



Universidade Federal de Campina Grande – UFCG  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática – CEEI  
Departamento de Engenharia Elétrica – DEE  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE

Dissertação de Mestrado

**Avaliação de Métodos para Alocação de Recursos em  
Acesso Múltiplo Não Ortogonal no Domínio da Potência**

Joel Eugênio Cordeiro Junior

Campina Grande – PB

Agosto de 2018

Universidade Federal de Campina Grande – UFCG  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática – CEEI  
Departamento de Engenharia Elétrica – DEE  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE

# **Avaliação de Métodos para Alocação de Recursos em Acesso Múltiplo Não Ortogonal no Domínio da Potência**

Joel Eugênio Cordeiro Junior

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Prof. Dr. Marcelo Sampaio de Alencar  
Orientador

Prof. Dr. José Valentim dos Santos Filho  
Orientador

Campina Grande – PB, Brasil

© Joel Eugênio Cordeiro Junior - joel.junior@ee.ufcg.edu.br

C794a Cordeiro Junior, Joel Eugênio.  
Avaliação de métodos para alocação de recursos em acesso múltiplo não ortogonal no domínio da potência / Joel Eugênio Cordeiro Junior. – Campina Grande, 2018.  
71 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica E Informática, 2018.  
"Orientação: Prof. Dr. Marcelo Sampaio de Alencar, Prof. Dr. José Valentim dos Santos Filho".  
Referências.

1. Engenharia da Comunicação Elétrica. 2. Processamento da Informação. 3. Acesso Múltiplo. 4. Alocação de Recursos. 5. NOMA – SIC – 5G. I. Alencar, Marcelo Sampaio de. II. Santos Filho, José Valentim dos. III. Título.

CDU 621.391:654.9(043)

**"AVALIAÇÃO DE MÉTODOS PARA ALOCAÇÃO DE RECURSOS EM ACESSO  
MÚLTIPLO NÃO ORTOGONAL NO DOMÍNIO DA POTÊNCIA"**

**JOEL EUGÊNIO CORDEIRO JÚNIOR**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 21/09/2018**

*Marcelo Sampaio de Alencar*

**MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR, Ph.D., UFCG**  
Orientador(a)

**JOSÉ VALENTIM DOS SANTOS FILHO, Dr., UFRB**  
Orientador(a)

*Wamberto José Lira de Queiroz*

**WAMBERTO JOSÉ LIRA DE QUEIROZ, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)

*Waslon Terllizzie A. Lopes*

**WASLON TERLLIZZIE ARAUJO LOPES, D.Sc., UFPB**  
Examinador(a)

**CAMPINA GRANDE - PB**

*Dedico este trabalho à minha família  
pelo apoio e incentivo à minha formação*

---

---

# Agradecimentos

---

À minha querida mãe, Rosali, por todo esforço e amor dedicado a minha educação.

Ao meu pai, Joel, por me apoiar e dar suporte durante a minha formação.

Aos meus orientadores, Prof. Marcelo Sampaio de Alencar e Prof. José Valentim dos Santos Filho, pelo compromisso e dedicação à minha orientação. Pela confiança, pela amizade, e sobretudo, por todo conhecimento compartilhado ao longo desse período.

Aos meus irmãos, Joline, Rafael e Paula, pelo apoio, pelos conselhos e pela motivação.

À minha namorada, Samile, pela compreensão, incentivo e companheirismo ao longo dessa jornada. Por estar ao meu lado em todos os momentos.

Aos amigos Huilman e Ravillon, por terem me recebido em Campina Grande.

A todos os professores do PPgEE que contribuíram para minha formação acadêmica.

À CAPES, pelo suporte financeiro ao desenvolvimento dessa dissertação.

Aos colegas do IF Baiano, pela compreensão e apoio.

Por último, mas não menos importante, agradeço a todos os amigos e colegas do Iecom, Israel, Hélio, Prof. Wamberto, Danilo, Hugerles, Leonardo, Raissa, Vinícius, Tagle. Todos vocês contribuíam de forma especial com esse trabalho.

*"Que ninguém se engane, só se consegue a  
simplicidade através de muito trabalho."*

Clarice Lispector

---

---

# Resumo

---

Nos últimos anos, o número de usuários dos serviços de comunicações móveis tem crescido significativamente, e há previsões de que continue crescendo com a chegada da Internet da Coisas. Além disso, os novos serviços de comunicações demandam taxas de dados cada vez maiores. Porém, o aumento do número de usuários e da taxa de dados está limitado pela largura do espectro de frequências disponíveis para esses serviços. Nesse contexto, a técnica de acesso múltiplo não ortogonal (*Non-Orthogonal Multiple Access* – NOMA) é apresentada como uma forte candidata para promover o compartilhamento do espectro nos sistemas de comunicações móveis da próxima geração (5G). A técnica NOMA explora adicionalmente o domínio do potência para multiplexar os usuários e aumentar a região de capacidade da célula, aproveitando a diferença de ganho de canal entre os usuários. O desempenho de NOMA está condicionado à escolha dos pares de usuários e dos níveis de potência de transmissão individual. Este trabalho avalia métodos de pareamento de usuários e alocação de potência no *downlink* NOMA, buscando aumentar a eficiência espectral e compartilhar os recursos entre os usuários de forma justa. Para investigar o desempenho dos métodos propostos, é desenvolvido um simulador de nível de sistema, que permite avaliar a técnica NOMA em um ambiente multiusuário. A partir da análise realizada, propõem-se um critério de justiça baseado na fração da SINR dos usuários pareados. Respeitando esse critério, deriva-se o cálculo do coeficiente de alocação de potência justo. Além disso, utiliza-se uma estratégia de pareamento de usuários que visa equilibrar as oportunidades de ganhos entre os pares. Os resultados das simulações indicam que o método proposto é superior, em termos de eficiência e justiça, comparado com OMA e com outros métodos de alocação de recursos em NOMA. Mostra-se também, que NOMA pode ser explorado para promover redução da potência de transmissão e da interferência gerada.

