Os objetivos do trabalho são indicados na seção 1.2 e, por fim, na seção 1.3 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre NOMA, descrevendo trabalhos relevantes apresentados em artigos publicados, revistas científicas bem conceituadas e que contribuem para o entendimento deste trabalho de graduação.

1.1 Contextualização

As redes de comunicação iniciaram-se com a introdução de telégrafos e transmissão de mensagens curtas, através do uso das técnicas de modulação digital passa-baixa. Com os avanços nos estudos de propagação de ondas eletromagnéticas, os mecanismos de comunicação sem fio foram aprimorados até que possibilitassem os primeiros testes de transmissão de informações sem fio. Em 1894, o padre Landell de Moura realizou a primeira transmissão da voz humana por 8 km, em São Paulo, entre Santana e a Praça da Sé na intenção de conseguir patrocínio para seus experimentos, mas sem sucesso (KLÖCKNER; CACHAFEIRO, 2012). Em 1899, Guglielmo Marconi, demonstrou com seu experimento em código Morse a viabilidade de estabelecer contato por rádio com navios que navegavam pelo canal da Mancha. Inúmeros avanços tornaram a transferência de informação confiável, eficiente e rápida. A partir da segunda metade da década de 1940, o sistema de telefonia se desenvolveu e introduziu uma maneira conveniente de conversar através da transmissão de sinais de áudio (AGRAWAL; ZENG, 2016).

Desde então, novos métodos e serviços de comunicações sem fio têm sido desenvolvidos em todo o mundo. Entre as décadas de 1950 e 1970, foi concebido o conceito de estrutura celular que permite grande quantidade de dispositivos conectados sem fio. Com o surgimento desse novo conceito e do desenvolvimento das tecnologias de radiofrequência na época, iniciou-se a era das redes móveis sem fio. (RAPPAPORT, 2009).

A evolução contínua das tecnologias sem fio e de microeletrônica, possibilitaram um crescimento vertiginoso das redes celulares nas últimas décadas e a oferta de diferentes serviços como os serviços de dados de alta taxa. De acordo com (CISCO, 2019), espera-se que em 2023, 5,3 bilhões de usuários irão acessar à Internet e 29,3 bilhões de dispositivos estarão conectados, sendo 14,7 bilhões destinados a conexões do tipo M2M (*Machine to*

Machine). As conexões M2M são muito utilizadas em IoT (*Internet of Things*) e tendem a crescer ainda mais. Essas conexões ocorrem entre dois ou mais dispositivos, sejam eles móveis ou não, sem que seja necessária alguma ação humana. Nessa interação, pode ocorrer o monitoramento, análise e coleta dos dados gerados, possibilitando automatizar, otimizar e agilizar processos, tanto na indústria quanto no cotidiano dos indivíduos.

Entretanto, esse crescimento exponencial de troca de informações traz muitos desafios para que os dados possam trafegar conjuntamente pela rede e chegar ao destino correto. De acordo com o relatório do Fórum Econômico Mundial ([World Economic Forum in collaboration with PwC, 2021](#)), houve um aumento expressivo da transformação digital devido à crise pandêmica da COVID-19, onde até mesmo as indústrias e comércios mais resistentes às mudanças tiveram que se adaptar. Na Figura 1, estão as informações do crescimento do tráfego de dados global de 2015 até 2022, que incluem as conexões M2M, um fator muito relevante para o crescimento acelerado de volume de dados por dispositivo.



Figura 1 – Crescimento global do tráfego de dados entre 2015 e 2022.

Fonte: [Ericsson \(2022\)](#).

Para atender ao crescente aumento da quantidade de dispositivos IoT e do tráfego de comunicação M2M, surgiram as redes 5G (*Fifth Generation of Mobile Cellular Systems*) que podem utilizar, entre outros recursos, a técnica de NOMA. O NOMA possibilita que mais de um dispositivo use simultaneamente um mesmo canal de comunicação sem a necessidade de se manter a ortogonalidade entre as transmissões de cada dispositivo, como

ocorre nas técnicas clássicas de OMA (*Orthogonal Multiple Access*).

Esta técnica pode ser dividida em dois grandes grupos: CD-NOMA (*Code Domain - NOMA*) e PD-NOMA (*Power Domain - NOMA*). Esses dois grupos serão descritos mais detalhadamente na seção 2.5. Estas técnicas são soluções tecnológicas estudadas com a finalidade de acompanhar a demanda de acesso crescente e serem amplamente aplicadas no 5G e nas próximas gerações de sistemas celulares móveis.

Neste contexto, este trabalho de graduação visa analisar o uso da técnica de PD-NOMA no enlace direto de um sistema celular, inicialmente comparando seu desempenho em relação ao uso de técnicas de OMA, como TDMA (*Time Division Multiple Access*). Na sequência, são avaliados fatores e situações que influenciam no desempenho de PD-NOMA.

1.2 Objetivos

O NOMA é uma técnica que vem sendo muito estudada nos últimos anos por possibilitar um aumento da capacidade das redes celulares e por permitir que as novas gerações possam oferecer maior conectividade, maior eficiência espectral, maior taxa de dados e menor latência. Por esse motivo, sua análise, propostas de melhorias e validações são pontos cruciais.

O objetivo deste trabalho é estudar a técnica PD-NOMA no enlace direto e compreender seus fundamentos, para que então seja possível analisar seu desempenho por meio de simulações computacionais com o auxílio do *software* MATLAB e realizar comparações com técnicas de OMA mais conhecidas. Ao realizar estas análises, é possível avaliar PD-NOMA em diferentes cenários do enlace direto, sua eficiência e benefícios em relação às outras técnicas.

Para que os objetivos deste trabalho fossem atingidos, inicialmente, realiza-se uma revisão bibliográfica na seção 1.3, revisão sobre os conceitos fundamentais como sistema de comunicação, estrutura celular, enlaces de comunicação no Capítulo 2. Após uma revisão sobre as técnicas de OMA, há aprofundamento sobre as técnicas de NOMA e seus conceitos, para que então haja o aprofundamento sobre PD-NOMA no enlace direto e sua análise no Capítulo 3.

1.3 Revisão bibliográfica

Os trabalhos citados abaixo foram utilizados como base de conhecimento para as análises e simulações realizadas. Foram avaliados estudos desde a criação do conceito de

NOMA até a atualidade, apresentando sua evolução e suas aplicações.

De acordo com (ZENG et al., 2021), em julho de 2014, empresa NTT DoCoMo introduziu a técnica de PD-NOMA e apontou sua utilização para as redes 5G. Ainda naquele ano, a empresa participou de pesquisas sobre tecnologias NMA (*New Multiple Access*), que englobam as tecnologias novas sucessoras das utilizadas no 4G, e padronizações do 3GPP (*Third Generation Partnership Project*), uma associação que iniciou seus trabalhos em 1998 e reúne órgãos normativos de telecomunicações de diversas regiões (3GPP, 2022). Em 2016, NTT DoCoMo apresentou resultados de desempenho de PD-NOMA por meio de simulações computacionais nas reuniões de número 84bis, 85 e 86 do grupo de especialização técnica da RAN (*Radio Access Network*) do 3GPP, além de sugerir sobre o uso de NMA em mMTC (*massive Machine Type Communications*) e cenários eMBB (*enhanced Mobile BroadBand*) (ZENG et al., 2021).

Como citado em (SALAUN, 2020), NOMA é uma tecnologia que apresenta características favoráveis quanto ao aumento da eficiência espectral e por viabilizar conectividade massiva, fator crucial para qualquer tecnologia a ser considerada para futuras redes sem fio devido à expansão das comunicações celulares. Podemos evidenciar que, para cenários 5G, a tecnologia se apresenta como um marco importante, possibilitando uma otimização do espectro de rádio. Esses fatores são muito relevantes, visto que há uma crescente demanda de acesso sem fio, aumento de usuários e dispositivos no sistema e necessidade de melhoraria nas taxas de transferência de dados entre os dispositivos conectados.

Em (BUDHIRAJA et al., 2021) é apresentado uma revisão de NOMA e sua aplicação no 5G (PD-NOMA e CD-NOMA). Também apresenta os problemas e dificuldades da técnica de NOMA e desafios a serem solucionados como, por exemplo, a implementação de transferência de energia sem fio, segurança, necessidade de melhorias na camada física.

O artigo de (ISLAM et al., 2016) explana sobre os conceitos básicos da técnica de PD-NOMA. Entre o conteúdo do artigo, está a explicação sobre o funcionamento de SIC (*Successive Interference Cancellation*), um dos métodos utilizados por NOMA para a obtenção de sinal para cada usuário, detalhado na seção 2.5.5. Neste artigo, aponta-se a necessidade de SIC com a menor quantidade de erros possível, como comentado na seção 3.2. No mesmo artigo, é feita uma análise de diferentes fatores de desempenho no PD-NOMA, além de uma discussão sobre o desempenho da técnica de PD-NOMA quando complementada com outras técnicas de comunicação sem fio, como MIMO (*Multiple Input Multiple Output*) e comunicação cooperativa.

O artigo de (ALDABABSA et al., 2018), inicialmente, apresenta os conceitos básicos de NOMA e uma comparação entre sistemas que utilizam técnicas de OMA e NOMA. Além disso, aborda aspectos relacionados a implementação prática como condições de canal imperfeitas e desafios de implementação quanto a complexidade de *hardware*. Também apresenta a possibilidade de utilizar NOMA em sistemas massivos MIMO.

A comparação de capacidade entre sistemas OMA e NOMA empregando MIMO é apresentada na tese de doutorado (ZENG, 2020), em que o sistema NOMA que emprega MIMO possui performance superior ao de OMA com MIMO. Além de outras análises como de maximizar a eficiência energética do sistema, alocação de potência para um sistema híbrido NOMA-OMA no enlace reverso.

A tese de doutorado de (SALAUN, 2020) aborda a alocação de potência aplicada a subportadoras conjuntas no intuito de otimizar a alocação de recursos e diminuir erros de propagação e tradução da informação dessa rede de comunicação por meio de funções genéricas que representem parâmetros como taxa de soma ponderada, justiça proporcional aos usuários, média harmônica e justiça entre máximo e mínimo.

Quanto à aplicação em IoT, (GAO et al., 2022) analisa a o desempenho de um sistema híbrido que combina as técnicas de OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) e NOMA, utilizando funções de Lagrange e o algoritmo *water-filling* com a finalidade de otimizar a alocação de potência.

Com a leitura e análise destas referências, torna-se possível compreender os conceitos fundamentais que envolvem a técnica PD-NOMA e, com o conteúdo apresentado no Capítulo 2, formar uma base teórica para o desenvolvimento das investigações previstas para este trabalho de graduação.

1.4 Organização do trabalho

Neste capítulo é contextualizado o momento atual na área de sistemas de comunicação, os objetivos deste trabalho e são apresentados algumas referências focadas na técnica de PD-NOMA, nos quais esse trabalho tomará como base de conhecimento para o seu desenvolvimento.

O Capítulo 2 apresenta mais detalhadamente os conceitos fundamentais de sistemas de comunicação, estrutura da rede celular, enlaces de comunicação e técnicas de múltiplos acessos, sejam elas ortogonais ou não. Destas técnicas de múltiplo acesso, apresentam-se seus desempenhos em enlace reverso e direto. Este capítulo também trata sobre a técnica SIC utilizada em PD-NOMA, como que as técnicas de NOMA podem ser classificadas e tipos de alocação de potência em sistemas que utilizam a tecnologia PD-NOMA.

No Capítulo 3, são apresentadas análises de PD-NOMA no enlace direto, foco deste trabalho. Nestas análises, é determinada a BER em um canal AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) no enlace direto de um sistema celular empregando a técnica de PD-NOMA; o efeito do SIC imperfeito nos sinais dos usuários; como um sistema que utiliza a técnica de PD-NOMA se comporta com diferente quantidade de usuários por canal; a

comparação de capacidade entre as técnicas de OMA e NOMA, seguido pela análise da quantidade de usuários em um canal que utiliza PD-NOMA híbrido e seus impactos; a relação entre o fator de alocação de potência fixa e BER. Por fim, uma comparação entre um sistema com alocação de potência fixa e um com alocação de potência dinâmica.

No Capítulo 4, estão as conclusões obtidas por meio de estudo teórico e resultados obtidos por simulações do Capítulo 3. Também são apresentados possíveis trabalhos futuros que podem ser desenvolvidos, dando continuidade a este trabalho de graduação ou para complementá-lo.

2 Conceitos fundamentais

Neste capítulo são apresentados conceitos importantes para a compreensão deste trabalho de graduação. Inicialmente, é apresentada a estrutura de um sistema de comunicação (seção 2.1), bem como de uma rede celular (seção 2.2) e a definição de seus enlaces de comunicação (seção 2.3). Em seguida, são apresentadas as principais técnicas de OMA existentes e suas principais características (seção 2.4). Por fim, são apresentadas as principais técnicas de NOMA (seção 2.5), a maneira que são classificadas e seus conceitos fundamentais como a utilização de superposição de sinais (seção 2.5.4), funcionamento de SIC (seção 2.5.5) e as particularidades na alocação de potência (seção 2.6). O conteúdo apresentado nestas seções fornece uma base teórica que possibilita analisar as características de NOMA e apresentar simulações computacionais da técnica de PD-NOMA para o enlace direto, tema foco deste trabalho.

2.1 Sistema de comunicação

Segundo (KIM, 2015), todos os sistemas de comunicação atuais são baseados na arquitetura de comunicação de Shannon, representada na Figura 2. Este sistema de comunicação é composto por cinco partes, descritas por (SHANNON, 1948):

1. Fonte de informação: Produz as mensagens a serem comunicadas ao receptor;
2. Transmissor: Atua na mensagem, de forma a produzir um sinal que seja possível de ser transmitido no canal de comunicação;
3. Canal: Meio utilizado para transmitir o sinal do transmissor ao receptor;
4. Receptor: Ao receber o sinal, faz a operação inversa feita pelo transmissor, a fim de obter a mensagem contida no sinal;
5. Destino: Dispositivo ou indivíduo a que a mensagem é destinada.

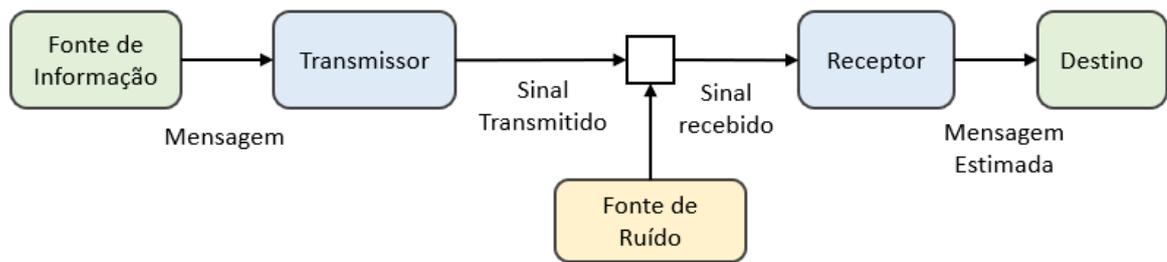


Figura 2 – Diagrama básico de um sistema de comunicação.

Fonte: Autores, adaptado de [Shannon \(1948\)](#).

O sinal modulado transmitido normalmente chega corrompido ou distorcido ao receptor, devido a características de desvanecimento por multi-percursos do canal de comunicação sem fio e a presença de ruídos e interferências. Neste caso, o sinal precisa ser tratado adequadamente, por exemplo empregando a equalização e codificação de canal para a correta recuperação da informação ([CASELLA, 2021](#)).

2.2 Estrutura da rede celular

Com a invenção do circuito integrado e a evolução dos dispositivos eletrônicos, os equipamentos de comunicação sem fio puderam ser transportados com mais facilidade, contribuindo para o aumento do uso destes equipamentos. O conceito de estrutura de rede celular hexagonal contribuiu para resolver problemas como consumo de energia, cobertura do sistema, capacidade de usuários eficiência espectral e interferência ([KIM, 2015](#)).

A reutilização da frequência e divisão celular resumem as principais características do conceito de estrutura de rede celular. Na reutilização de frequência, canais em uma mesma frequência atendem a diferentes áreas (células) separadas entre si com tal distância que não há interferência significativa entre estes canais. Desta forma, não é necessário ter um transmissor com potência e elevação superior para atender toda a região, fazendo com que transmissores com menor potência possam ser utilizados para atender às células. Ao dividir uma célula em outras com menor área, o sistema é ajustado para suportar maior tráfego por área, sem que haja aumento na alocação do espectro ([DONALD, 1979](#)). Na Figura 3, está a representação de uma estrutura de rede celular, com as células unitárias e um *cluster* composto de sete células.

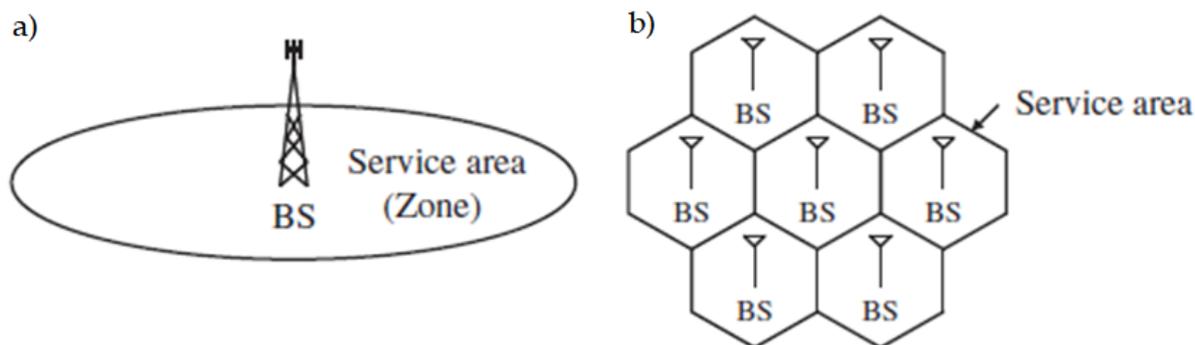


Figura 3 – Representação de uma estrutura da rede celular, a) célula unitária e b) um *cluster* de sete células.

Fonte: Agrawal e Zeng (2016).

Na Figura 3 (a) é representada uma célula unitária com sua área atendida por uma BS (*base station*). Na Figura 3 (b), está um exemplo de um conjunto de células denominado *cluster* que, para o exemplo proposto, é composto de sete células hexagonais que não se sobrepõem. Por propriedades geométricas do hexágono, não é possível obter *clusters* de tamanhos arbitrários (STÜBER, 2013).

2.3 Enlaces de comunicação

Em uma rede celular, os recursos do sistema precisam ser compartilhados entre todos os usuários seguindo alguns critérios de operação como, por exemplo, a divisão justa de recursos (*fairness*) ou utilização de variáveis de controle do sistema.

A comunicação dentro de uma rede celular pode ocorrer em dois sentidos principais: a comunicação da rede para o usuário e a comunicação do usuário para a rede. A primeira é realizada através de um enlace de comunicação denominado de enlace direto (*forward link*) e a segunda ocorre através de um enlace denominado de enlace reverso (*reverse link*) (GOLDSMITH, 2005).

Em uma rede celular, os sinais enviados no enlace direto aos usuários de uma célula saem do transmissor de uma mesma BS, de forma que todos os sinais são sincronizados (GOLDSMITH, 2005). Enquanto que os sinais enviados pelo enlace reverso saem dos usuários para a BS. Cada n -ésimo usuário tem uma restrição de potência p_n associada com o sinal transmitido x_n . Caso haja necessidade de sincronização do sinal, os sinais vindos dos transmissores precisam ser ordenados para que a sincronização ocorra corretamente, tornando esse processo mais complexo. Outro ponto de atenção é que mesmo que o sinal transmitido por cada usuário possua a potência de p_n , a potência recebida pela BS pode

ser diferente, pois os ganhos de seus respectivos canais são diferentes. Entre os motivos que causam essa diferença são: desvanecimento por multi-percursos, *shadowing*, entre outros. Na Figura 4, estão representados os N usuários, onde U_n é o n -ésimo usuário do sistema, as linhas azuis representam os enlaces diretos e as linhas vermelhas os enlaces reversos.

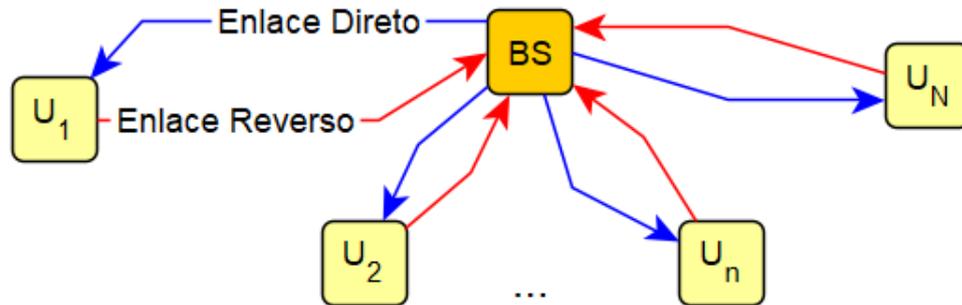


Figura 4 – Enlaces de comunicação para N usuários.

Fonte: Autores.

Os sistemas de comunicações podem utilizar técnicas de duplexação para o compartilhamento de recursos pelo canal. Estas técnicas definem, dependendo da direção da comunicação, como será feita a transmissão da informação. Para os sistemas de comunicação bidirecionais, as técnicas *half-duplex* e *full-duplex* são as mais comuns. Na técnica *half-duplex*, a transmissão da informação é realizada nas duas direções, mas não de forma simultânea, sendo mais utilizada para serviços de dados. Já na técnica *full-duplex*, a transmissão ocorre nas duas direções simultaneamente, sendo utilizada mais frequentemente para serviços de voz (CASELLA, 2021).

Adicionalmente, a duplexação pode ser feita no domínio do tempo ou da frequência. A duplexação no domínio do tempo é denominada de Duplexação por Divisão no Tempo (TDD) e cada transmissão é feita em um *slot* de tempo diferente de um dado canal de frequência. Por outro lado, a duplexação no domínio da frequência é chamada de Duplexação por Divisão de Frequência (FDD) e cada transmissão é feita em um canal de frequência diferente. Normalmente a técnica TDD está associada a serviços de dados (garantir o uso de cada canal de frequência de uma forma otimizada) e a técnica FDD está associada a serviços de voz (garantir uma conversação de baixa latência). Particularmente para as redes celulares, é comum a utilização da técnica *Full-duplex* FDD para os serviços de voz, onde os enlaces direto e reverso ocupam canais de frequência distintos, e a técnica *half-duplex* TDD para os serviços de dados, onde os enlaces direto e reverso podem ocupar o mesmo canal de frequência.

2.4 Técnicas de OMA

Segundo (SCHWENGLER, 2019), um dos principais requisitos das redes celulares é prover uma técnica eficiente para múltiplos dispositivos acessarem a rede sem fio. Sendo assim, as técnicas de múltiplo acesso permitem que os usuários de uma rede celular móvel possam acessar os recursos da rede de forma conjunta (RAPPAPORT, 2009). Os avanços destas técnicas estão relacionados com as diferentes gerações de sistemas celulares móveis, como descrito nos parágrafos seguintes. A Figura 5 as técnicas de múltiplo acesso ortogonais convencionais.

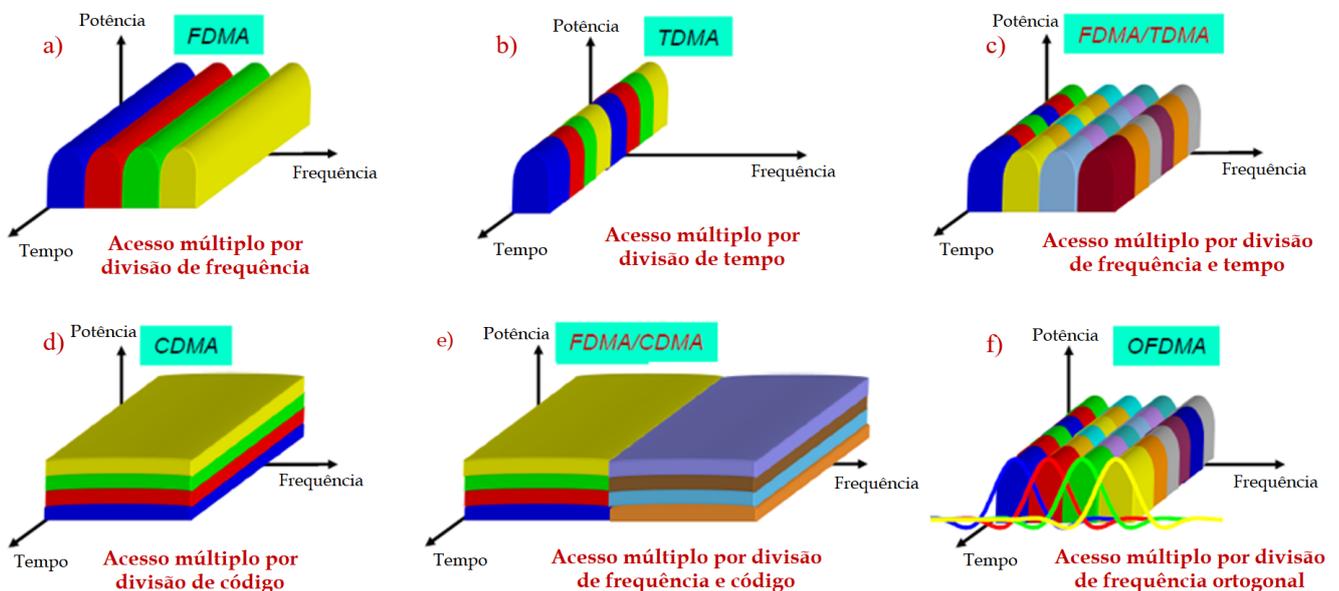


Figura 5 – Técnicas de múltiplo acesso.

Fonte: Casella (2021).

No início da utilização das técnicas de múltiplo acesso ortogonais, os sinais transmitidos eram analógicos, fato que propiciou a aplicação prática da técnica de FDMA (*Frequency Division Multiple Access*), mostrada na Figura 5 (a). Esta técnica foi utilizada na primeira geração de sistemas celulares móveis (1G) e os recursos da rede são compartilhados no domínio da frequência, de modo que a transmissão de cada usuário é feita em um canal de frequência diferente.

Com a evolução dos sistemas analógicos para sistemas digitais, surgiu a técnica de TDMA, Figura 5 (b). Nesta técnica, os recursos da rede são compartilhados no domínio do tempo, e a transmissão de cada usuário é feita em um intervalo de tempo diferente de um canal de frequência. Essa técnica, em conjunto com a FDMA, como ilustrado na Figura 5 (c), é utilizada nas redes celulares de segunda geração (2G).

Em seguida, foi apresentada a técnica CDMA (*Code Division Multiple Access*) indicada na Figura 5 (d). Nela, a divisão dos recursos é feita no domínio do código, de modo que todos os usuários ocupam o mesmo canal de frequência ao mesmo tempo. Na técnica CDMA, cada usuário possui um código com propriedades específicas de correlação que permite identificá-lo de forma única. Nas redes celulares 2G e 3G, Utiliza-se uma combinação das técnicas citadas, a CDMA em conjunto com a FDMA, como ilustrado na Figura 5 (e).

Mais recentemente, foi proposta a técnica OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), ilustrada na Figura 5 (f). Nesta técnica, os recursos da rede são compartilhados nos domínios do tempo e frequência, de modo que a transmissão de cada usuário é feita em canais de frequência e intervalos de tempo diferentes ao longo do tempo. Como os canais de frequência se sobrepõem no domínio da frequência (sem perder a ortogonalidade), há uma redução da banda efetiva ocupada. Esta técnica é empregada nas redes de celulares de quarta geração (4G) (CASELLA, 2021).

A partir do conhecimento das técnicas de múltiplo acesso ortogonais convencionais, citadas nesta seção, é possível obter parâmetros de desempenho os quais permitem uma análise comparativa entre técnicas ortogonais e não ortogonais que serão explicadas mais adiante e que servirão de base para este estudo.

2.4.1 Desempenhos das técnicas de OMA no enlace direto

Considerando o enlace direto de uma rede celular com N usuários empregando a técnica de OMA, conforme ilustrado na Figura 6, a BS envia os sinais aos usuários com frações distintas da potência total disponível, em diferentes canais de comunicação. Os usuários utilizam os recursos (tempo, frequência ou código) simultaneamente, de maneira ortogonal, o que permite uma menor interferência entre as transmissões dos usuários.

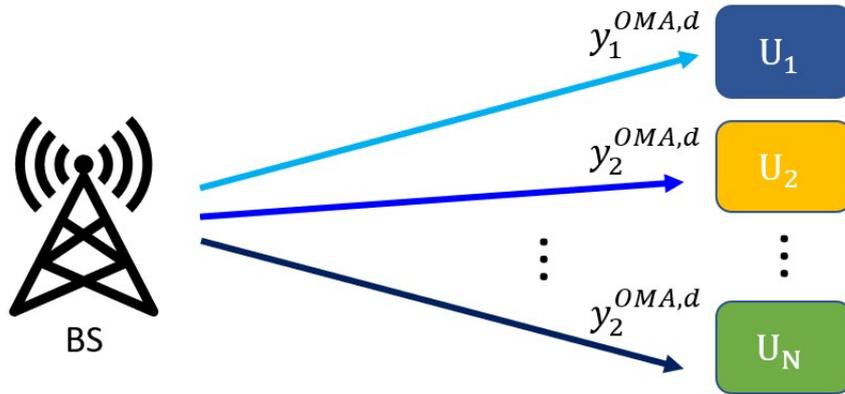


Figura 6 – Enlace direto da técnica de OMA com N usuários.

Fonte: Autores.

Em OMA, calcula-se potência do n -ésimo usuário (p_n) por:

$$p_n = P\beta_n \quad (2.1)$$

Onde, P é a potência total e β_n é a fração de recurso do canal de U_n (por exemplo, frequência ou tempo, dependendo da técnica OMA utilizada).

O sinal recebido em cada usuário ($y_n^{OMA,d}$) é calculado por:

$$y_n^{OMA,d} = h_n\sqrt{p_n}x_n + \omega \quad (2.2)$$

Onde, h_n representa o ganho do canal, p_n a potência de U_n , x_n o sinal transmitido pela BS para o n -ésimo usuário e ω é o ruído tipo AWGN (*Additive White Gaussian Noise*).

A máxima taxa de transmissão de um sistema de comunicação pode ser analisada através da sua capacidade C , definida pelo teorema de Shannon-Hartley, conforme apresentado em (2.3). Este teorema define o limite teórico da máxima quantidade de informação que pode ser transmitida por um canal de banda limitada sujeito a um ruído do tipo AWGN e é comumente utilizado como referência de desempenho para sistemas de comunicação (DUNLOP; SMITH, 1994).

$$C = W\log_2(1 + SNR) \quad (2.3)$$

Onde, W é a largura de banda e SNR (*Signal to Noise Ratio*) é a relação entre a potência de sinal e a potência de AWGN, que expressa a quantidade do sinal recebido. Para o enlace direto de uma rede celular empregando OMA, a SNR pode ser definida como em (2.4):

$$SNR_n^{OMA,d} = \frac{|h_n|^2 p_n}{\beta_n W N_0} \quad (2.4)$$

Onde, h_n representa o ganho do canal, p_n a potência de U_n , x_n o sinal transmitido, β_n é a fração de recurso de canal de U_n , W a largura de banda e N_0 a densidade espectral de potência de ruído.

Então, ao utilizar a capacidade de canal C apresentada em (2.3), é possível estimar a taxa de transmissão ($R_n^{OMA,d}$) para determinado usuário:

$$R_n^{OMA,d} = \beta_n W \log_2 \left(1 + \frac{|h_n|^2 p_n}{\beta_n W N_0} \right) \quad (2.5)$$

Onde, β_n é a fração de recurso de canal de U_n , W a largura de banda, h_n representa o ganho do canal, p_n a potência de U_n e N_0 a densidade espectral de potência de ruído.

2.4.2 Desempenhos das técnicas de OMA no enlace reverso

Na técnica de OMA, os sinais dos usuários de uma rede celular podem ser separados perfeitamente no domínio do tempo, frequência ou código. As equações apresentadas em OMA no enlace direto são análogas para OMA no enlace reverso. Neste enlace, há transmissão de sinais dos N usuários para a BS, como ilustrado na Figura 7. O n -ésimo usuário (U_n) transmite o sinal x_n com a potência p_n .