**Palavras-chave:** Acesso múltiplo, alocação de recursos, NOMA, SIC, 5G.



---

---

# Abstract

---

In recent years, the number of users of mobile communications services has grown significantly, and there are predictions that this number will continue growing with the arrival of the Internet of Things (IoT). In addition, new communications services are demanding ever-increasing data rates. However, the increase in the number of users and the data rate is limited by the spectrum bandwidth available for these services. In this context, the Non Orthogonal Multiple Access (NOMA) technique presents itself as a strong candidate to promote spectrum sharing in next generation mobile communications systems (5G). The NOMA technique further exploits the power domain to multiplex users and increase the cell capacity region, taking advantage of the channel gain difference among users. The NOMA performance is conditioned by the choice of user pairs and individual transmission power levels. This work evaluates methods of user pairing and power allocation (UPPA) in the NOMA on downlink, seeking to increase spectral efficiency, and maintaining high fairness levels among users. In order to investigate the proposed methods performance, a system level simulator (SLS) is developed, which allows the evaluation of NOMA techniques in a multiuser environment. From the analysis developed, a fairness criterion based on the paired users SINR fraction is proposed. In compliance with this criterion, the calculation of the fair power allocation coefficient is derived. In addition, a user pairing strategy is used to balance the opportunities for gains among peers. The results of the simulations indicate that the proposed method is better than Orthogonal Multiple Access and others resource allocation methods in NOMA, in terms of efficiency and fairness. It is also shown that NOMA can be exploited to reduce the transmission power and interference generated.

**Keywords:** Multiple access, resoure allocation NOMA, SIC, 5G.

---

---

# Lista de Siglas

---

|             |   |  |
|-------------|---|--|
| <b>1G</b>   | <i>First-Generation</i>                     | Primeira Geração                               |
| <b>2G</b>   | <i>Second-Generation</i>                    | Segunda Geração                                |
| <b>3G</b>   | <i>Third-Generation</i>                     | Terceira Geração                               |
| <b>4G</b>   | <i>Fourth-Generation</i>                    | Quarta Geração                                 |
| <b>5G</b>   | <i>Fifth-Generation</i>                     | Quinta Geração                                 |
| <b>AMC</b>  | <i>Adaptive Modulation and Coding</i>       | Modulação e Codificação Adaptativa             |
| <b>AWGN</b> | <i>Additive White Gaussian Noise</i>        | Ruído Branco Gaussiano Aditivo                 |
| <b>BER</b>  | <i>Bit Error Rate</i>                       | Taxa de Erro ed Bit                            |
| <b>CDMA</b> | <i>Code Division Multiple Access</i>        | Acesso Múltiplo por Divisão de Código          |
| <b>CQI</b>  | <i>Channel Quality Indicator</i>            | Indicador de Qualidade de Canal                |
| <b>CR</b>   | <i>Cognitive Radio</i>                      | Rádio Cognitivo                                |
| <b>CSI</b>  | <i>Channel State Information</i>            | Informação de Estado do Canal                  |
| <b>D2D</b>  | <i>Device-to-Device</i>                     | Dispositivo-para-Dispositivo                   |
| <b>DEP</b>  | <i>Power Spectral Density</i>               | Densidade Espectral de Potência                |
| <b>EE</b>   | <i>Energy Efficiency</i>                    | Eficiência Energética                          |
| <b>ERB</b>  | <i>Base Station</i>                         | Estação Radiobase                              |
| <b>EU</b>   | <i>User Equipment</i>                       | Equipamento do Usuário                         |
| <b>FCP</b>  | <i>Cumulative Distribution Function</i>     | Função Cumulativa de Probabilidade             |
| <b>FDMA</b> | <i>Frequency Division Multiple Access</i>   | Acesso Múltiplo por Divisão em Frequência      |
| <b>FDP</b>  | <i>Probability Density Function</i>         | Função Densidade de Probabilidade              |
| <b>FPA</b>  | <i>Fixed Power Allocation</i>               | Alocação de Potência Fixa                      |
| <b>FSPA</b> | <i>Full Search Power Allocation</i>         | Alocação de Potência por Busca Exaustiva       |
| <b>FS</b>   | <i>Full Search</i>                          | Busca Completa                                 |
| <b>FTPA</b> | <i>Fractional Transmit Power Allocation</i> | Alocação de Potência de Transmissão Fracionada |