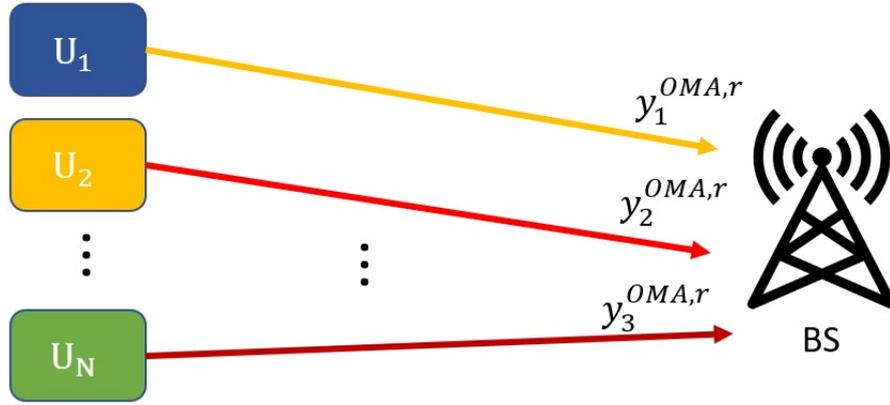


Figura 7 – Enlace reverso de um sistema OMA com N usuários.

Fonte: Autores.

Pode-se representar o sinal recebido de U_n pela BS através de 2.6:

$$y_n^{OMA,r} = h_n \sqrt{p_n} x_n + \omega \quad (2.6)$$

Onde, x_n representa o sinal transmitido por U_n , p_n representa a potência de U_n , h_n representa o ganho do canal onde x_n foi transmitido, e ω representa um ruído do tipo AWGN.

Da mesma forma que no enlace direto, para estimar a capacidade do canal, é necessário ter conhecimento de SNR. Em OMA, tanto para o enlace direto, quanto reverso, a representação de SNR é a mesma:

$$SNR_n^{OMA,r} = \frac{|h_n|^2 p_n}{\beta_n W N_0} \quad (2.7)$$

Onde, N_0 é a densidade espectral de potência de ruído, h_n representa o ganho do canal onde x_n foi transmitido, p_n é a potência de x_n e β_n é a fração de recurso do canal de U_n (por exemplo, frequência ou tempo, dependendo da técnica OMA utilizada).

Neste caso, pode-se obter uma estimativa da taxa de transmissão de U_n no enlace reverso ($R_n^{OMA,r}$) através de (2.8).

$$R_n^{OMA,r} = \beta_n W \log_2 \left(1 + \frac{|h_n|^2 p_n}{\beta_n W N_0} \right) \quad (2.8)$$

Onde, β_n é a fração de recurso de canal de U_n , W a largura de canal, h_n representa o ganho do canal, p_n a potência de x_n e N_0 a densidade espectral de potência de ruído.

Embora o uso das técnicas de OMA nas redes celulares atuais esteja consolidado, estas técnicas não irão suportar a grande quantidade de usuários e/ou dispositivos prevista para as redes de 5G, principalmente, considerando o avanço do conceito de IoT. Novas formas de conectividade são necessárias para um aumento da capacidade atual existente e nesse sentido, as técnicas de NOMA podem oferecer uma possível solução ao permitir um maior número de usuários suportados por um canal de uma rede celular, e será melhor analisado e explorado ao longo deste trabalho.

2.5 Técnicas de NOMA

Entre as vantagens das técnicas de NOMA está a compatibilidade com as tecnologias de comunicações atuais, já que não são necessárias grandes modificações nas arquiteturas já utilizadas (ALDABABSA et al., 2018) e também há um aumento de capacidade, que será explicado com mais detalhes nos capítulos seguintes. As diferentes categorias de NOMA são apresentadas na seção 2.5.1, sendo organizadas em NOMA no domínio do código (seção 2.5.2) e NOMA no domínio da potência (seção 2.5.3).

Nas técnicas de NOMA não se preserva a ortogonalidade, ou seja, as informações dos múltiplos usuários do sistema são sobrepostas, como por exemplo na sobreposição de sinais, descrita na seção 2.5.4. Este conceito é fundamental para que os usuários compartilhem os recursos da rede simultaneamente. Nas técnicas de NOMA, o sinal recebido é sobreposto e há a necessidade de identificar qual sinal é o desejado para um dado receptor e essa identificação ocorre por meio do cancelamento de interferência sucessiva (SIC), detalhado na seção 2.5.5. Com estes conceitos apresentados, na sequência, há a análise de desempenho de PD-NOMA no enlace direto (seção 2.5.6) e no enlace reverso (seção 2.5.7).

2.5.1 Classificação das técnicas de NOMA

As principais técnicas de NOMA são aplicadas no domínio da potência e no domínio do código. A técnica de CD-NOMA, pode ser dividida em três classes: LDS-CDMA (*Low Density Spread CDMA*), LDS-OFDM (*Low Density Spread OFDM*) e SCMA (*Sparse-Code Multiple Access*). Estas classes estão apresentadas na Figura 8 e descritas brevemente nas subseções seguintes.

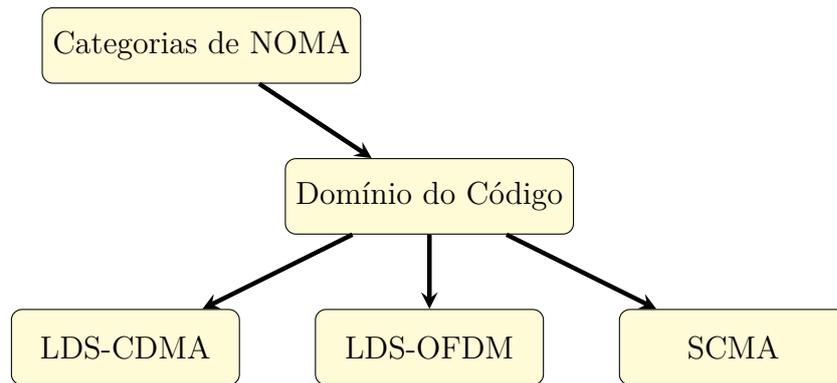


Figura 8 – Classes de NOMA, domínio do código.

Fonte: Autores.

2.5.2 Domínio do código

LDS-CDMA é uma técnica que utiliza espalhamento de baixa densidade, espalhando os símbolos de dados no domínio do tempo. A principal ideia dessa técnica é que cada símbolo de dados é distribuído apenas por um número limitado de *chirps* (sinal de frequência variável no tempo), por isso apenas alguns elementos diferentes de zero estão presentes no sinal de espalhamento. O sinal de cada usuário acaba recebendo interferências de um pequeno número de outros símbolos de dados e, para ser usado em redes 5G, é necessário a utilização de uma técnica de detecção de multiusuário eficiente (DU et al., 2016). Em LDS-OFDM, os símbolos de informação são espalhados por sequências de baixa densidade e transmitidos por conjuntos de subportadoras. Nestas, um conjunto de símbolos pode pertencer a diferentes usuários. Esta técnica aplica espalhamento de baixa densidade como técnica de múltiplo acesso e OFDM para modulação (HOSHYAR; RAZAVI; AL-IMARI, 2010).

No SCMA, os bits codificados no transmissor são mapeados em palavras-código multidimensionais no domínio complexo e as palavras-código dos diferentes usuários do sistema são sobrepostas não-ortogonalmente. Já o receptor, detecta o sinal e realiza a decodificação de acordo com as palavras-código utilizadas (LU et al., 2015).

2.5.3 Domínio da potência

No PD-NOMA, as informações a serem transmitidas para diferentes usuários são enviadas em uma mesma banda e ao mesmo tempo pelo canal de transmissão. No enlace direto, para que isso ocorra, há a superposição de sinais no domínio da potência, onde esse sinal é combinado e os receptores precisarão estimar o sinal por meio da técnica de SIC, explicada com maior detalhamento na seção 2.5.5, onde serão apresentadas as vantagens

da utilização desta técnica e suas desvantagens.

Diferentemente do que ocorre para a técnica de OMA, apresentada na seção 2.4, na técnica de PD-NOMA há o compartilhamento de todos os recursos sem que haja segregação em um determinado domínio para cada usuário. Uma breve comparação entre as duas técnicas e uma descrição visual da alocação dos parâmetros entre dois usuários é apresentada na Figura 9, onde a cor verde representa o sinal transmitido por U_1 , enquanto a laranja, por U_2 . Nesta figura, em OMA, não há interferência de um usuário no outro, já que estão em portadoras diferentes. O mesmo não ocorre na representação de PD-NOMA pois sinais estão sobrepostos.

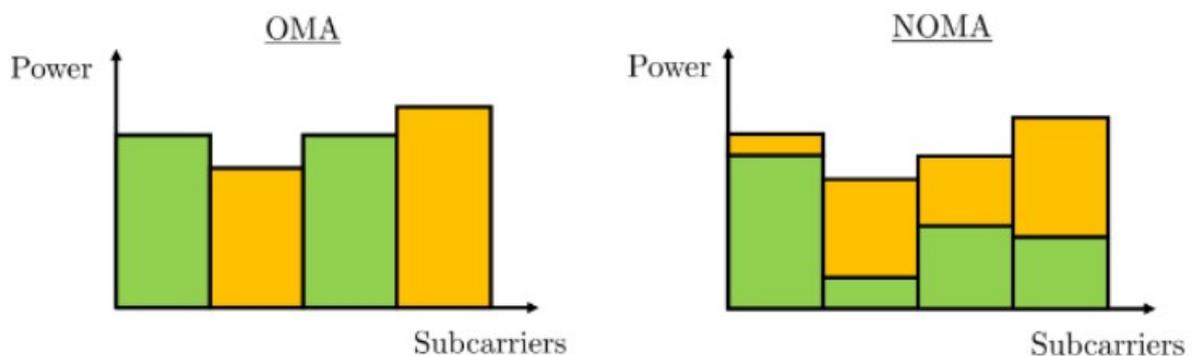


Figura 9 – Comparação entre OMA e PD-NOMA para dois usuários distintos com relação à sua potência de transmissão.

Fonte: [Salaun \(2020\)](#).

Em função da técnica de NOMA ser amplamente estudada dado o cenário atual das tecnologias de comunicações móveis, nas seções seguintes são descritas as equações matemáticas para a técnica de PD-NOMA, para que possam ser utilizadas nas análises do capítulo 3.

2.5.4 Superposição de sinais no enlace direto

Para a técnica de PD-NOMA, a superposição de sinais é um dos conceitos principais para sua aplicação em sistemas de comunicação. Ela é realizada no transmissor e responsável pela superposição linear dos dados transmitidos para os N usuários do sistema ([ISLAM et al., 2016](#)). Na Figura 10, há a representação do conceito de superposição.

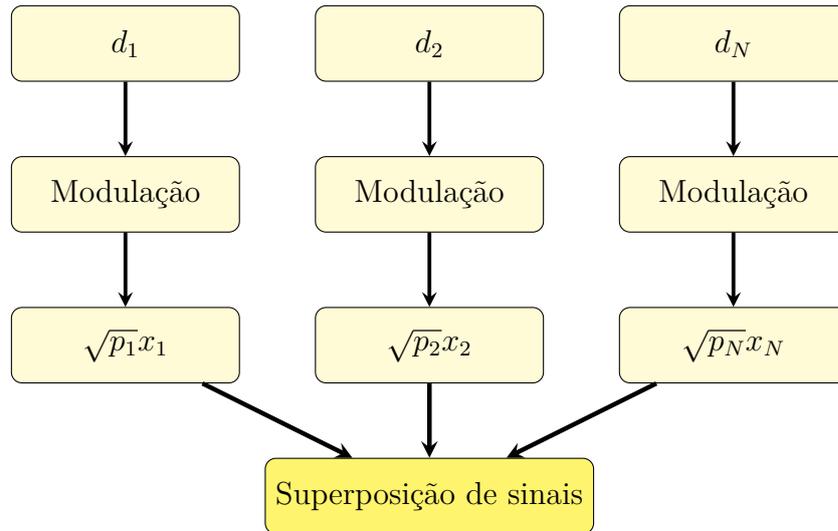


Figura 10 – Representação do conceito de superposição de sinais em PD-NOMA.

Fonte: Autores.

Na superposição de sinais, o sinal transmitido pode ser definido como:

$$x = \sum_{n=1}^N \sqrt{p_n} x_n \quad (2.9)$$

Sendo que, no enlace direto:

$$p_n = P \alpha_n \quad (2.10)$$

Onde, x é o sinal transmitido, α_n é o fator de potência de U_n , x_n é o sinal designado para U_n , P é a máxima potência total de transmissão e p_n é a potência do sinal do n -ésimo usuário.

A determinação do valor da alocação de potência pode ser estabelecida por fatores como distância do usuário à BS e ganho do canal, podendo também ser aplicado um método de alocação de potência fixa ou dinâmica, que serão discutidos na seção 2.6, para melhor entendimento desse processo. Cada um desses fatores pode influenciar na eficiência de transmissão do canal. Os fatores de alocação de potência para os usuários devem satisfazer a:

$$\sum_{n=1}^N \alpha_n = 1 \quad (2.11)$$

Para a recuperação dos sinais de cada usuário, é necessário que cada receptor realize um processo de decodificação, por exemplo a técnica de MUD (*Multi-User Detection*) ou de SIC, como adotada neste trabalho, para que a mensagem seja estimada pelo usuário. A superposição no transmissor e o SIC no receptor possibilitam a utilização do mesmo espectro de frequência para vários usuários utilizando um mesmo recurso e evidenciando os pontos de diferença entre as técnicas de NOMA e OMA.

Na seção 2.5.5, será apresentada a técnica de SIC, que é de extrema importância para o desenvolvimento do estudo da técnica de PD-NOMA.

2.5.5 Cancelamento de interferência sucessiva (SIC)

Especificamente para a técnica PD-NOMA, os sinais dos diferentes usuários do sistema são superpostos antes de serem transmitidos. Assim, torna-se necessária a utilização de uma técnica para identificar e recuperar o sinal desejado em cada um dos receptores. Uma das técnicas mais utilizadas para essa operação é o SIC. Na Figura 11, é apresentado um diagrama que exemplifica o funcionamento do SIC. Pode-se verificar que os três sinais superpostos transmitidos na entrada do receptor, indicados com cores diferentes, são iterativamente decodificados, ordenados do mais forte para o mais fraco, e subtraídos do sinal recebido até a obtenção do sinal desejado. Para o funcionamento adequado do SIC, é necessário a estimativa dos fatores de potência de cada usuário.

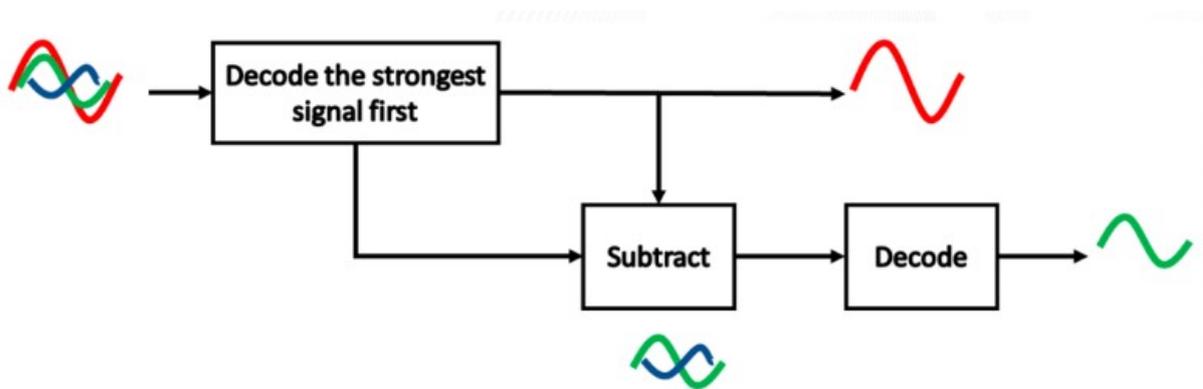


Figura 11 – Representação do SIC.

Fonte: Kizilirmak (2016).

A superposição de sinais é feita no transmissor onde os sinais dos N usuários são superpostos de modo que o sinal transmitido resultante x é enviado para os destinatários, que por sua vez, realizam a operação de SIC para obter o sinal de seu interesse. As

diferenças de intensidade entre os sinais possibilitam utilizar este método de decodificação. Os passos abaixo resumem o processo iterativo de SIC:

1. Considerando um canal com N usuários em que cada um possui características distintas de canal, pode-se ordenar em $1 \leq n \leq N$ os usuários de tal forma que U_1 apresenta menor ganho e U_N , o maior ganho. Considerando apenas o ruído AWGN, quanto mais distante o usuário da BS, menor o seu ganho e maior será sua potência recebida. Então, sendo U_1 o usuário mais distante, o seu sinal y_1 será identificado primeiro e sem que ocorra o processo de SIC. Após isso, o sinal do usuário seguinte será identificado e assim por diante. Visando encontrar o sinal do usuário k , executam-se os passos seguintes;
2. Subtrai-se y_n , em que este é igual a $\sqrt{p_n}x_n$, do sinal y transmitido em (2.10), conforme indicado em (2.12):

$$y_{n+1} = y - \sqrt{p_n}x_n \quad (2.12)$$
3. Adição de uma unidade a n ;
4. Repetição dos passos 2 e 3 até que o sinal y_k desejado seja identificado.

O processo iterativo de SIC apresentado acima, acompanha a ordem de potência atribuída ao sinal de cada usuário, ou seja, primeiramente, o sinal de maior intensidade é obtido, enquanto os outros sinais recebidos são interpretados apenas como ruído/interferência. O primeiro sinal decodificado é então subtraído do sinal recebido e, se a tradução do sinal for ideal, a informação restante são os sinais dos outros usuários. Se, esse processo ocorrer sem falhas, o sinal do segundo usuário será obtido com precisão e, então, o procedimento é repetido até que o sinal do usuário desejado seja encontrado.

Porém, como mencionado por (KIZILIRMAK, 2016), a execução do algoritmo SIC para uma grande quantidade de usuários com uma considerável quantidade de dados requer um alto nível de processamento computacional.

Aplicar a técnica de SIC resulta em uma melhora da eficiência na utilização dos recursos, otimização da alocação de potência, gerenciamento de interferência e maior eficiência espectral. Idealmente, a potência alocada aos usuários é uma função inversamente proporcional aos ganhos do canal, e o que acontece é que o usuário mais distante recebe menos ganhos em seu canal, sua potência alocada é maior e é possível lidar melhor com a interferência dos outros canais (ZENG, 2020).

Por outro lado, tratando-se de SIC em um cenário não ideal, podem ocorrer erros tanto por pelo próprio processamento feito pelo SIC, quanto por ruídos, distorções causadas

no processo de transmissão pelo canal de comunicação sem fio. Em um usuário, caso algum erro ocorra na detecção dos sinais dos outros usuários que são utilizados no SIC, aumenta a quantidade de erros no sinal estimado deste usuário, além de que o coeficiente de alocação de potência e as condições do canal influenciam nestes erros (KARA; KAYA, 2018).

Aplicar o SIC pode ser computacionalmente complexo e consumir muito tempo, além disso, caso ocorra um erro em algum cálculo de SIC, esse erro se propagará no processo iterativo, levando a erros na informação decodificada. A análise sobre os efeitos de um SIC com erros de decodificação será apresentada na seção 3.2.

2.5.6 Desempenhos das técnicas de PD-NOMA no enlace direto

Compreender o desempenho da técnica de NOMA permite identificar quais fatores podem ser modificados para que o sistema apresente melhores resultados. Aqui serão descritas as expressões gerais utilizadas para a técnica de NOMA, sendo que estas se aplicam para qualquer domínio de NOMA, inclusive no domínio da potência.

Um sistema em que há a transmissão no enlace direto para N usuários em um canal com largura de banda W , utilizando as técnicas de PD-NOMA, é representado na Figura 12. Neste sistema, o sinal transmitido x_n , é superposto na BS para N usuários, como indicado na Figura 10 e melhor detalhado na seção 2.5.4.

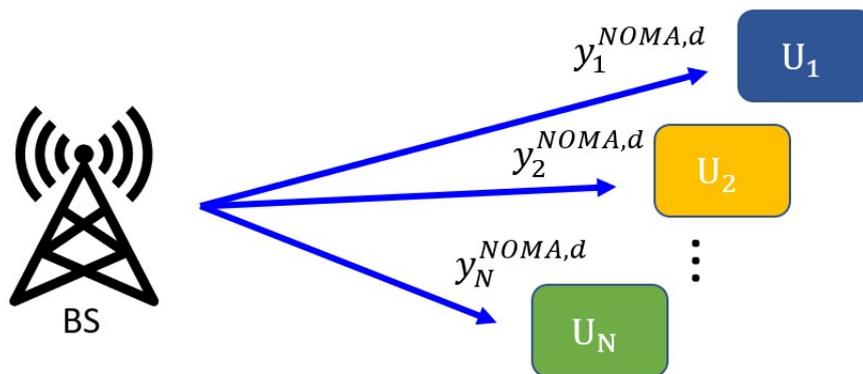


Figura 12 – Enlace direto da técnica de PD-NOMA com dois usuários.

Fonte: Autores.

Para N usuários, como na Figura 12, o sinal recebido pelo n -ésimo usuário $y_n^{NOMA,d}$ pode ser representado como:

$$y_n^{NOMA,d} = h_n \left(\sum_{i=1}^N \sqrt{p_i} x_i \right) + \omega \quad (2.13)$$

Onde, h_n representa o ganho do canal onde x_n foi transmitido, p_i é a potência da BS multiplicada pelo fator de alocação de potência α_i (como definida na equação (2.10) da seção anterior), x_i é o sinal transmitido do i -ésimo usuário e ω representa o ruído gaussiano.

Considerando a equação (2.13) e a ordenação feita pelo fator potência de cada usuário, como indicado na equação (2.14), os primeiros sinais a serem identificados pelo processo de SIC são provenientes dos usuários com menor ganho de canal e assim sucessivamente até que todos sejam identificados. Nesse sentido, para o usuário U_N os termos anteriores são considerados como interferências em $y_n^{NOMA,d}$.

$$|h_1|^2 < |h_2|^2 < \dots < |h_N|^2 \quad (2.14)$$

Em um exemplo com dois usuários, em que estes são ordenados pela distância de BS, U_2 está mais próximo da BS enquanto U_1 mais distante. Desta forma, $|h_1|^2 < |h_2|^2$. O primeiro usuário tem seu sinal identificado sem empregar SIC, e este é utilizado para a identificação do sinal de U_2 . Neste sistema, os sinais transmitidos x_1 e x_2 , com as potências transmitidas p_1 e p_2 , os sinais banda base recebidos $y_1^{NOMA,d}$ e $y_2^{NOMA,d}$ são representados como:

$$y_1^{NOMA,d} = h_1(\sqrt{p_1}x_1 + \sqrt{p_2}x_2) + \omega \quad (2.15)$$

$$y_2^{NOMA,d} = h_2(\sqrt{p_1}x_1 + \sqrt{p_2}x_2) + \omega \quad (2.16)$$

A ordem de identificação dos sinais depende das condições do canal (SALAUN, 2020). Na situação citada, mais potência é alocada para o usuário U_1 localizado mais distante da BS (e menor potência, para o mais próximo), respeitando a condição de que a soma de todos os α_n resultam em 1, indicada em (2.11):

$$\alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_N \quad (2.17)$$

Todos os usuários recebem o mesmo sinal e todos os usuários, exceto o de maior potência alocada, realizam o SIC como descrito como na seção 2.5.5, até a obtenção do seu respectivo sinal.

A SINR (*Signal to Interference & Noise Ratio*) é uma das formas de medir a qualidade do sistema: quanto maior o valor obtido, melhor qualidade, uma vez que é inversalmente proporcional à interferência e o ruído. A SINR no enlace direto para NOMA é dada por:

$$SINR_n^{NOMA,d} = \frac{p_n |h_n|^2}{\sum_{i=1}^{n-1} p_i |h_n|^2 + WN_0} \quad (2.18)$$

Assim, para os U_1 (usuário mais distante) e U_2 (usuário mais próximo), as taxas SINR para esses usuários são:

$$SINR_1^{NOMA,d} = \frac{|h_1|^2 p_1}{WN_0 + |h_1|^2 p_2} \quad (2.19)$$

$$SINR_2^{NOMA,d} = \frac{|h_2|^2 p_2}{WN_0} \quad (2.20)$$

Onde, h_n representa o ganho do canal onde x_n foi transmitido, h_i representa o ganho do canal onde x_i foi transmitido, p_n é a potência do sinal do usuário x_n , p_i é a potência do sinal do usuário x_i , W é a largura de banda e N_0 a densidade espectral de potência de ruído.

Desta forma, as taxas de transmissão são (2.21) para o U_n , (2.22) para U_1 e (2.23) para U_2 :

$$R_n^{NOMA,d} = W \log_2 \left(1 + SINR_n^{NOMA,d} \right) \quad (2.21)$$

$$R_1^{NOMA,d} = W \log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 p_1}{WN_0 + |h_1|^2 p_2} \right) \quad (2.22)$$

$$R_2'^{NOMA,d} = W \log_2 \left(1 + \frac{|h_2|^2 p_2}{W N_0} \right) \quad (2.23)$$

Para $SINR_1^{NOMA,d}$ no enlace direto, em (2.19), há o termo $|h_1|^2 p_2$, diferentemente de $|h_2|^2 p_2$ em (2.27) para o enlace reverso (SALAUN, 2020).

2.5.7 Desempenhos das técnicas de PD-NOMA no enlace reverso

Considerando o uso da técnica de PD-NOMA no enlace reverso com N usuários transmitindo em um canal com largura de banda W , a Figura 13, representa o sinal superposto recebido na BS.

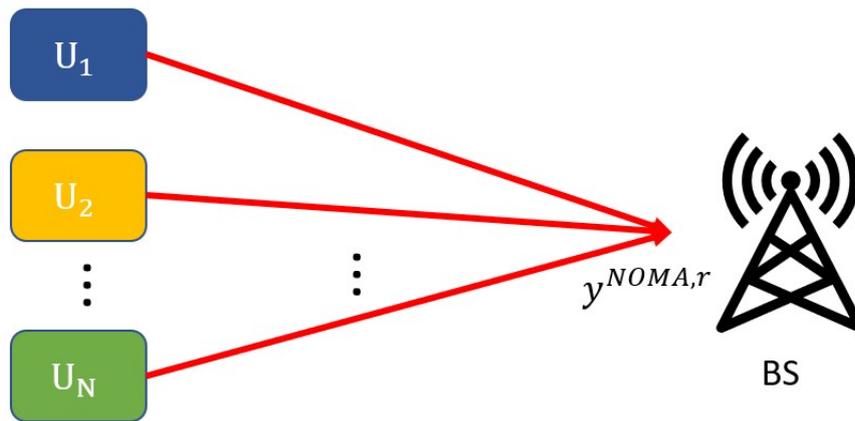


Figura 13 – Enlace reverso da técnica de PD-NOMA com N usuários.

Fonte: Autores.

O sinal recebido na BS ($y^{NOMA,r}$) pode ser representado, em um canal com largura de banda W :

$$y^{NOMA,r} = \sum_{i=1}^N (h_i \sqrt{p_i} x_i) + \omega \quad (2.24)$$

Onde, p_i é a potência do sinal do i -ésimo usuário, x_i é o sinal transmitido, h_i representa o ganho do canal onde x_i foi transmitido e ω representa o ruído AWGN.

Os usuários que estão localizados em posições diferentes apresentam potência distinta entre si. O usuário mais próximo (U_1) tem seu sinal recebido $y_1^{NOMA,r}$ identificado primeiro. Em uma análise inicial, os sinais recebidos pelos outros usuários são considerados

ruído, como representado anteriormente na Figura 11. Por ter menor distância com a BS, $h_1 p_1$ é maior que $h_n p_n$ dos demais usuários.

Com a correta decodificação de $y_1^{NOMA,r}$, este valor é subtraído do sinal $y^{NOMA,r}$ recebido, como descrito na seção 2.5.5 no processo de SIC. O SIC atua subtraindo o primeiro sinal identificado ($y_1^{NOMA,r}$) de $y^{NOMA,r}$, antes de processar o sinal seguinte ($y_2^{NOMA,r}$). Dessa forma, o sinal $y_2^{NOMA,r}$ pode ser representado por:

$$y_2^{NOMA,r} = h_2 \sqrt{p_2} x_2 + \omega \quad (2.25)$$

Onde, h_n representa o ganho do canal, p_n a potência de x_n , x_n o sinal transmitido pelo n -ésimo usuário e ω o ruído gaussiano.

A SINR do n -ésimo usuário pode ser calculada por (2.26):

$$SINR_n^{NOMA,r} = \frac{|h_n|^2 p_n}{WN_0 + \sum_{i=n+1}^N |h_i|^2 p_i} \quad (2.26)$$

Onde, h_n representa o ganho do canal, x_n é o sinal transmitido, p_n a potência de x_n , W a largura de banda e N_0 a densidade espectral de potência de ruído.

Assim, a $SINR_1^{NOMA,r}$, considerando dois usuários, é dada por:

$$SINR_1^{NOMA,r} = \frac{|h_1|^2 p_1}{WN_0 + |h_2|^2 p_2} \quad (2.27)$$

Onde, h_n representa o ganho do canal, x_n é o sinal transmitido, p_n a potência de x_n , W a largura de banda e N_0 a densidade espectral de potência de ruído.

E a SINR de $y_2^{NOMA,r}$ após SIC, é:

$$SINR_2^{NOMA,r} = \frac{|h_2|^2 p_2}{WN_0} \quad (2.28)$$

Onde, h_n representa o ganho do canal onde x_n foi transmitido, p_n a potência de x_n , W a largura de banda e N_0 a densidade espectral de potência de ruído.

Em NOMA no enlace reverso, os usuários podem otimizar o valor de sua potência de transmissão conforme sua localidade. Entretanto, assume-se que os usuários estão

bem distribuídos na área de cobertura celular, com níveis de potência recebidos já bem separados/distintos. No receptor, há a implementação o SIC, processo explicado na seção 2.5.5 e a estimativa da taxa de transmissão para o usuário U_n pode ser definida por:

$$R_n^{NOMA,r} = W \log_2 \left(1 + SINR_n^{NOMA,r} \right) \quad (2.29)$$

Onde, W é a largura de banda e $SINR_n^{NOMA,r}$ é a relação sinal-interferência mais ruído no enlace reverso utilizando uma técnica NOMA.

Para o usuário U_1 , $R_1^{NOMA,r}$ pode ser definido como em (2.30), enquanto que para o usuário U_2 , $R_2^{NOMA,r}$ pode ser definido por (2.31):

$$R_1^{NOMA,r} = W \log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 p_1}{WN_0 + |h_2|^2 p_2} \right) \quad (2.30)$$

$$R_2^{NOMA,r} = W \log_2 \left(1 + \frac{|h_2|^2 p_2}{WN_0} \right) \quad (2.31)$$

Onde, W é a largura de banda, h_n representa o ganho do canal onde x_n foi transmitido, p_n a potência de x_n e N_0 é a densidade espectral de potência de ruído.

Na taxa de transmissão para n -ésimo usuário no enlace reverso de OMA, descrito em 2.4.2, há relação de α_n com $R_n^{NOMA,r}$. O mesmo não ocorre para a capacidade de canal para usuário n no enlace reverso de PD-NOMA, uma vez que este não utiliza parte da largura de banda exclusivamente para um único usuário.

2.6 Alocação de potência

Na técnica de NOMA, o coeficiente de alocação de potência desempenha um papel muito importante na determinação do desempenho geral do sistema, já que estes compartilham os mesmos recursos. O coeficiente determina o quanto de potência um usuário tem disponível e deve ser adaptado de acordo com a SNR, as condições do canal entre a BS e os N usuários (KARA; KAYA, 2018). Nas próximas seções, serão apresentadas dois tipos de alocações de potência, a alocação fixa e a dinâmica.

2.6.1 Alocação de potência fixa

Na técnica PD-NOMA, pode-se empregar uma alocação fixa de potência para os usuários, ou seja, permanece constante durante a transmissão. Os coeficientes são pré-determinados: quando considerado apenas a atenuação de espaço-livre, o usuário mais distante recebe maior potência que o usuário mais próximo, ou seja, o usuário mais distante tem coeficiente de alocação de potência maior. Para este caso simplificado, o transmissor precisa saber a ordem dos ganhos de desvanecimento dos canais dos usuários (YANG et al., 2017).

A relação da alocação de potência é analisada em 3.6. Entretanto, no ambiente real e complexo, não apenas a distância entre usuário e BS interfere na qualidade do canal, mas também o sombreamento de grandes objetos, interferência construtiva e destrutiva dos multi-percursos entre transmissor e receptor. A alocação de potência fixa apresenta melhores resultados quando as condições do canal são estáveis, mas pode ser otimizada para que tenha resultados satisfatórios em cenários mais diversos. Já a alocação de potência dinâmica apresenta maior flexibilidade em situações de condição de canal menos estáveis, porém há maior complexidade para que seja utilizada.

2.6.2 Alocação de potência dinâmica

A utilização da alocação de potência dinâmica possibilita diversas oportunidades de otimização na distribuição de valores. No caso do PD-NOMA, a alocação de potência dinâmica pode maximizar a taxa de soma, maximizar a eficiência energética e permitir uma distribuição de coeficientes de maneira mais justa para usuários que apresentam condições de canal e requisitos de QoS (*Quality of Service*) ruins.