|              |  |   |
|--------------|--|---|
| <b>IEEE</b>  | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> | Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos |
| <b>IRC</b>   | <i>Interference Rejection Combining</i>                  | Combinação de Rejeição de Interferência             |
| <b>ITU</b>   | <i>International Telecommunication Union</i>             | União Internacional de Telecomunicações             |
| <b>IoT</b>   | <i>Internet Of Things</i>                                | Internet das Coisas                                 |
| <b>L2S</b>   | <i>Link-to-system</i>                                    | Enlace-para-sistema                                 |
| <b>LLS</b>   | <i>Link-level simulation</i>                             | Simulação de Nível de Enlace                        |
| <b>LTE-A</b> | <i>LTE-Advanced</i>                                      | LTE Avançado  |
| <b>LTE</b>   | <i>Long Term Evolution</i>                               | Evolução de Longo Prazo                             |
| <b>MCL</b>   | <i>Minimum Coupling Loss</i>                             | Perda Mínima de Acoplamento                         |
| <b>MCS</b>   | <i>Modulation and Code Scheme</i>                        | Esquema de Modulação e Código                       |
| <b>MIMO</b>  | <i>Multiple-Input and Multiple-Output</i>                | Múltiplas Entrada e Múltiplas Saídas                |
| <b>NOMA</b>  | <i>Non-Orthogonal Multiple Access</i>                    | Acesso Múltiplo Não Ortogonal                       |
| <b>OFDMA</b> | <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>     | Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência Ortogonal |
| <b>OMA</b>   | <i>Orthogonal Multiple Access</i>                        | Acesso Múltiplo Ortogonal                           |
| <b>OP</b>    | <i>Outage Probability</i>                                | Probabilidade de <i>Outage</i>                      |
| <b>PA</b>    | <i>Power Allocation</i>                                  | Alocação de Potência                                |
| <b>PF</b>    | <i>Proportional Fairness</i>                             | Igualdade Proporcional                              |
| <b>QPSK</b>  | <i>Quaternary Phase-Shift Keying</i>                     | Deslocamento da Fase Quaternário                    |
| <b>SDR</b>   | <i>Software Defined Network</i>                          | Rede Definida por Software                          |
| <b>SE</b>    | <i>Spectral Efficiency</i>                               | Eficiência Espectral                                |
| <b>SIC</b>   | <i>Successive Interference Cancellation</i>              | Cancelamento Sucessivo de Interferência             |
| <b>SINR</b>  | <i>Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio</i>           | Relação Sinal-Interferência mais Ruído              |
| <b>SISO</b>  | <i>Single-Input and Single-Output</i>                    | Única Entrada e Única Saída                         |
| <b>SLS</b>   | <i>System-level simulation</i>                           | Simulação de nível de Sistema                       |
| <b>SNR</b>   | <i>Signal-to-Noise Ratio</i>                             | Relação Sinal Ruído                                 |
| <b>TDMA</b>  | <i>Time Division Multiple Access</i>                     | Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo                |
| <b>TPA</b>   | <i>Transmit Power Allocation</i>                         | Alocação de Potência de Transmissão                 |
| <b>TTI</b>   | <i>Transmission Time Interval</i>                        | Intervalo de Transmissão                            |
| <b>UFCG</b>  | <i>Federal University of Campina Grande</i>              | Universidade Federal de Campina Grande              |
| <b>UPPA</b>  | <i>User Pairing and Power Allocation</i>                 | Pareamento de Usuários e Alocação de Potência       |



---

---

# Lista de Símbolos

---

|                |   |
|----------------|---|
| $A(.)$         | Atenuação da antena em função do ângulo de abertura                           |
| $A_m$          | Atenuação máxima da antena  |
| $C(.)$         | Capacidade do Canal Gaussiano   |
| $C_l$          | Célula de índice $l$  |
| $D_{somb}$     | Densidade do mapa de sombreamento   |
| $G_{ant,DISP}$ | Ganho da antena do dispositivo DISP   |
| $I_{l,k}$      | Interferência recebida pelo $k$ -ésimo usuários conectado à $l$ -ésima célula |
| $J$            | Número de usuários conectados   |
| $K$            | Número de usuários por sub-banda  |
| $L$            | Número de células no sistema  |
| $L_r$          | Modelo de perda de percurso para ambiente rural                               |
| $L_u$          | Modelo de perda de percurso para ambiente urbano                              |
| $M$            | Número de sub-bandas  |
| $N$            | Potência do ruído na sub-banda  |
| $N_f$          | Fator de ruído  |
| $N_i$          | Potência do ruído percebido pelo $i$ -ésimo usuário                           |
| $N_r$          | Fator de reuso  |
| $O(.)$         | Notação de complexidade computacional ( <i>big o</i> )                        |
| $P[.]$         | Probabilidade   |
| $P_h$          | Ganho do canal em pequena escala  |
| $P_n$          | Potência do ruído   |
| $P_p$          | Perda de propagação   |
| $P_r$          | Potência recebida   |
| $P_s$          | Potência do sinal   |
| $P_t$          | Potência total de transmissão por célula                                      |
| $P_{R,l,k}$    | Potência recebida da $l$ -ésima célula pelo $k$ -ésimo usuário                |
| $R$            | Raio de célula  |
| $R_i$          | Taxa máxima de transmissão alcançável pelo $i$ -ésimo usuário                 |
| $R_{N,k}$      | Taxa alcançável pelo $k$ -ésimo usuários em NOMA                              |

|                              |   |
|------------------------------|---|
| $R_{O,k}$                    | Taxa alcançável pelo $k$ -ésimo usuários em OMA                     |
| $S(f)$                       | Função de Densidade Espectral de Potência                           |
| $S_m$                        | Sub-banda de índice $m$   |
| $T_{N,k}$                    | Taxa obtida para o $k$ -ésimo usuário em NOMA pelo modelo de enlace |
| $T_{max}$                    | Taxa máxima do modelo de enlace                                     |
| $U_i$                        | Estação do usuário de índice $i$                                    |
| $W$                          | Largura de banda da célula  |
| $W_{SB}$                     | Largura da sub-banda  |
| $X_n$                        | Sinal destinado ao $n$ -ésimo usuário                               |
| $Y_n$                        | Sinal NOMA recebido pelo $n$ -ésimo usuário                         |
| $\Delta f$                   | Diferença de frequência   |
| $\Delta\gamma$               | Diferença de SINR   |
| $\alpha$                     | Valor do coeficiente de alocação de potência                        |
| $\bar{t}$                    | Média amostral da taxa de usuário                                   |
| $\beta$                      | Valor do coeficiente de alocação de banda                           |
| $\eta$                       | Eficiência espectral da célula                                      |
| $\eta_N$                     | Eficiência espectral da sub-banda em NOMA                           |
| $\eta_O$                     | Eficiência espectral da sub-banda em OMA                            |
| $\gamma_k$                   | SINR do $k$ -ésimo usuário  |
| $\lambda$                    | Velocidade da luz   |
| $E[.]$                       | Valor esperado da variável aleatória                                |
| $\mathbb{R}$                 | Conjunto dos números Reais  |
| $\mathbf{a}$                 | Vetor de coeficientes de alocação de potência                       |
| $\mathbf{I}$                 | Matriz identidade   |
| $\mathbf{L}$                 | Fator de Cholesky   |
| $\mathbf{R}$                 | Matriz de correlação  |
| $\text{Var}[.]$              | Variância da variável aleatória                                     |
| $\mathbf{v}$                 | Vetor de sombreamento descorrelacionado                             |
| $\mathcal{J}(\cdot)$         | Índice de justiça de Jain   |
| $\mathcal{N}(\mu, \sigma^2)$ | Distribuição normal com média $\mu$ e variância $\sigma^2$          |
| $\mathcal{T}(\cdot)$         | Função do modelo de enlace  |
| $\phi_k$                     | SINR NOMA para o $k$ -ésimo usuário                                 |
| $\rho_k$                     | Fração NOMA da SINR total para o $k$ -ésimo usuários                |
| $\sigma$                     | Desvio Padrão do Sombreamento                                       |
| $\theta$                     | Ângulo de abertura da antena  |
| $\theta_k$                   | SINR OMA para o $k$ -ésimo usuário                                  |
| $\theta_{3dB}$               | Ângulo do feixe de meia potência                                    |
| $a_k$                        | Coefficiente de alocação de potência do $k$ -ésimo usuários         |
| $a_t$                        | Fator de atenuação do modelo enlace                                 |