Utilizando-se do método dinâmico de alocação de potência justa, a determinação dos valores de alocação de potência α_n para o n -ésimo usuário podem ser definida de acordo com as informações do estado do canal de comunicação. Esse método prioriza o usuário mais fraco ou distante da BS. No caso de um sistema com dois usuários, o coeficiente é calculado para o usuário prioritário e, somente quando a taxa de potência considerada ideal para esse usuário é alcançada, que então a potência remanescente é distribuída para o usuário mais próximo da BS (LIU; PETROVA, 2018).

Como desenvolvido no item 2.5.6, no enlace direto, considerando dois usuários, a taxa de dados $R_n^{NOMA,d}$ é obtido pela equação (2.22), após o processo de SIC. Para a alocação de potência justa, consideramos $R^{*NOMA,d}$ a taxa para o usuário mais afastado. Então, para encontrar α_{prox} e α_{longe} , coeficientes de alocação de potência para o usuário mais próximo e mais distante, respectivamente, temos:

$$R_n = R_n^{*NOMA,d}. \quad (2.32)$$

$$p_n = P\alpha_n \quad (2.33)$$

Onde, P é a potência transmitida e α_n é o coeficiente de alocação de potência do n -ésimo usuário. A partir da equação 2.22 eleva-se ambos os lados de R'_1 por 2^x .

$$\frac{2^{R^*}}{W} - 1 = \frac{|h_{longe}|^2 p_{longe}}{WN_0 + |h_{longe}|^2 p_{prox}} \quad (2.34)$$

Considerando $\xi = \frac{2^{R^*}}{W} - 1$. E ξ o $SINR^{NOMA,d}$ para o usuário mais distante com taxa de R^* .

$$\xi = \frac{|h_{longe}|^2 p_{longe}}{WN_0 + |h_{longe}|^2 p_{prox}} \quad (2.35)$$

$$\xi |h_{longe}|^2 p_{prox} + \xi WN_0 = |h_{longe}|^2 p_{longe} \quad (2.36)$$

Sendo $\alpha_{prox} + \alpha_{longe} = 1$, e P a potência total transmitida. Então:

$$\alpha_{prox} = 1 - \alpha_{longe} \quad (2.37)$$

$$\xi WN_0 + \xi |h_{longe}|^2 P(1 - \alpha_{longe}) = |h_{longe}|^2 P\alpha_{longe} \quad (2.38)$$

Realizando-se as substituições e distribuições adequadas, chega-se a seguinte equação:

$$\alpha_{longe} = \frac{\xi(WN_0 + |h_{longe}|^2 P)}{P|h_{longe}|^2(1 + \xi)} \quad (2.39)$$

Considerando que α_{longe} não pode ser maior que 1, tem-se que α_{longe} :

$$\alpha_{longe} = \min \left(\frac{\xi(WN_0 + |h_{longe}|^2)}{P|h_{longe}|^2(1 + \xi)}, 1 \right) \quad (2.40)$$

Onde, $\xi = \frac{2^{R^*}}{W} - 1$, W é a largura de banda, N_0 a densidade espectral de potência de ruído, h_n representa o ganho do canal onde x_n foi transmitido, α_n é o coeficiente de alocação de potência do n -ésimo usuário e P é a potência total transmitida.

Neste capítulo, foram apresentadas as bases para as análises seguintes. Por meio de simulações computacionais para PD-NOMA no enlace direto, diferentes parâmetros e comportamentos serão analisados no capítulo seguinte, permitindo conhecer mais detalhes sobre esta técnica.

3 Análises de PD-NOMA no enlace direto

Este capítulo apresenta algumas análises de desempenho baseadas em simulação computacional para o enlace direto de uma rede celular empregando a técnica de PD-NOMA aplicada a diferentes situações, baseadas nas análises matemáticas realizadas em seções anteriores. Desta forma, torna-se possível analisar por meio de simulações computacionais conceitos como *Bit Error Rate* (BER) (seção 3.1), efeito do SIC quando ocorre de forma imperfeita (seção 3.2) no enlace direto, a quantidade de usuários em um canal (seção 3.3), a comparação entre a capacidade entre as técnicas OMA e PD-NOMA (seção 3.4), comparar diferentes alocações quanto a disposição dos usuários (seção 3.5), relação de alocação de potência com a BER (seção 3.6) e alocação de potência dinâmica (seção 3.7).

3.1 Taxa de erro de bits para o enlace direto de uma rede celular empregando a técnica PD-NOMA em canais AWGN

Esta seção apresenta os resultados da análise de BER do PD-NOMA no cenário de enlace direto com dois usuários com distância $d_1 = 1000m$ e $d_2 = 400m$ da BS, $\alpha_1 = 0.8$ e $\alpha_2 = 0.2$ através de simulações computacionais. Considera-se a modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), uma técnica que apresenta bom desempenho de taxa de erro de bits e utiliza duas fases para a definição de seu estado com fase 0° e fase 180° , e um canal com ruído AWGN (*Additive White Gaussian Noise*) ou seja, que independe da frequência utilizada.

Os símbolos de transmissão de cada usuário foram gerados a partir de um gerador de sequência pseudo-aleatória. Os dados obtidos foram modulados em BPSK e sob eles aplicados os fatores de potência para então ocorrer a superposição dos sinais, conforme descrito na seção 2.5.5. Para a adição de ruído, foi utilizada a função `awgn(x, SNR)` do MATLAB, onde o sinal original x tem AWGN adicionado conforme o valor de SNR, resultando em um sinal com ruído. Quanto maior SNR, menor o impacto do AWGN no sinal.

No cenário proposto, sabe-se que o fator de alocação de potência de U_1 é maior que U_2 e, conseqüentemente a potência do sinal de U_1 é maior que U_2 . Então, no usuário U_1 , há a identificação de seu sinal e esta informação está pronta para ser utilizada pelo usuário. Já em U_2 , ocorre o processo de SIC, onde há a identificação do sinal de U_1 , subtrai-se do

sinal total recebido o valor correspondente ao usuário U_1 e obtém-se a informação de U_2 .

Para calcular a BER, é utilizado 3.1 ou a função `biterr(x,y)` do MATLAB, onde x é a primeira sequência de valores, sendo a referência de dados originais e y representa a sequência de valores que sofreu alteração. No cálculo da BER para cada usuário, compara-se os bits de da mensagem original, que é transmitido pela BS com canal AWGN como definido na equação (2.13), com os bits da mensagem estimada pelo usuário.

$$BER = \frac{\text{Números de bits incorretos}}{\text{Número total de bits}} \quad (3.1)$$

Na Figura 14, são apresentados os resultados de BER empregando-se PD-NOMA para cada um dos N usuários da rede, em função da SNR.

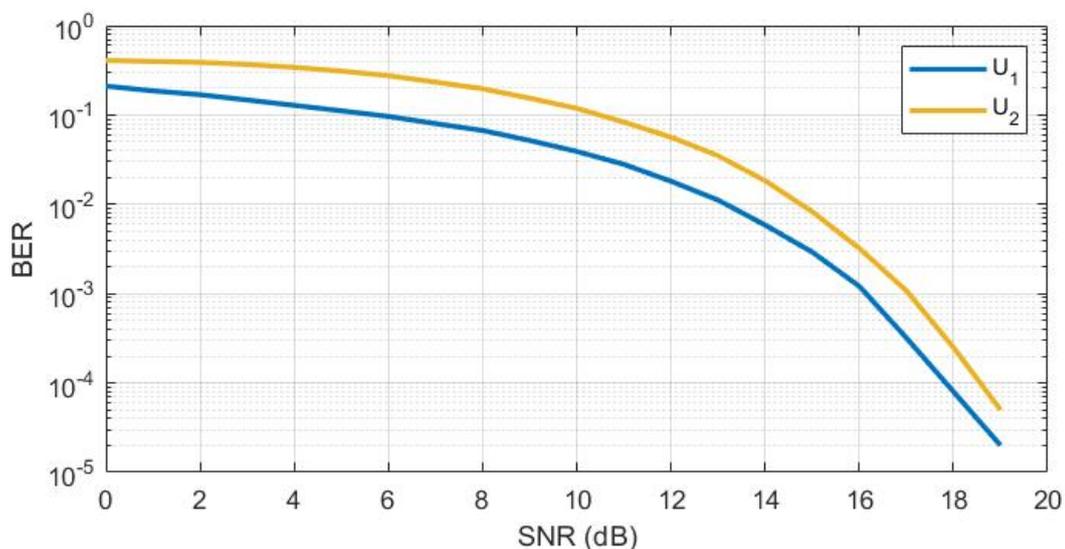


Figura 14 – BER em função de SNR para sistema PD-NOMA em canal AWGN no enlace direto.

Fonte: Autores.

Pode-se verificar que o U_2 tem maior probabilidade de ter algum erro de bit com relação ao U_1 . Essa condição pode ser explicada uma vez que o usuário com menor fator de alocação de potência (U_2) necessita identificar e subtrair corretamente o sinal do usuário com maior fator U_1 e, por isso, qualquer erro em processos anteriores impacta diretamente em seu próprio sinal. Para os dois usuários, como o esperado, nota-se que o valor de SNR é inversamente proporcional a AWGN no sinal, sendo também inversamente proporcional a BER.

3.2 Efeito do SIC imperfeito na decodificação do sinal.

Na seção 2.5.5, há a descrição de como ocorre a tradução da mensagem pelos usuários por meio do SIC. Porém, em alguns casos, esse processo pode não ocorrer de maneira correta. Nesta seção, será estudado um sistema com dois usuários, utilizando PD-NOMA no enlace direto, onde U_1 tem $d_1 = 1000 m$ e $\alpha_1 = 0,8$, enquanto que U_2 com $d_2 = 400 m$ e $\alpha_2 = 0,2$.

Considerando um ambiente que utiliza a técnica PD-NOMA no enlace direto com dois usuários, se o SIC ocorreu perfeitamente, obtemos a equação (2.16) para $y_2^{NOMA,d}$. Porém, se o SIC não decodificou corretamente, teremos um valor residual do sinal de x_1 em $y_2^{NOMA,d}$, como descrito em:

$$y_2^{NOMA,d} = h_2(\sqrt{\epsilon}p_1x_1 + p_2x_2) + \omega \quad (3.2)$$

Onde: ϵ é a fração residual de x_1 , h_2 representa o ganho do canal, p_1 e p_2 são as potências transmitidas de U_1 e U_2 , ω representa o ruído AWGN.

Neste caso, ao comparar a equação (3.2) com (2.16), nota-se que no sinal recebido do usuário U_2 , $\sqrt{\epsilon}p_1x_1$ é o termo residual da SIC imperfeita ocorrida na identificação do sinal no enlace direto. Na seção 2.5.6, a taxa de dados para cada usuário quando o SIC ocorre perfeitamente, é dada por (2.23). Porém, devido ao SIC imperfeito, o valor residual de potência de U_1 ainda fica presente no denominador e como resultante, a taxa alcançável é:

$$R'_{imperf_2}{}^{NOMA,d} = W \log_2 \left(1 + \frac{|h_2|^2 p_2}{\epsilon |h_2|^2 p_1 + N_0} \right) \quad (3.3)$$

Onde: W representa a largura de banda, h_2 representa o ganho do canal onde x_2 foi transmitido, p é o coeficiente de alocação de potência e N_0 é a densidade espectral de potência de ruído. Analisando as equações (2.23) e (3.3), no enlace direto, R'_{perf} é maior do que R'_{imperf} , ou seja, o SIC imperfeito prejudica a taxa de dados do usuário que executa o SIC.

Para executar a simulação do efeito do SIC imperfeito na decodificação do sinal, são utilizados valores de ϵ entre 0 (SIC perfeito) e 10^{-1} , com a variação de potência de transmissão de 0 dBm a 70 dBm, onde a capacidade é calculada como na equação (3.3).

Na Figura 15, há a análise de U_2 em diferentes valores de potência de transmissão, já que U_1 não realiza SIC.

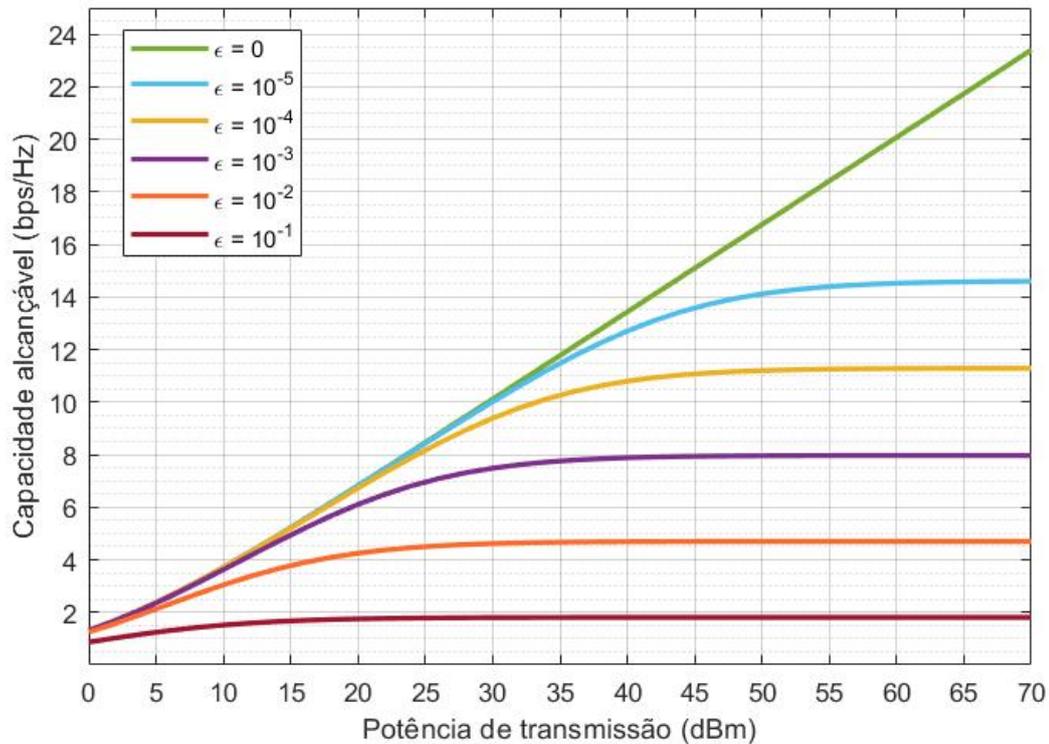


Figura 15 – Taxa alcançável de U_2 utilizando SIC imperfeito.

Fonte: Autores.

Para uma potência de transmissão de 20 dB, a capacidade alcançável para $\epsilon = 10^{-1}$ é aproximadamente igual a 2 bps/Hz, enquanto para $\epsilon = 10^{-2}$, a capacidade é de 4,2 bps/Hz, em $\epsilon = 10^{-3}$, a capacidade é 6 bps/Hz. Já $\epsilon = 10^{-4}$, $\epsilon = 10^{-5}$ e $\epsilon = 0$ têm valor de capacidade de 7 bps/Hz. Em todas as curvas representando o SIC imperfeito, na potência de transmissão de 55 dBm há uma estabilização do valor de capacidade alcançável e as diferenças de taxas para cada ϵ apresentam aproximadamente uma diferença de cerca de 3 bps/Hz entre si.

De forma geral, nota-se que para cada curva, conforme aumenta-se a potência de transmissão, há o aumento da capacidade de U_2 até determinado valor de potência. Após isto, a capacidade alcançável se estabiliza e se mantém constante para todos os valores de potência de transmissão seguintes. Quanto menor o valor determinado de ϵ , maior é a capacidade alcançável de transmissão.

3.3 Análise de quantidade de usuários em um canal

A análise dessa seção será feita para verificar a quantidade de usuários em um canal AWGN, utilizando-se técnica de PD-NOMA com modulação BPSK. Para isso, considera-se que o total de N usuários nos quais ordenaremos em $U_1, U_2, U_3, \dots, U_N$ e seus respectivos coeficientes de alocação $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_N$ onde a ordem de alocação de potência ocorre do usuário mais longínquo, U_1 para o mais próximo U_N .

Os coeficientes devem seguir as seguintes condições:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \dots + \alpha_N = 1 \quad (3.4a)$$

$$\alpha_1 > \alpha_2 > \alpha_3 > \dots > \alpha_N \quad (3.4b)$$

Sabe-se que U_1 realizará uma decodificação direta do sinal recebido e o sinal dos $N - 1$ restantes, será considerado interferência. Já U_2 , realizará o SIC para estimar e remover o sinal de U_1 e, após a remoção do sinal de U_1 , temos que $\alpha_2 > \alpha_3 > \alpha_4 > \dots > \alpha_N$ então realiza-se a decodificação direta desse sinal. E o mesmo será feito por U_3 , porém ele realizará SIC duas vezes e assim sucessivamente até chegarmos no sinal do usuário mais próximo (menor potência) N .

Desta forma, considerando um canal com $N = 100$ usuários, então U_N precisará realizar $N - 1 = 99$ processos de SICs para conseguir obter o seu sinal desejado e caso ocorra erro em alguma das etapas anteriores até a decodificação do seu sinal, esse erro será propagado e ao final, o sinal apresenta um aumento de BER. No processo de transmissão do sinal também podem ocorrer uma grande quantidade de interferências, causadas pelo meio (*fading*, *shadowing* e outros efeitos não ideais sob o sinal transmitido), que somados a capacidade computacional de decodificação requerida até que se consiga chegar ao y_{100} consumem muito tempo e podem resultar em erros de recepção de sinal aos usuários.

Quando vários usuários estão em uma mesma portadora, outro problema a ser considerado é que a alocação de potência precisa satisfazer as condições de (3.4). Seguindo essas diretrizes, verifica-se que quanto mais usuários são adicionados ao canal, menor será a potência recebida por cada um e isso diminui taxa de dados máxima dos mesmos. Para o usuário com maior ganho no canal, a diminuição da potência transmitida afeta a taxa de dados do sinal recebido pelo usuário e, possivelmente, sua capacidade de estimar o seu próprio sinal.

Considerando um canal AWGN, a largura de banda de 15 MHz, as colocações

acima e utilizando-se da equação (2.22), pode-se obter um gráfico relacionando a taxa de dados e o número de usuários para seis valores distintos de potência transmitidas em dBm, como mostrado a seguir.

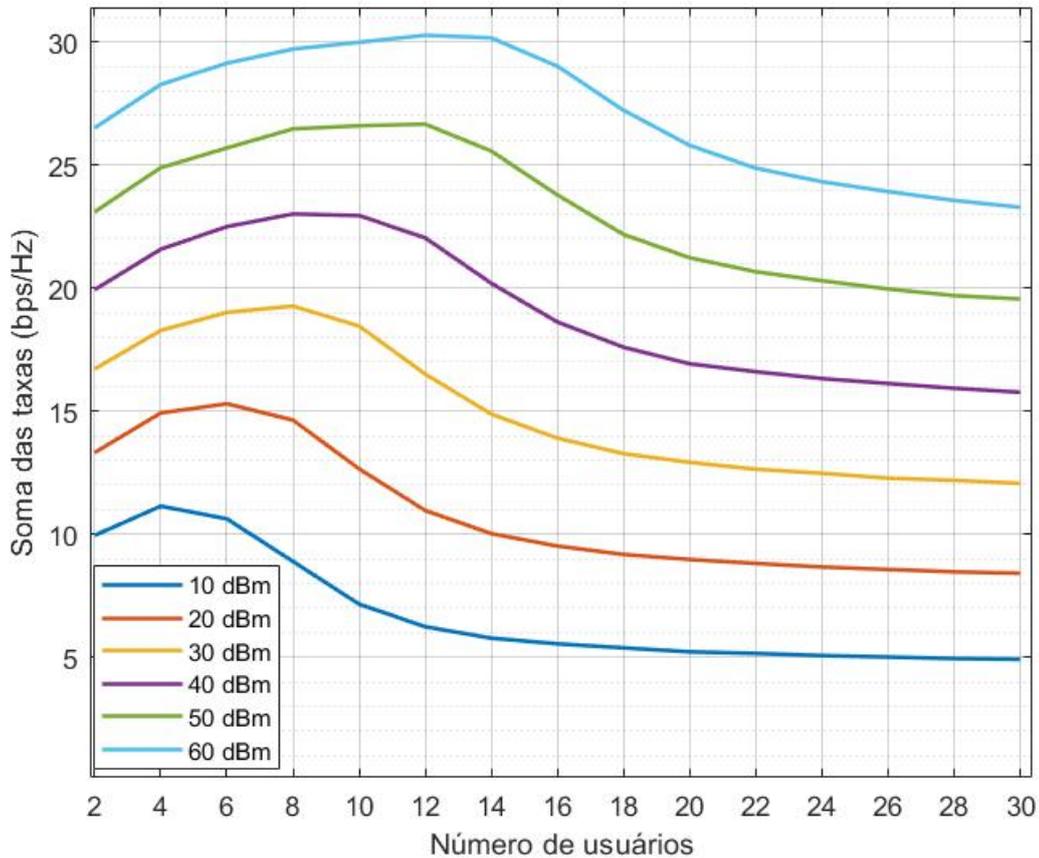


Figura 16 – Gráfico de taxa de dados por número de usuários.

Fonte: Autores.

Na Figura 16, o aumento do número de usuários multiplexados em um mesmo canal se dá até um valor limitante e a partir deste, a capacidade do canal diminui e satura. A capacidade em bps/Hz do sistema varia em função do número de usuários. Pelo algoritmo utilizado, um canal para 4 usuários em uma potência de transmissão de 10dBm, a taxa máxima possível é de 11 bps/Hz enquanto para a mesma quantidade de usuários na potência de 60 dBm, a taxa máxima possível é de aproximadamente 28 bps/Hz. Uma outra análise da simulação, para um canal com 12 usuários em uma potência de transmissão de 60 dBm, a taxa máxima possível é de aproximadamente 30 bps/Hz.

Assim, de acordo com o gráfico da Figura 16, para cada valor de potência transmitida, há um valor ótimo de usuários suportados pelo canal e também um valor limite para a taxa máxima possível de transmissão, considerando um enlace direto utilizando-se da técnica de PD-NOMA em um canal AWGN. Então, o aumento da potência de transmissão aumenta o número de usuários no canal porém está limitado à capacidade do sistema de

conseguir transmitir um sinal com valores de potência elevados além de que ao alcançar o número ótimo de usuários, o aumento nesse número provoca o decaimento nas taxas máximas possíveis de transmissão do canal.

3.4 Análise de capacidade de técnica de OMA e PD-NOMA

Nesta seção, é realizada a comparação da capacidade do canal de comunicação com relação ao número de usuários utilizando-se das técnicas de PD-NOMA e OMA considerando o enlace direto de um canal BPSK com dois usuários: (U_1) mais distante da BS e o U_2 mais próximo. Esta é a mesma situação que a descrita em 2.5.6, para PD-NOMA. Para OMA, a situação descrita equivale àquela observada na seção 2.4.1. As referências matemáticas desta seção são de (SALAUN, 2020) e (ALDABABSA et al., 2018) e foram descritas nas seções 2.5.6 e 2.5.7.

A taxa máxima de transmissão de OMA para o n -ésimo usuário é:

$$R_n^{OMA,d} = \frac{1}{N} \log_2(1 + SNR_n^{OMA,d}) \quad (3.5)$$

Onde: N representa a quantidade máxima de usuários do canal e $SNR_n^{OMA,d}$ é relação sinal-ruído do usuário n no enlace direto pela técnica de OMA.

A taxa de transmissão máxima de PD-NOMA, para o n -ésimo usuário é:

$$R_n^{NOMA,d} = \log_2(1 + SINR_n^{NOMA,d}) \quad (3.6)$$

Onde: $SINR$ representa a relação sinal-interferência mais ruído do usuário n no enlace direto pela técnica de NOMA.

Na Figura 17, as equações (3.5) e (3.6) com U_1 e U_2 , $\alpha_1 = 0.8$, $\alpha_2 = 0.2$, $d_1 = 10$ m e $d_2 = 4$ m.

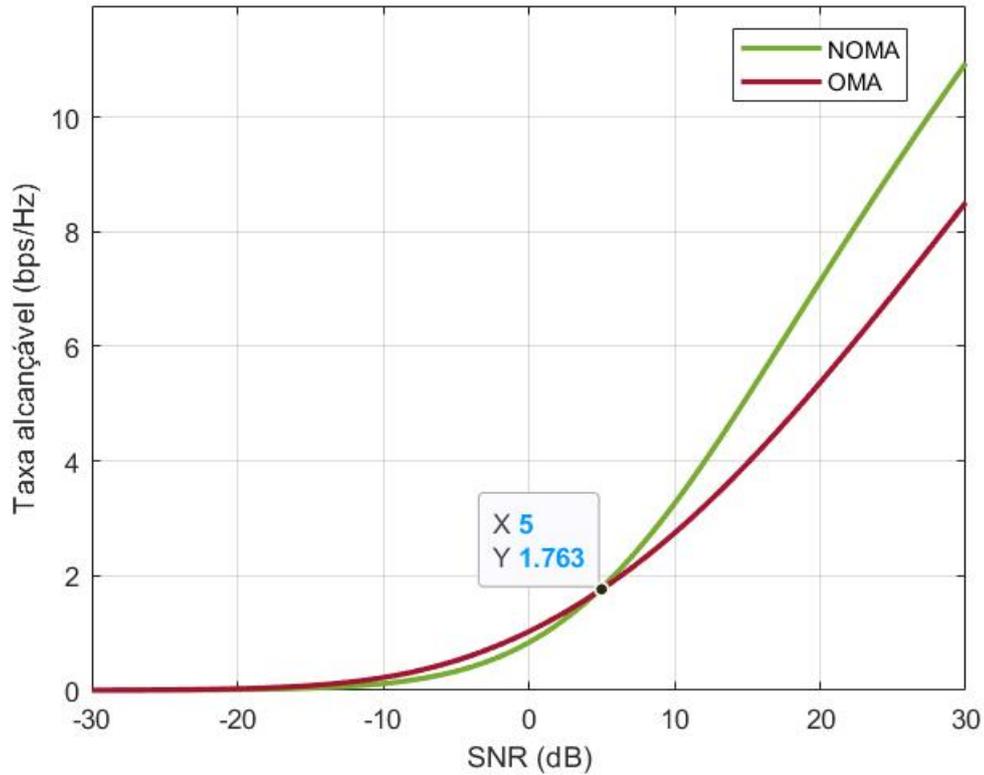


Figura 17 – Capacidade PD-NOMA e OMA, considerando dois usuários.

Fonte: Autores.

Na análise para dois usuários, entre a taxa alcançável e o SNR, o resultado obtido a partir da utilização dos coeficientes $\alpha_1 = 0.8$ e $\alpha_2 = 0.2$, Figura 17, é descrito um comportamento minimamente favorável de OMA para valores de SNR abaixo de 5 dB. Para maiores valores de SNR, há maior taxa alcançável de NOMA em relação a OMA.

Na Figura 18, estão para três usuários, com distâncias de $d_1 = 10\text{ m}$, $d_2 = 6\text{ m}$, $d_3 = 4\text{ m}$ e coeficientes de alocação de potência $\alpha_1 = 0.8$, $\alpha_2 = 0.15$, $\alpha_3 = 1 - (\alpha_1 + \alpha_2) = 0.05$.

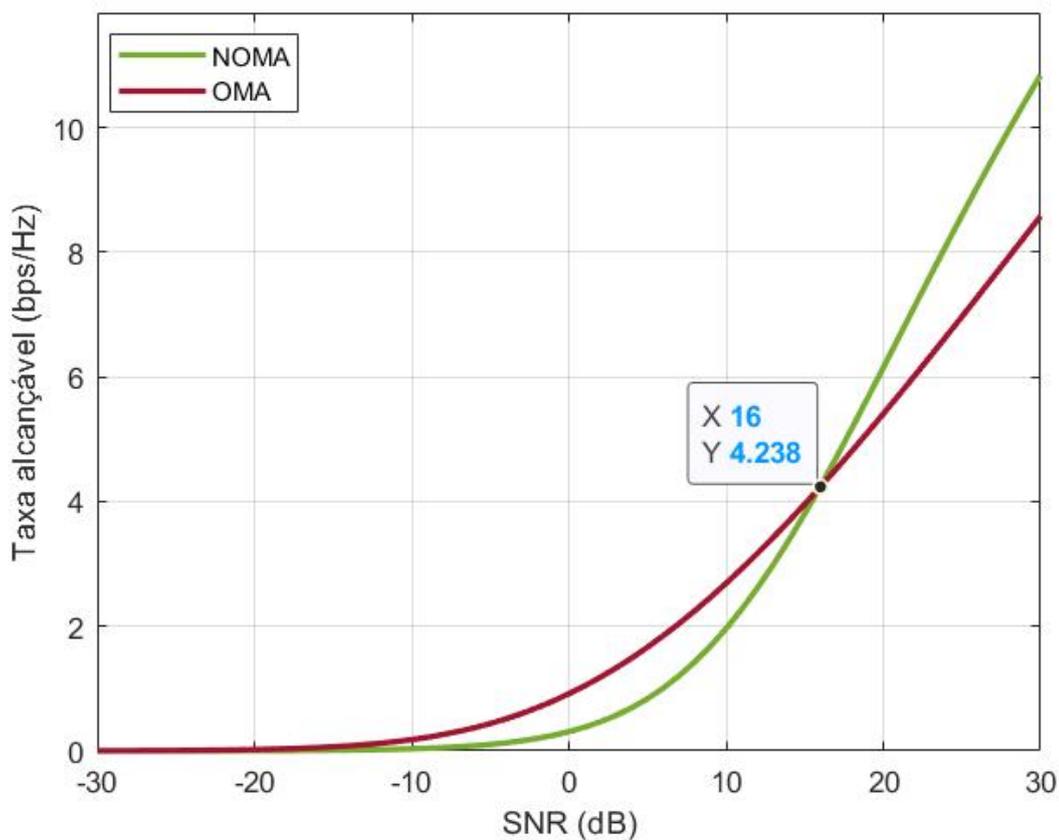


Figura 18 – Capacidade PD-NOMA e OMA, considerando três usuários.

Fonte: Autores.

No caso de três usuários, Figura 18, as diferenças de desempenho das técnicas de OMA e PD-NOMA aparecem de forma mais evidente. As SNR de OMA para valores de até 16 dB possuem medidas mais elevadas que PD-NOMA, mas deste valor em diante, PD-NOMA apresenta melhores taxas.

Ainda para valores SNR baixos, em PD-NOMA ocorre a superposição de sinais e a transmissão de apenas um sinal enquanto em OMA, os sinais dos dois usuários são divididos no canal e por isso pode ocorrer a interferências de transmissão múltipla. Por outro lado, OMA utiliza menos recursos computacionais que PD-NOMA, que transmite para um total de N usuários em apenas uma portadora, enquanto OMA necessita 1 *slot* de tempo ou frequência para cada usuário. Esta característica é relevante para as aplicações que utilizarão as redes 5G, por exemplo pois, atualmente, há um certo déficit de banda disponível para os canais de comunicações.

3.5 Análise de sistemas híbridos

Como descrito na seção 3.3, adicionar grande quantidade de usuários em um mesmo canal em PD-NOMA não otimiza a taxa de dados ou a BER. Dessa forma, na tentativa de aumentar o número de usuários suportados, nesta seção é realizada a análise no enlace direto de um sistema híbrido composto por um sistema com técnica de OMA (especificamente, TDMA) e a aplicação de PD-NOMA. Na técnica de TDMA, cada usuário possui um *slot* de tempo diferente, não havendo a sobreposição dos sinais dos usuários.

A técnica de PD-NOMA empregada em mais de um canal, respeitando as limitações do canal, traz menor complexidade de identificação quando comparada com a aplicação em apenas um canal com todos os usuários. Isto ocorre pois há menos sinais combinados, um número inferior de ciclos no algoritmo de SIC (visto na seção 2.5.5) e menor impacto em outros usuários de melhores condições de canal, caso ocorra um erro no processo de SIC.

Na simulação realizada, em todos os cenários tem-se quatro usuários (U_1, U_2, U_3, U_4), com as distâncias em relação à BS:

$$d_1 > d_2 > d_3 > d_4 \quad (3.7)$$

Tratando-se de um sistema híbrido, existem diferentes formas de organização de usuários no canal. Entre as opções, estão: agrupar os usuários mais longes relação a BS (longe-longe) e os mais próximos (prox-prox); o mais próximo com o mais distante e o segundo mais próximo com o segundo mais distante (prox-longe).

Com isso, pode-se analisar os diferentes agrupamentos de usuários. Na configuração da Figura 19, considerando a técnica de TDMA, para cada n -ésimo usuário será atribuído um fator de codificação no domínio do tempo β_n da banda W .

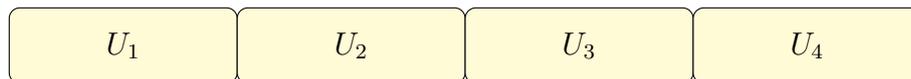


Figura 19 – Representação de cada usuário em uma portadora utilizando TDMA.