|                  |   |
|------------------|---|
| $bits/s$         | Taxa de transmissão de dados em $bits$ por segundo                        |
| $Mbps$           | Taxa de transmissão de dados em milhões de $bits$ por segundo             |
| $bits/s/Hz$      | Eficiência espectral  |
| $d$              | Distância entre ERB e EU  |
| $d_{cor}$        | Distância de correlação   |
| $f$              | Frequência  |
| $f_c$            | Frequência central da portadora   |
| $f_m$            | Frequência de deslocamento Doppler máxima                                 |
| $f_{N,k}(\cdot)$ | Função argumento da eficiência NOMA para o $k$ -ésimo usuário             |
| $f_{O,k}(\cdot)$ | Função argumento da eficiência OMA para o $k$ -ésimo usuário              |
| $h_b$            | Altura da ERB   |
| $h_d$            | Altura da ERB a partir do nível do telhado                                |
| $h_i$            | Ganho do canal entre a ERB e o $i$ -ésimo usuário                         |
| $k$              | Constante de Boltzmann  |
| $m$              | Número de pontos do modelo de desvanecimento na frequência                |
| $p_i$            | Potência de transmissão do usuário de índice $i$                          |
| $r(x)$           | Função de correlação do efeito de sombreamento                            |
| $r_{IS}$         | Correlação <i>inter-site</i>  |
| $\mathbf{s}$     | Matriz de sombreamento com elementos correlacionados                      |
| $s_i$            | Sinal transmitido para o usuário de índice $i$                            |
| $s_N(\cdot)$     | Função argumento da soma das taxas NOMA, por sub-banda                    |
| $s_O(\cdot)$     | Função argumento da soma das taxas OMA, por sub-banda                     |
| $t_{k,m}$        | Taxa individual do $k$ -ésimo usuário na $m$ -ésima sub-banda             |
| $u_i$            | Estação do usuário de índice $i$  |
| $v$              | Velocidade de usuários (EU)   |
| $w_i$            | Sinal de ruído branco gaussiano aditivo percebido pelo $i$ -ésimo usuário |
| $x$              | Distância no mapa de sombreamento   |

---

---

# Lista de Figuras

---

|      |   |    |
|------|---|----|
| 2.1  | Espectro FDMA. . . . .  | 7  |
| 2.2  | Quadro TDMA. . . . .  | 7  |
| 2.3  | Representação do espectro de sinais OFDMA. . . . .  | 9  |
| 2.4  | Espectro de potência NOMA dos sinais transmitidos. . . . .                                    | 10 |
| 2.5  | Decodificação do sinal no receptor baseada em SIC. . . . .                                    | 10 |
| 2.6  | ERB transmitindo com NOMA. . . . .  | 11 |
| 2.7  | Diagrama de Constelação para NOMA. . . . .  | 12 |
| 2.8  | Espectro de potência NOMA <i>versus</i> OMA. . . . .  | 13 |
| 2.9  | Região de capacidade NOMA <i>versus</i> OMA para usuários com a mesma SNR. . . . .            | 14 |
| 2.10 | Região de capacidade NOMA <i>versus</i> OMA para usuários com diferentes SNR. . . . .         | 14 |
| 3.1  | Comportamento dos argumentos das funções de capacidade. . . . .                               | 23 |
| 3.2  | Argumentos das funções de eficiência espectral por sub-banda. . . . .                         | 24 |
| 3.3  | Região de ganho NOMA em função de $\alpha$ . . . . .  | 26 |
| 3.4  | Estratégia de pareamento. . . . .   | 29 |
| 4.1  | Relação entre o tempo de execução e a complexidade do modelo de simulação [27]. . . . .       | 31 |
| 4.2  | Configuração de 19 <i>sites</i> com três setores. . . . .                                     | 33 |
| 4.3  | Relação de medidas de <i>sites</i> e células. . . . .   | 33 |
| 4.4  | Padrão de radiação horizontal de cada setor da ERB. . . . .                                   | 34 |
| 4.5  | Perda de percurso para diferentes cenários. . . . .   | 37 |
| 4.6  | Intensidade da perda na região de um setor da ERB, modelo Urbano ( $f_c = 2000$ MHz). . . . . | 38 |
| 4.7  | Mapa de sombreamento na região de cobertura total da rede ( $\sigma = 10$ dB). . . . .        | 40 |
| 4.8  | Sombreamento na região central do mapa ampliado. . . . .                                      | 40 |
| 4.9  | Adição gradual do efeito de sombreamento ( $\sigma = 10$ dB). . . . .                         | 41 |
| 4.10 | Modelo do canal com desvanecimento Rayleigh ( $DS_{max} = 9.27$ Hz). . . . .                  | 44 |
| 4.11 | Esquema de reuso de frequência. . . . .   | 45 |
| 4.12 | Usuários distribuídos em diferentes tipos de região. . . . .                                  | 46 |



---

|  |    |
|--|----|
| 4.13 Modelos considerados para a conexão dos EUs, 342 distribuídos no área de cobertura. . . . .                           | 48 |
| 4.14 Modelo de enlace para SLS baseado em AMC. . . . .   | 50 |
| 4.15 Sistemas com diferentes números de usuários conectados. . . . .   | 52 |
| 5.1 Função Cumulativa de Probabilidade Complementar da taxa média por usuário para 6 EU por células. . . . .               | 54 |
| 5.2 Taxas e eficiência espectral na borda da célula em NOMA e OMA. . . . .   | 56 |
| 5.3 Taxas e eficiência espectral média em NOMA e OMA. . . . .  | 56 |
| 5.4 Taxas e eficiência espectral próximo da ERB em NOMA e OMA. . . . .   | 57 |
| 5.5 Índice de justiça entre os usuários em NOMA e OMA. . . . .   | 57 |
| 5.6 Taxas e Eficiência Espectral na borda da célula com diferentes métodos de pareamento. . . . .                          | 58 |
| 5.7 Taxas e eficiência espectral média com diferentes métodos de pareamento. . . . .                                       | 59 |
| 5.8 Taxas e eficiência espectral próximo à ERB com diferentes métodos de pareamento. . . . .                               | 59 |
| 5.9 Índice de justiça de Jain para diferentes métodos de pareamento. . . . .   | 60 |
| 5.10 Taxas e eficiência espectral dos usuários na borda da célula para diferentes métodos de alocação de potência. . . . . | 61 |
| 5.11 Taxas médias e eficiência espectral para diferentes métodos de alocação de potência. . . . .                          | 61 |
| 5.12 Taxas dos usuários próximos da ERB para diferentes métodos de alocação de potência. . . . .                           | 62 |
| 5.13 Índice de justiça de Jain para diferentes métodos de alocação de potência. . . . .                                    | 62 |
| 5.14 Desempenho das técnicas de acesso múltiplo em função da potência de transmissão da ERB. . . . .                       | 64 |

---

---

## Lista de Tabelas

---

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 4.1 | Ganho e altura das antena da ERB em diferentes cenários [31]. . . . . | 35 |
| 4.2 | Modelos de Propagação. . . . .  | 36 |
| 4.3 | MCL entre ERB e EU. . . . .   | 37 |
| 4.4 | Parâmetros do modelo de sombreamento. . . . .                         | 39 |
| 4.5 | Parâmetros da função L2S. . . . .                                     | 49 |
| 4.6 | Modelo MCS para LTE ( <i>downlink</i> ) [36]. . . . .                 | 49 |
| 4.7 | Parâmetros de simulação. . . . .                                      | 51 |

---

---

# Sumário

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introdução</b>  | <b>2</b>  |
| 1.1      | Objetivo . . . . .   | 3         |
| 1.1.1    | Objetivo Geral . . . . .   | 3         |
| 1.1.2    | Objetivos Específicos . . . . .                                  | 4         |
| 1.2      | Organização do Texto . . . . .                                   | 4         |
| <b>2</b> | <b>Acesso Múltiplo Não Ortogonal</b>                             | <b>6</b>  |
| 2.1      | Técnicas de Acesso Múltiplo . . . . .                            | 6         |
| 2.2      | Acesso Múltiplo Não Ortogonal . . . . .                          | 9         |
| 2.2.1    | Cancelamento Sucessivo de Interferência . . . . .                | 9         |
| 2.2.2    | Princípio NOMA para <i>downlink</i> . . . . .                    | 11        |
| 2.2.3    | Comparação com Acesso Múltiplo Ortogonal . . . . .               | 13        |
| 2.3      | Pareamento dos Usuários e Alocação de Potência em NOMA . . . . . | 15        |
| 2.3.1    | Trabalhos Relacionados . . . . .                                 | 15        |
| <b>3</b> | <b>Pareamento de Usuários e Alocação de Potência em NOMA</b>     | <b>19</b> |
| 3.1      | Descrição do Sistema NOMA . . . . .                              | 19        |
| 3.2      | Capacidade e Eficiência do Sistema NOMA . . . . .                | 21        |
| 3.3      | Ganho NOMA . . . . .   | 23        |
| 3.4      | Escolha do Coeficiente $\alpha$ . . . . .                        | 27        |
| 3.5      | Escolha dos Pares . . . . .                                      | 28        |
| 3.5.1    | Algoritmo UPPA . . . . .   | 30        |
| <b>4</b> | <b>Simulação Computacional</b>                                   | <b>31</b> |
| 4.1      | Modelo de Rede . . . . .   | 32        |
| 4.2      | Dispositivos . . . . .   | 34        |
| 4.2.1    | Estação Radiobase . . . . .                                      | 34        |
| 4.2.2    | Equipamento do Usuário . . . . .                                 | 35        |
| 4.3      | Modelo de Enlace . . . . .                                       | 35        |
| 4.3.1    | Perdas em Macroescala . . . . .                                  | 35        |

---

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| 4.3.2    | Desvanecimento em Pequena Escala . . . . .               | 42        |
| 4.4      | Ruído de Fundo e Interferência . . . . .                 | 43        |
| 4.5      | Reuso de Frequência . . . . .                            | 45        |
| 4.6      | Distribuição Espacial dos EUs . . . . .                  | 45        |
| 4.7      | Conexão do EU com a ERB . . . . .                        | 47        |
| 4.8      | Modelo de Tráfego . . . . .                              | 47        |
| 4.9      | Modelo de Enlace para Sistema . . . . .                  | 48        |
| 4.10     | Fluxo da Simulação . . . . .                             | 50        |
| <b>5</b> | <b>Resultados</b>  | <b>53</b> |
| 5.1      | Métricas de Avaliação da Capacidade do Sistema . . . . . | 53        |
| 5.2      | Métrica de Avaliação de Justiça . . . . .                | 54        |
| 5.3      | Comparação de Desempenho entre OMA e NOMA . . . . .      | 55        |
| 5.4      | Métodos de Pareamento . . . . .                          | 58        |
| 5.5      | Alocação de Potência . . . . .                           | 60        |
| 5.6      | Potência de Transmissão da ERB . . . . .                 | 62        |
| <b>6</b> | <b>Conclusão</b>   | <b>65</b> |
| 6.1      | Trabalhos Futuros . . . . .                              | 66        |
| 6.2      | Publicações . . . . .                                    | 66        |
| 6.2.1    | Trabalhos Apresentados . . . . .                         | 66        |
| 6.2.2    | Trabalho Aprovado para Workshop . . . . .                | 67        |
|          | <b>Referências Bibliográficas</b>                        | <b>71</b> |