Fonte: Autores.

Sendo assim, quatro *slots* no domínio de tempo distintos, em uma mesma banda, nos quais a taxa de dados de cada usuário é dada por:

$$R_n^{TDMA} = W \beta_n \log_2 \left(1 + \frac{h_n p_n}{N_0 W} \right) \quad (3.8)$$

E a soma das taxas é:

$$R^{TDMA} = \sum_{n=1}^N R_n^{TDMA} \quad (3.9)$$

No caso retratado na Figura 20, os quatro usuários estão alocados em uma mesma portadora utilizando-se da técnica de PD-NOMA.

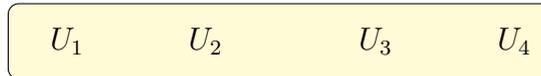


Figura 20 – Representação de todos usuários em uma mesma portadora utilizando PD-NOMA.

Fonte: Autores.

E para a taxa de dados dessa configuração, têm-se a equação (3.10) e para a soma, a equação (3.11):

$$R_n^{NOMA,d} = W \log_2 \left(1 + SINR_n^{NOMA,d} \right) \quad (3.10)$$

$$R^{NOMA} = \sum_{n=1}^N R_n^{NOMA} \quad (3.11)$$

Considerando o agrupamento da Figura 21, o usuário mais longe da BS é agrupado com o segundo usuário mais longe em um mesmo canal. Já os dois usuários mais próximos, são agrupados em outro canal.



Figura 21 – Representação de agrupamento na representação longe-longe, prox-prox.

Fonte: Autores.

Considerando o exemplo com o agrupamento longe-longe, prox-prox, os grupos se tornam U_1 e U_2 , U_3 e U_4 . Para os usuários mais distantes de cada grupo (U_1 e U_3), suas equações são análogas:

$$R_{1, \text{longe-longe}} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 P \alpha_1}{N_0 + |h_1|^2 P \alpha_2} \right) \quad (3.12)$$

$$R_{3, \text{prox-prox}} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{|h_3|^2 P \alpha_3}{N_0 + |h_3|^2 P \alpha_4} \right)$$

O mesmo ocorre para os usuários de cada grupo que estão mais próximos da BS. Estes, realizam SIC:

$$R_{2, \text{longe-longe}} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{|h_2|^2 P \alpha_2}{N_0} \right) \quad (3.13)$$

$$R_{4, \text{prox-prox}} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{|h_4|^2 P \alpha_4}{N_0} \right)$$

A soma das taxas obtidas por esta configuração é:

$$R_{\text{longe-longe, prox-prox}} = \sum_{n=1}^N R_{n, \text{longe-longe}} + \sum_{n=1}^N R_{n, \text{prox-prox}} \quad (3.14)$$

Na configuração prox-longe, em um primeiro canal se aloca o usuário mais distante e o usuário mais próximo. No segundo canal, o segundo usuário mais distante com o segundo mais próximo. Este sistema está representado na Figura 22.



Figura 22 – Representação de agrupamentos na representação prox-longe.

Fonte: Autores.

Para os usuários mais próximos dos dois grupos, há a realização de SIC. Suas taxas são:

$$R_{3,prox-longe} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{|h_3|^2 P \alpha_3}{N_0} \right) \quad (3.15)$$

$$R_{4,prox-longe} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{|h_4|^2 P \alpha_4}{N_0} \right)$$

Já para os mais distantes:

$$R_{1,prox-longe} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{|h_1|^2 P \alpha_1}{N_0 + |h_1|^2 P \alpha_4} \right) \quad (3.16)$$

$$R_{2,prox-longe} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{|h_2|^2 P \alpha_2}{N_0 + |h_2|^2 P \alpha_3} \right)$$

E a soma das taxas obtidas por esta configuração é:

$$R_{prox-longe} = \sum_{n=1}^N R_{n,prox-longe} \quad (3.17)$$

Com as informações matemáticas apresentadas nos itens anteriores, para todos os sistemas se considera $d_1 = 10$, $d_2 = 6$, $d_3 = 4$ e $d_4 = 2$. Para as análises dos agrupamentos prox-longe e prox-prox, longe-longe, utiliza-se dois fatores de potência por cada conjunto, sendo 0,8 e 0,2. Para o sistema com a técnica de PD-NOMA com apenas um grupo, os fatores de alocação de potência são 0,8, 0,15, 0,0375 e 0,0125. No conjunto que se utiliza TDMA, a soma das taxas é representada na equação (3.9). A soma referente ao sistema que se utiliza PD-NOMA em uma só portadora está na equação (3.11). Para as somas

das taxas dos sistemas longe-longe,prox-prox, pela equação (3.14). Já para o sistema prox-longe, pela equação (3.17). Por fim, há a simulação das taxa de dados relacionada com a SNR de cada canal, gerando a Figura 23.

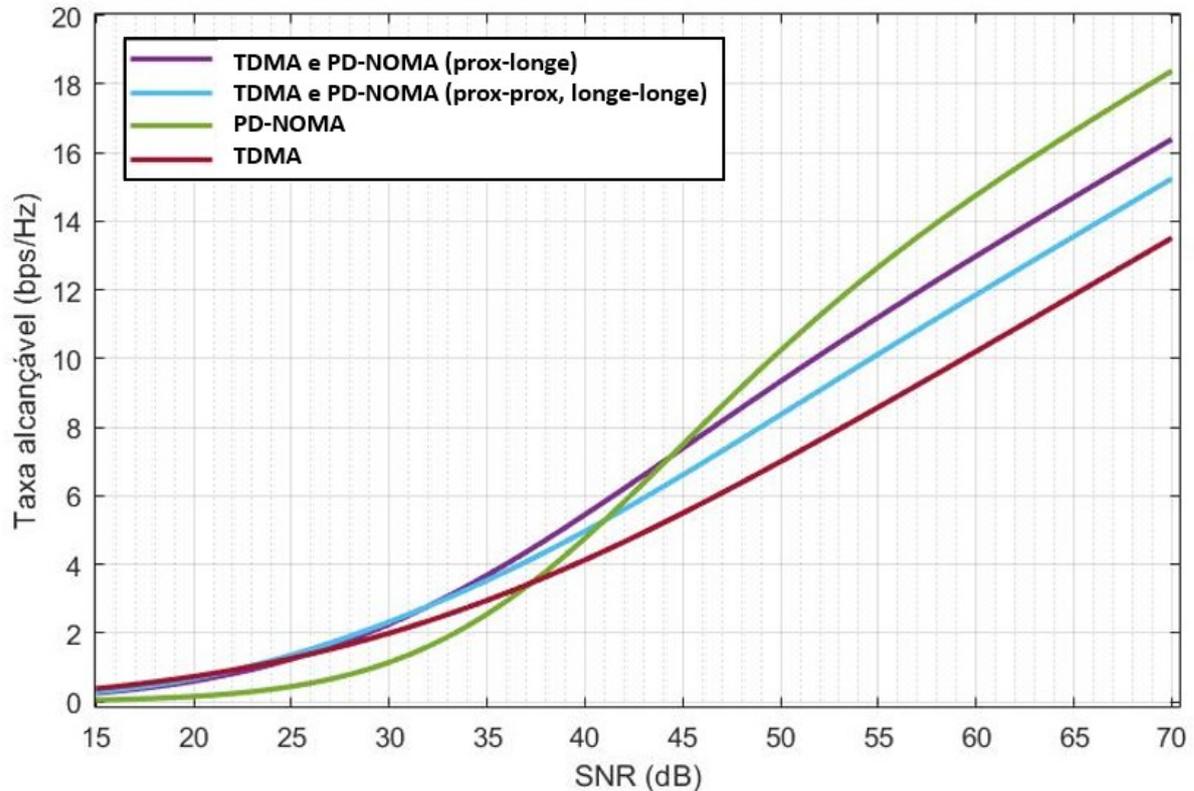


Figura 23 – Comparação ente TDMA, NOMA, TDMA-NOMA prox-longe e TDMA-NOMA prox-prox, longe-longe.

Fonte: Autores.

A faixa mais comum de trabalho de sistemas de comunicação é entre 10 dB e 20 dB, dependendo da aplicação, e nos resultados obtidos, no início das curvas, com $SNR < 30$ dB, PD-NOMA apresenta resultados inferiores. A medida em que ocorre o aumento gradativo de SNR, as curvas começam a se diferenciar. Entre $30 < SNR < 40$, os sistemas híbridos apresentam resultados similares, enquanto gradativamente PD-NOMA apresenta melhorias de resultados. Por outro lado, TDMA começa a apresentar resultados inferiores a todos os outros sistemas. PD-NOMA ultrapassa TDMA em aproximadamente $SNR = 37$ dB, o sistema TDMA e PD-NOMA com prox-prox, longe-longe em $SNR = 41$ dB e o sistema TDMA com PD-NOMA prox-longe em $SNR = 44$ dB.

De maneira geral, a curva da configuração TDMA é a que apresenta piores resultados à partir de 38 dB e a curva da configuração híbrida de agrupamento TDMA com NOMA (prox-prox, longe-longe), tem o terceiro melhor resultado. Isto é esperado, visto que a semelhança entre os ganhos dos canais agrupados trazem valores de alocação de potência não tão distintos e podem dificultar o processo de SIC.

Por fim, as curvas de PD-NOMA no enlace direto e aplicação de alocação híbrida de agrupamento prox-longe possuem os melhores resultados de desempenho na relação taxa de dados por SNR, sendo que o primeiro tem a melhor relação taxa por SNR. Entretanto, um canal utilizando apenas a técnica de PD-NOMA requer uma grande capacidade de processamento computacional a medida que aumentamos o número de usuários suportados. Embora os sistemas híbridos apresentem bons resultados, análises específicas são necessárias para cada aplicação real, já que as distâncias entre os usuários e a BS, fatores como alocação de potência e quantidade de usuários influenciam os resultados de PD-NOMA. Ao mudar estes valores, pode-se obter resultados em que as técnicas híbridas apresentam resultados muito superiores, como encontrado em diferentes estudos.

3.6 Relação entre alocação de potência e BER

Quando a potência alocada é fixa, não é necessário conhecer o estado ou as condições do canal para determiná-la, tornando o ajuste dos valores mais simples do que quando ocorre a alocação de potência dinâmica. Entretanto, a alocação de potência fixa não é otimizada. Para exemplificar, a técnica de PD-NOMA considerando um enlace direto, na Figura 24, em azul está o U_1 com $d_1 = 1000$ m, enquanto que o U_2 tem $d_2 = 400$ m.

Na Figura 24, o eixo x se refere à potência alocada para o usuário mais distante e é calculado variando-se os valores de α_1 entre 0 e 1 enquanto o valor da potência alocada para o usuário mais próximo é $\alpha_2 = 1 - \alpha_1$. No eixo y , está a BER, pela equação (3.1) a partir do valor do sinal recebido, calculado por (2.13) onde cada conjunto de curvas se refere a uma potência de transmissão total disponível P . Os cenários com as curvas tracejadas se referem a 15 dBm, as linhas com ponto e traço se referem a 30 dBm, as linhas preenchidas se referem a 45 dBm e o valor de h_n é calculado de forma aleatória e mantido fixo por toda a simulação realizada.

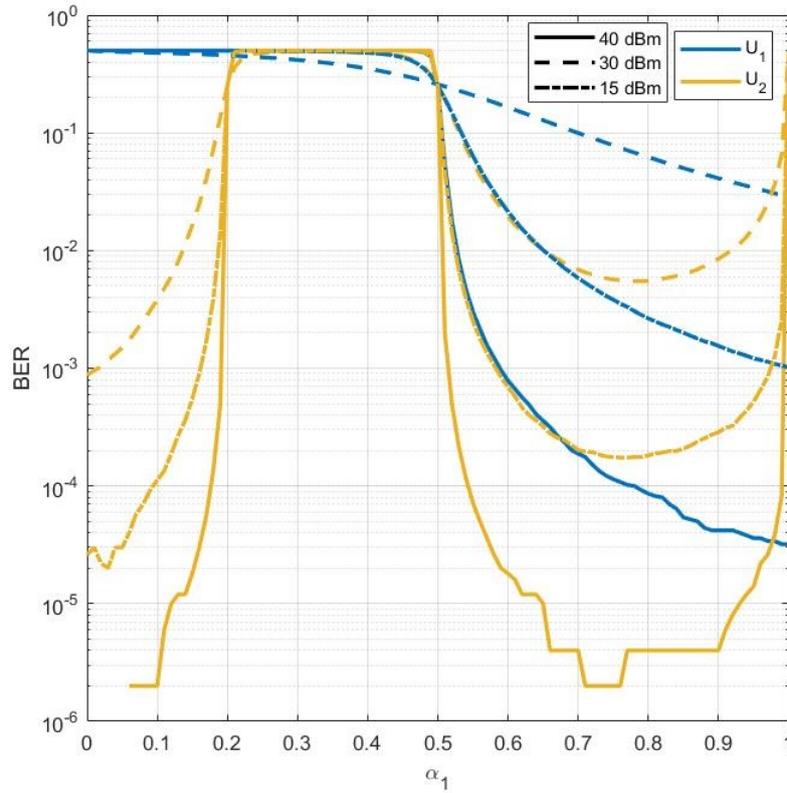


Figura 24 – Relação entre fator de potência e BER, com diferentes valores de potência.

Fonte: Autores.

Na Figura 24, quanto maior a potência para o U_1 em um sistema com a técnica de NOMA, menor é sua BER, quando comparado com diferentes potências para este usuário. Porém, ao comparar cada U_1 com seu par U_2 em situação com mesma potência, o segundo usuário apresenta uma BER alta, com grande possibilidade de não decodificar seu sinal de forma correta. Isso se dá visto que, para a expressão SINR para o usuário distante, como indicado na equação (2.19) explicado na seção 2.5.6, α_2 está no denominador e α_1 no numerador, sempre que $\alpha_1 < \alpha_2$, o usuário distante sempre terá valores relativamente elevados para sua BER.

Ao variar a potência entre 15, 30 e 45 dBm, nota-se que as curvas nos cenários com maiores potências aparecem com seus pontos mínimos sempre com valores mais baixos de BER em relação às potências menores. Quando o fator de alocação para o U_1 aumenta, há a tendência que sua BER diminua. Equivalentemente, a diminuição da potência alocada para U_2 afeta diretamente a sua BER, gerando valores mais elevados de BER.

É necessário escolher uma faixa em que ambos os usuários sejam favorecidos. A região em que α_1 está entre 0,7 e 0,9 é a que apresenta melhor resultado com essa consideração.

3.7 Análise do uso de alocação dinâmica de potência

Neste trabalho, até então foram considerados valores de alocação de potência estáticos e predefinidos no enlace direto, mas existem outros métodos para melhor alocação de potência, como os métodos de alocação dinâmica que consideram as condições do canal. Os métodos de alocação dinâmica podem visar diferentes objetivos: maximizar a taxa de dados dos usuários, aumentar a taxa total do sistema, eficiência energética, entre outros.

Conforme o desenvolvimento realizado na seção 2.6.2, é possível calcular a probabilidade de interrupção de funcionamento entre a alocação de método fixo e a alocação dinâmica, a partir das equações (2.40) e (2.37).

Na simulação realizada para esta seção, considera-se um sistema PD-NOMA no enlace direto com dois usuários (U_1 e U_2). As distâncias entre estes usuários e a BS são de $d_1 = 1000$ m, $d_2 = 400$ m, tanto para alocação de potência dinâmica, quanto para a alocação de potência fixa (esta, com $\alpha_1 = 0,8$ e $\alpha_1 = 0,2$). A probabilidade de interrupção de funcionamento por R^* é calculado para cada usuário em cada situação. Nesta simulação, uma vez que o U_1 (aqui, o usuário mais distante da BS) alcança o valor definido para sua taxa $\xi = \frac{2^{R^*}}{W} - 1$, aloca-se toda a potência restante para U_2 . O resultado é mostrado na Figura 25.

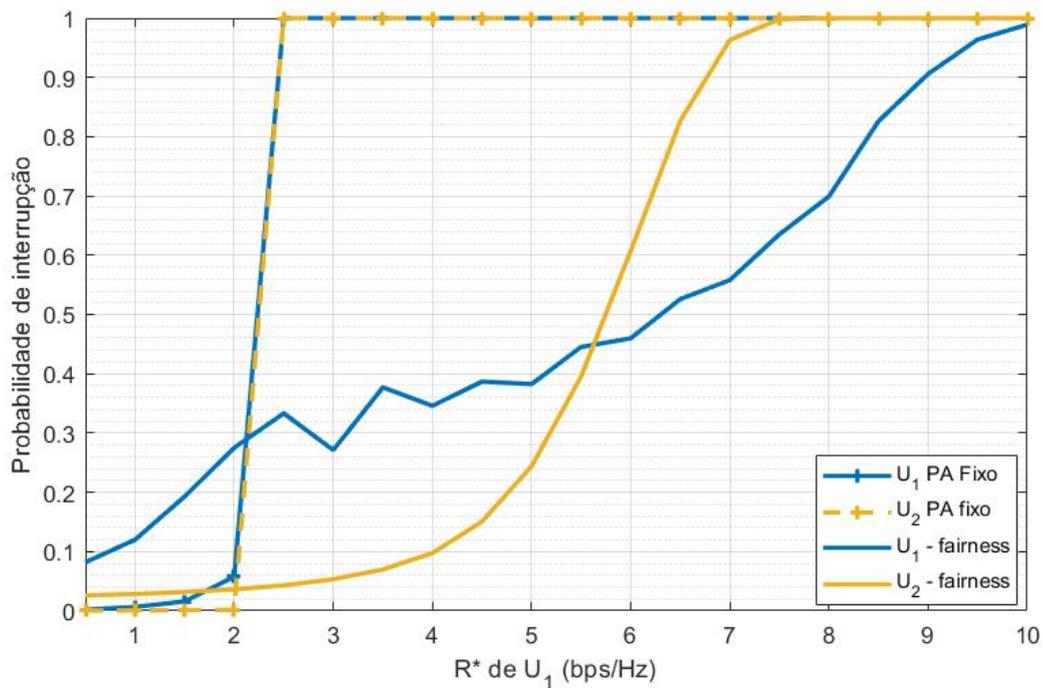


Figura 25 – Probabilidade de interrupção de funcionamento por R^* de U_1 .

Fonte: Autores.

Na Figura 25, por não considerarem as condições do canal, ambos usuários com

alocação de potência fixa alcançam a 100% da probabilidade de interrupção de funcionamento rapidamente quando R^* está entre 2 e 2,5 bps/Hz e assim se mantêm após 2,5 bps/Hz. Por outro lado, sua implementação é simples.

Já para U_1 e U_2 considerando a alocação de potência dinâmica que visa a justiça entre os usuários e um SINR limite para U_1 , os resultados das curvas representantes destes usuários nessa alocação de potência apresentam resultados melhores: U_2 satura com R^* em aproximadamente 7,5 bps/Hz, enquanto que U_1 , em 10 bps/Hz.

A partir do desenvolvimento realizado na seção 2.6.2, analisa-se a alocação fixa e a alocação dinâmica no enlace direto, de maneira justa, utilizando-se da equação (2.40). Dessa forma, é possível associar coeficientes de potência variáveis ao canal, de acordo com as condições que o mesmo oferece para a transmissão do sinal e conseqüentemente, trazer otimização de utilização do canal.

Na Figura 26, ao relacionar a potência transmitida com a equação (2.22) e calcular a média obtida para os dois usuários em cada técnica de alocação de potência, obtêm-se:

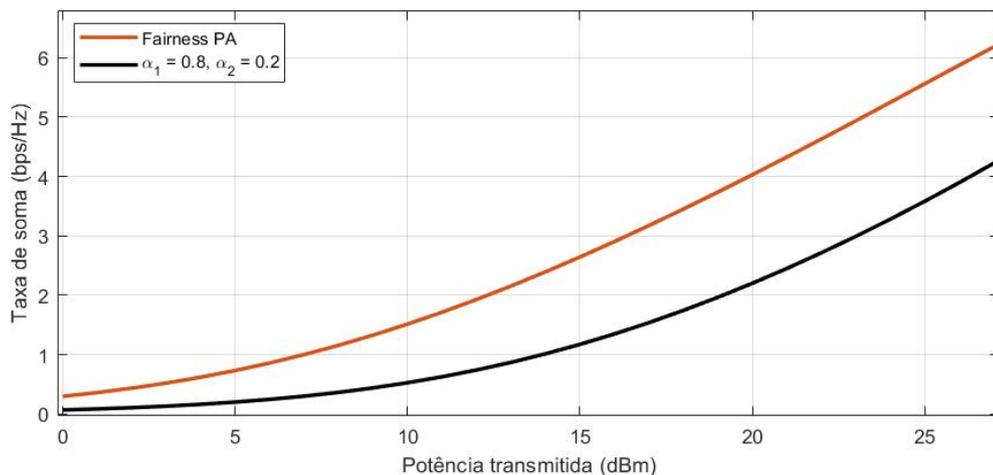


Figura 26 – Comparativo entre métodos de alocação de potência fixa e dinâmica no enlace direto para PD-NOMA com dois usuários.

Fonte: Autores.

Pode-se observar que na alocação de potência dinâmica há maior capacidade de canal e também potência de transmissão em comparação à determinação fixa do coeficiente α . Sendo assim, a utilização da primeira técnica oferece melhores condições para um canal de transmissão.

4 Conclusões e Trabalhos futuros

Neste trabalho, há uma breve descrição das principais tecnologias que antecederam NOMA, os conceitos fundamentais para o entendimento desta tecnologia e comparações com OMA. Ao focar na técnica de PD-NOMA, as simulações permitiram a obtenção de resultados quantitativos da eficiência, principalmente no cenário atual no qual tem-se o desenvolvimento de tecnologias para o 5G e próximas gerações de sistemas celulares móveis.

4.1 Conclusões

Após definir matematicamente diferentes parâmetros de NOMA, foi possível realizar análises de PD-NOMA no enlace direto. Primeiramente, a BER para um cenário com dois usuários (seção 3.1), em que o U_2 tem maior probabilidade de ter erros de bits, uma vez que necessita identificar corretamente o sinal do usuário U_1 antes de obter o sinal desejado, em função da realização de SIC.

A segunda análise realizada trata-se do efeito do SIC imperfeito na decodificação do sinal (seção 3.2), em que no processo de obtenção do sinal desejado para cada n usuário é dependente da identificação do sinal dos usuário $n - 1$. Uma vez que há o SIC imperfeito para dado usuário, há impacto na taxa alcançável do usuário seguinte.

Embora a vantagem mais notória de NOMA em relação a OMA seja a utilização de mais de um usuário em um mesmo slot do canal, na análise do impacto da quantidade de usuários (seção 3.3), fica evidente que não é adequado ter uma grande quantidade de usuários em um mesmo canal sem as devidas considerações: para N usuários, é necessário executar SIC $N - 1$ vezes. Estas execuções impactam os outros usuários se não há qualidade em seus resultados, como indicado na seção 3.2).

Ao comparar a capacidade de um sistema OMA e um PD-NOMA (seção 3.4), nota-se que para valores elevados de SNR, NOMA apresenta melhores resultados no cenário de SIC perfeito, tanto para $N = 2$ quanto para $N = 3$ usuários. A comparação da capacidade de sistemas OMA e NOMA no enlace direto, quando considerados valores SNR baixos, OMA apresenta maior taxa alcançável por SNR, entretanto há a maior utilização de recursos na base do tempo e frequência, devido a ortogonalidade entre os usuários. Já para o NOMA, demonstra-se que mesmo sem utilizar a transmissão ortogonal entre os usuários, ainda é possível obter elevadas taxas de transmissão e valores baixos de BER, tendo como foco a otimização de coeficientes intrínsecos à tecnologia de comunicação, como

a alocação de potência e otimização do número de usuários de acordo com os recursos disponíveis.

Uma tentativa de obter melhores resultados de PD-NOMA, ou até mesmo diminuir o processamento realizado por cada usuário, é utilizar sistemas híbridos (seção 3.5). Entretanto, é necessário analisar outros fatores como quantidade de usuários, alocação de potência, distância dos usuários até a BS, já que estes influenciam nos resultados dos sistemas.

Ao analisar a relação entre alocação de potência e BER (seção 3.6) no caso de dois usuários, pode-se concluir que para o primeiro usuário, é apropriado que seu fator de alocação esteja aproximadamente entre 0,7 e 0,9, para não causar grande impacto na BER do segundo usuário.

No sistema com a utilização de alocação de potência dinâmica (seção 3.7) ocorre maior capacidade de canal e potência de transmissão em relação à potência fixa. Entretanto, há a necessidade de verificar e analisar as condições do canal para este tipo de alocação de potência, adicionando complexidade ao sistema.

Em uma análise final deste trabalho, o objetivo de estudo teórico de NOMA se deu de forma satisfatória por meio de uma densa revisão bibliográfica e estudo das equações que regem o NOMA no domínio da potência para o enlace direto. O conhecimento da tecnologia permitiu realizar simulações onde verificou-se certa inviabilidade na utilização pura da técnica de PD-NOMA no contexto de enlace proposto, ao utilizar muitos usuários, por exemplo. Porém este caso pode apresentar melhores resultados ao utilizar a tecnologia híbrida, uma combinação de NOMA e OMA. Nota-se a necessidade de estudar NOMA para diferentes cenários, uma vez que diversos fatores como alocação de potência, quantidade de usuários, distância entre usuários influenciam nos resultados obtidos.

4.2 Trabalhos Futuros

A tecnologia NOMA traz uma abertura grande de possibilidades e consequentemente, linhas de estudo e desenvolvimento. No sentido de dar continuidade ao trabalho apresentado, o estudo do enlace direto utilizando-se da técnica de NOMA com sistemas MIMO (ZENG, 2020), melhores combinações de técnicas OMA e NOMA, aplicação de métodos para a otimização de alocação de recursos, tais como a técnica de alocação justa e *water-filling*, métodos para proteção de erro da informação e mesmo a aplicação de NOMA em sistemas menores como a comunicação por luz visível (ISLAM et al., 2016) são interessantes.

Como citado por (ZHU; ZHOU; HOU, 2022), uma vez que os sinais transmitidos

em NOMA têm a informação de todos os usuários, pode-se obter esse sinal de forma que ofereça riscos de segurança ao sistema. Segurança em um sistema NOMA é um dos pontos a serem investigados e aprimorados.

Um outro ponto de estudo com diversos trabalhos, é sobre o enlace reverso. Esse processo é tão importante quanto o do enlace direto analisado nesse projeto e de extrema importância quando fala-se sobre a conectividade entre BS e usuários. Na abordagem desse enlace, há maiores dificuldades de estudo por tratar-se de fontes diferentes que necessitam entregar sinais/informações para um mesmo destinatário na qual essas informações precisam estar sincronizadas para que sejam devidamente interpretadas e não cause muitas interferências entre si.

Outra possibilidade de estudo é que apesar da técnica de NOMA ainda estar se desenvolvendo, é necessário pensar no cenário energético mundial e conseguir trazer valores de eficiência energética e gastos de produção para a viabilização a sua utilização pois é preciso caminhar para um consumo mais eficiente e com menos gastos e impactos ambientais.

Referências

- 3GPP. *Introducing 3GPP*. 2022. Disponível em: <<https://www.3gpp.org/about-us/introducing-3gpp>>. Citado na página 4.
- AGRAWAL, D.; ZENG, Q. *Introduction to Wireless and Mobile Systems*. Cengage Learning, 2016. (Mindtap Course List). ISBN 9781305087132. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=vxKFCwAAQBAJ>>. Citado nas páginas 1 e 9.
- ALDABABSA, M. et al. A Tutorial on Nonorthogonal Multiple Access for 5G and Beyond. *IEEE Communications Magazine*, v. 2018, p. 24, 06 2018. Citado nas páginas 4, 16 e 37.
- BUDHIRAJA, I. et al. A Systematic Review on NOMA Variants for 5G and Beyond. *IEEE Access*, v. 9, p. 85573–85644, 2021. Citado na página 4.
- CASELLA, I. R. S. *Comunicações Móveis*. 2021. Notas de aula, Comunicações móveis. Citado nas páginas 8, 10, 11 e 12.
- CISCO. Cisco annual internet report (2018-2023) white paper. 2019. Citado na página 1.
- DONALD, V. H. M. Advanced mobile phone service: The cellular concept. *The Bell System Technical Journal*, v. 58, n. 1, p. 15–41, 1979. Citado na página 8.
- DU, Y. et al. Low-complexity lds-cdma detection based on dynamic factor graph. In: *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado na página 17.
- DUNLOP, J.; SMITH, D. G. *Telecommunications engineering*. [S.l.]: CRC Press, 1994. Citado na página 13.
- ERICSSON. Ericsson mobility report. 2022. Citado na página 2.
- GAO, Y. et al. Optimal downlink power allocation schemes for ofdm-noma-based internet of things. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, v. 18, n. 1, p. 15501477211064741, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1177/15501477211064741>>. Citado na página 5.
- GOLDSMITH, A. *Wireless communications*. [S.l.]: Cambridge university press, 2005. Citado na página 9.
- HOSHYAR, R.; RAZAVI, R.; AL-IMARI, M. LDS-OFDM an Efficient Multiple Access Technique. In: *2010 IEEE 71st Vehicular Technology Conference*. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–5. Citado na página 17.
- ISLAM, S. M. R. et al. Power-domain non-orthogonal multiple access (noma) in 5g systems: Potentials and challenges. *IEEE Communications Surveys and Tutorials*, PP, 12 2016. Citado nas páginas 4, 18 e 50.
- KARA, F.; KAYA, H. BER performances of downlink and uplink NOMA in the presence of SIC errors over fading channels. *IET Communications*, Wiley Online Library, v. 12, n. 15, p. 1834–1844, 2018. Citado nas páginas 22 e 27.

- KIM, H. *Wireless communications systems design*. [S.l.]: John Wiley & Sons Ltd, 2015. ISBN 9781118610152. Citado nas páginas 7 e 8.
- KIZILIRMAK, R. C. Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) for 5G Networks. In: BIZAKI, H. K. (Ed.). *Towards 5G Wireless Networks*. Rijeka: IntechOpen, 2016. cap. 4. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/66048>>. Citado nas páginas 20 e 21.
- KLÖCKNER, L.; CACHAFEIRO, M. S. Por que o Pe. Roberto Landell de Moura foi inovador?: conhecimento, fé e ciência. Porto Alegre: EdiPUCRS, 2012, 2012. Disponível em: <<https://editora.pucrs.br/edipucrs/acessolivre/Ebooks/Web/978-85-397-0226-8/pages/v2.pdf>>. Citado na página 1.
- LIU, F.; PETROVA, M. Dynamic power allocation for downlink multi-carrier noma systems. *IEEE Communications Letters*, v. 22, n. 9, p. 1930–1933, 2018. Citado na página 28.
- LU, L. et al. Prototype for 5G new air interface technology SCMA and performance evaluation. *China Communications*, v. 12, n. Supplement, p. 38–48, 2015. Citado na página 17.
- RAPPAPORT, T. S. *Comunicações sem fio: princípios e práticas*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2009. Citado nas páginas 1 e 11.
- SALAUN, L. *Resource allocation and optimization for the non-orthogonal multiple access*. Tese (Theses) — Institut Polytechnique de Paris, mar. 2020. Disponível em: <<https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02733385>>. Citado nas páginas 4, 5, 18, 23, 25 e 37.
- SCHWENGLER, T. *Wireless and Cellular Communications*. 1. ed. [S.l.]: LULU COM, 2019. Citado na página 11.
- SHANNON, C. E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, v. 27, n. 3, p. 379–423, 1948. Citado nas páginas 7 e 8.
- STÜBER, G. *Principles of Mobile Communication*. Springer US, 2013. ISBN 9781475762686. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=iiDaBwAAQBAJ>>. Citado na página 9.
- World Economic Forum in collaboration with PwC. *5G Outlook Series: Enabling Inclusive Long-term Opportunities*. [S.l.], 2021. Citado na página 2.
- YANG, Z. et al. The Impact of Power Allocation on Cooperative Non-orthogonal Multiple Access Networks With SWIPT. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, v. 16, n. 7, p. 4332–4343, 2017. Citado na página 28.
- ZENG, J. et al. *Multiple Access Technologies for 5G: New Approaches and Insight*. De Gruyter, 2021. (de Gruyter Stem). ISBN 9783110665819. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=EsM0zgEACAAJ>>. Citado na página 4.
- ZENG, M. *Resource allocation for NOMA Wireless Systems*. Tese (Theses) — Faculty of Engineering and Applied Science, Memorial University of Newfoundland, maio 2020. Disponível em: <<https://research.library.mun.ca/14351/>>. Citado nas páginas 5, 21 e 50.

ZHU, H.; ZHOU, N.; HOU, J. Security performance analysis of noma system based on multi-slot combined reception. In: *IEEE INFOCOM 2022 - IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*. [S.l.: s.n.], 2022. p. 1–6. Citado na página 50.