## CAPÍTULO 1

---

# Introdução

---

Nos últimos anos, um novo cenário tem se configurado no âmbito dos serviços de comunicações móveis. A chegada gradual da Internet das Coisas (*Internet of Things – IoT*) tem aumentado o número de usuários e dispositivos conectados à Internet. Além disso, um número maior de serviços passou a ser oferecidos pela Internet e outros que já existiam passaram a consumir mais dados. Conseqüentemente, a demanda por acesso móvel à Internet tem crescido significativamente. Para atender a essa demanda crescente, uma nova geração de comunicação móvel vem sendo estudada e deve ter um padrão definido até 2020, será a Quinta Geração ou 5G.

O novo padrão 5G deve buscar alcançar alta capacidade, alta taxa de dados, baixa latência fim a fim, conexão massiva de dispositivos, redução de custos e redução de consumo de energia. O objetivo é fornecer conectividade a qualquer um, qualquer coisa, em qualquer lugar, a qualquer momento e de qualquer forma [1].

De forma mais específica, quando comparada à geração atual, a próxima geração deve suportar um aumento de: 1000 vezes na capacidade do sistema; 1000 vezes o volume de dados por área; de 10 a 100 vezes a taxa de dados; de 10 a 100 vezes o número de conexões massivas e 10 vezes o tempo de vida da bateria. Além disso, espera-se reduzir a latência em cinco vezes e produzir novos equipamentos com custo sustentável [2].

Novas tecnologias já estão em pesquisa para resolver os problemas dos requisitos atribuídos ao 5G, como sistemas de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas Massivas (*massive Multiple-Input and Multiple-Output – massive MIMO*), comunicação por ondas milimétricas (*millimeter wave*), comunicação dispositivo-a-dispositivo (*Device-to-Device – D2D*), Células Pequenas e Ultradensas, Rádio Cognitivo (*Cognitive Radio – CR*), Redes Definidas por Software (*Software Defined Network – SDR*) e Acesso Múltiplo Não Ortogonal (*Non-Orthogonal Multiple Access – NOMA*) [2]. As técnicas NOMA permitem utilizar domínios adicionais para multiplexar usuários e aumentar a capacidade do canal de comunicação. Essa dissertação aborda NOMA no domínio da potência.

O princípio da técnica NOMA abordada consiste em transmitir mensagens sobrepostas no domínio da potência para múltiplos usuários, aproveitando de forma oportunista a diferença das condições de canal experimentada pelos usuários dentro de uma célula, para aumentar a região de capacidade do canal [3]. Para recuperar a mensagem, o receptor deve utilizar Cancelamento Sucessivo de Interferência (*Successive Interference Cancellation* – SIC).

A técnica NOMA pode proporcionar um aumento da capacidade real com poucas alterações nos sistemas existentes, pois NOMA não exige alocação de novas faixas do espectro e nem mudanças disruptivas nos sistemas existentes. Além disso, o processamento de sinal que deve ser realizado em NOMA pode ser implementado em software, o que implica em mudanças de pequeno impacto e baixo custo nos dispositivos dos usuários [4].

A eficiência da técnica NOMA depende da diferença do ganho de canal entre os usuários que devem ser emparelhados, além de que o nível de potência alocado para cada usuário individualmente reflete na taxa de dados de todos os usuários pareados [5]. Dessa forma, é importante estudar métodos para formar os pares de usuários em NOMA, assim como deve-se investigar estratégias para distribuir a potência entre os usuários.

O problema abordado consiste em encontrar, dentro do conjunto de usuários conectados em uma célula, a combinação de pares de usuários em NOMA que ofereça aumento da capacidade total da célula, ao mesmo tempo que todos os pares experimentem oportunidades de ganho semelhantes. Além disso, deve-se buscar meios de alocar potência para os usuários de forma a garantir que o usuário com pior condição de canal receba a informação mínima necessária, enquanto o usuário com melhor condição de canal possa receber, além da informação mínima, alguma informação adicional.

Para aumentar a região de capacidade do sistema, deve-se parear usuários com ganhos de canais diferentes, quanto maior essa diferença, maior é o ganho de taxa alcançável em NOMA [6]. Este trabalho avalia métodos de Pareamento de Usuários e Alocação de Potência (*User Pairing and Power Allocation* – UPPA) que ofereçam ganho de desempenho e justiça na alocação de recursos.

## 1.1 Objetivo

### 1.1.1 Objetivo Geral

O trabalho de dissertação tem como objetivo geral, propor e avaliar um método de pareamento de usuários e alocação de potência em NOMA, de baixa complexidade computacional, que promova o aumento da capacidade de um sistema de comunicação móvel, quando comparado com o Acesso Múltiplo Ortogonal (*Orthogonal Multiple Access* – OMA), e que ofereça oportunidades justas de ganho para os usuários.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho de dissertação são:

- Avaliar analiticamente o desempenho de um sistema NOMA no domínio da potência, comparando-o com um sistema OMA;
- Estudar a influência do método de pareamento de usuários e da escolha do coeficiente de alocação de potência no desempenho do sistema NOMA;
- Estabelecer critérios de justiça para o pareamento de usuários e para a alocação de potência;
- Propor métodos de UPPA que garantam ganho de desempenho e justiça para os usuários NOMA;
- Implementar um simulador computacional de nível de sistemas (*system level simulation*) para avaliar o desempenho de sistemas celulares NOMA;
- Simular a comunicação do enlace de descida utilizando OMA e NOMA para diferentes métodos de UPPA, variando o número usuários;
- Simular a comunicação do enlace de descida utilizando OMA e NOMA para diferentes métodos de UPPA, variando a potência de transmissão da ERB;
- Avaliar os resultados obtidos pelas simulações em termos de eficiência espectral e justiça na alocação de recursos.

## 1.2 Organização do Texto

Este capítulo apresenta uma introdução ao tema estudado e os objetivos do trabalho. O restante do texto está organizando como segue:

- O Capítulo 2 apresenta os principais fundamentos sobre técnicas de acesso múltiplo convencionais e NOMA no domínio da potência. É apresentada também a técnica SIC para decodificação na recepção de sinais sobrepostos. Ao final do capítulo, são apresentados e discutidos os resultados e contribuições recentes de trabalhos relacionados ao tema;
- No Capítulo 3 é realizada uma avaliação analítica do desempenho de sistemas NOMA, identificando a influência dos métodos de UPPA e comparando com o desempenho da técnica OMA no domínio da frequência. Além disso, é proposto um critério de justiça para alocação de recursos entre usuários NOMA, e a partir desse critério, é calculado o coeficiente de alocação de potência e proposto um algoritmo de UPPA;

- 
- O Capítulo 4 descreve o simulador de nível de sistema implementado para avaliar numericamente a técnica NOMA. Todos os modelos considerados são apresentados juntamente com os parâmetros de simulação utilizados para obter os resultados;
  - O Capítulo 5 apresenta e discute os resultados obtidos a partir das simulações.
  - Por fim, as conclusões são apresentadas no Capítulo 6, apontando as principais contribuições do trabalho e apresentando caminhos para trabalhos futuros.



## CAPÍTULO 2

---

# Acesso Múltiplo Não Ortogonal

---

Em sistemas de comunicações sem fio, as informações são transmitidas em faixas do espectro de radiofrequência de largura finita. Por ser um recurso limitado, o espectro deve ser compartilhado por múltiplos usuários sempre que for necessário aumentar a capacidade do sistema. Entretanto, há um compromisso inverso entre o número de usuários que compartilham o meio de comunicação e a capacidade do canal alocado para cada usuário. Dessa forma, quanto maior o número de usuários que utilizam simultaneamente a mesma faixa do espectro, menor é a capacidade do canal individual de cada usuário.

Ao longo da evolução dos sistemas de comunicações sem fio, foram desenvolvidas técnicas de acesso múltiplo ao meio. Essas técnicas visam aumentar a capacidade dos sistemas em números de usuários, sem prejudicar severamente a qualidade da comunicação individual. Além disso, o compartilhamento do meio possibilita melhor aproveitamento do canal de comunicação, aumentando a eficiência do sistema. As técnicas de acesso múltiplo podem explorar o compartilhamento do espectro no domínio da frequência, tempo, espaço, código, potência e polarização.

## 2.1 Técnicas de Acesso Múltiplo

As técnicas de acesso múltiplo são largamente utilizadas em sistemas de comunicações móveis celulares, onde os usuários precisam compartilhar a mesma faixa do espectro dentro de uma área determinada pela cobertura da célula. Os primeiros sistemas de comunicação celular (Primeira Geração – 1G) utilizavam Acesso Múltiplo por Divisão em Frequência (*Frequency Division Multiple Access* – FDMA) [7].

Nos sistemas celulares uma faixa do espectro é atribuída para cada célula, de forma que essas faixas de frequência possam ser reutilizadas em outras células a uma determinada distância. No FDMA o espectro dentro das células é subdividido em canais de frequência exclusivos, que por sua vez são atribuídos individualmente para cada usuário. Assim, múl-

tiplos usuários podem trocar mensagens com a Estação Radiobase (ERB) utilizando canais separados no domínio da frequência [8], como é ilustrado na Figura 2.1.

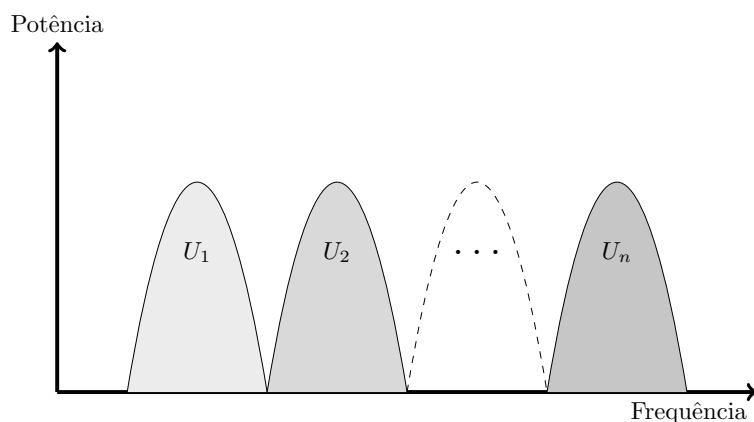


Figura 2.1: Espectro FDMA.

Com o aumento do número de usuários, outras técnicas de acesso múltiplo foram desenvolvidas visando aumentar a capacidade dos sistemas. Na segunda geração de comunicação móvel (2G) foi introduzido o Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo (*Time Division Multiple Access* – TDMA) [7].

Nos sistemas TDMA, múltiplos usuários são alocados em um mesmo quadro (*frame*) TDMA, cada usuário dentro de um quadro pode realizar uma transmissão dentro de um pequeno intervalo de tempo chamado de *time slot*. A Figura 2.2 exibe um quadro TDMA com  $n$  usuários. Embora nos sistemas TDMA o múltiplo acesso aconteça no domínio do tempo, ainda é preservada a divisão de canais em frequência, porém com maior largura de banda quando comparado com os sistemas FDMA [8].

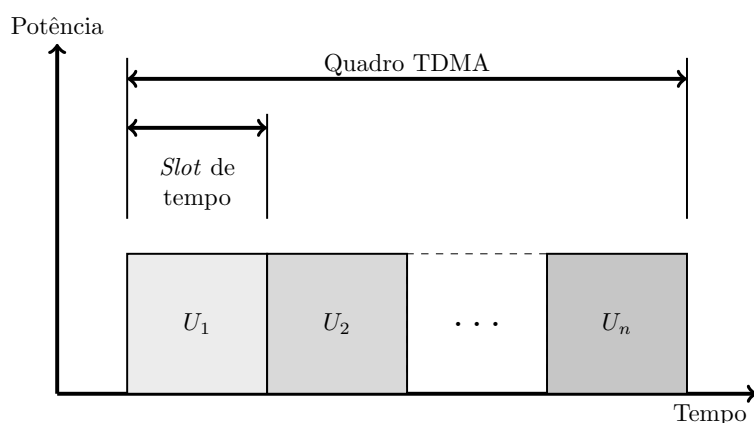


Figura 2.2: Quadro TDMA.

O Acesso Múltiplo por Divisão de Código (*Code Division Multiple Access* – CDMA) é outra técnica utilizada nos sistemas celulares 2G. O CDMA utiliza a técnica de espalhamento espectral e códigos ortogonais. O sinal modulado de banda estreita é espalhado na frequência ao ser multiplicado por um sinal de espalhamento, que varia mais rapidamente do que

os símbolos do sinal original modulado. Além disso, são utilizados códigos ortogonais, de forma que os usuários tenham seus sinais descorrelacionados, permitindo que cada receptor recupere o sinal desejado por correlação e trate os demais como ruído. No CDMA os sinais de diferentes usuários são transmitidos espalhados no mesmo canal de frequência [7], o que aumenta a tolerância ao desvanecimento seletivo.

O CDMA aumenta a eficiência do sistema de comunicação, pois não há atribuição fixa de recursos a um usuário específico. Além disso, o sistema CDMA tem maior flexibilidade quando comparado com o FDMA e TDMA, pois não há um limite fixo de usuários. O número de usuários é limitado pelo requisito de qualidade do sinal desejado. À medida que o número de usuários aumenta, o nível absoluto de ruído aumenta, o que reduz a relação sinal ruído (*Signal-to-Noise Ratio* – SNR) e conseqüentemente degrada a qualidade da transmissão [8].

Em sistemas celulares CDMA, a diferença de ganho do canal entre os usuários e a ERB ocasiona um problema conhecido como perto-distante (*near-far*), que ocorre devido ao sinal dos usuários mais próximos da ERB contribuírem com o aumento do nível de ruído para os usuários mais distantes da ERB. Para contornar tal problema, cada usuário controla o nível de potência de transmissão de forma que os sinais recebidos pela ERB, a partir de qualquer usuário na célula, tenham aproximadamente o mesmo nível de potência.

Devido às vantagens da técnica de múltiplo acesso no domínio de códigos ortogonais, o princípio do CDMA serviu como base para o desenvolvimento do CDMA de Banda Larga (*Wideband-CDMA* – W-CDMA), que é a principal tecnologia utilizada em sistemas de Terceira Geração (3G).

Atualmente, o sistema de comunicações de Quarta Geração (4G), definido pelos padrões de Evolução de Longo Prazo (*Long Term Evolution* – LTE) e LTE Avançado (LTE-*Advanced* – LTE)-A, utilizam Acesso Múltiplo por Divisão de Frequência Ortogonal (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access* – OFDMA) para *downlink*, ou seja, para a transmissão da ERB para os dispositivos móveis. Diferente do FDMA que utiliza uma portadora por usuário, o OFDMA utiliza múltiplas portadoras ortogonais para transmitir paralelamente a informação dos usuários. Dessa forma, um fluxo serial de alta taxa de dados pode ser transmitido como vários fluxos paralelos com taxas de dados reduzidas [9]. Isso torna o sinal resistente a problemas como desvanecimento de multipercurso e interferência intersimbólica. Além do LTE, outras tecnologias de comunicação sem fio como o IEEE802.11 (Wi-Fi) e IEEE802.16 (WiMAX) utilizam o OFDMA. A Figura 2.3 mostra uma representação do espectro das múltiplas portadoras de um sistema OFDMA.

Para a próxima geração de comunicações móveis (5G), deve-se implementar métodos de múltiplo acesso que atendam aos requisitos de altas taxas de dados e células ultra-densas [2]. Estudos recentes propõem explorar o domínio da potência para aumentar a capacidade dos sistemas de comunicações móveis por meio de acesso múltiplo não ortogonal [3, 4]. Essa ideia é apresentada e discutida na próxima seção.

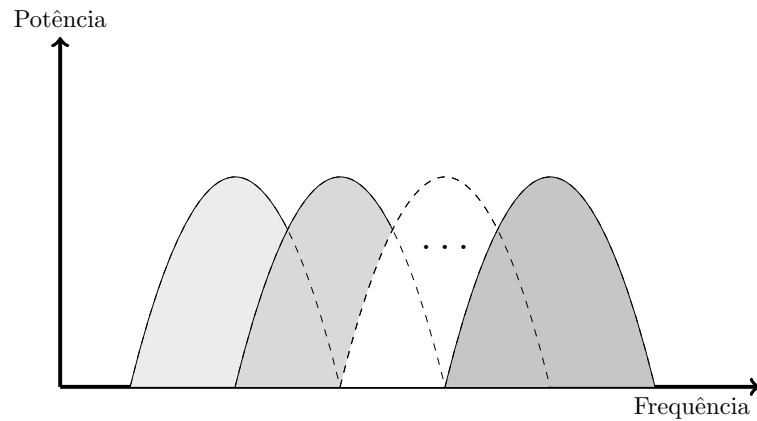


Figura 2.3: Representação do espectro de sinais OFDMA.

## 2.2 Acesso Múltiplo Não Ortogonal

Acesso múltiplo não ortogonal ou NOMA no domínio da potência é uma técnica que explora como domínio adicional a potência para permitir que múltiplos usuários compartilhem o meio. Essa técnica se baseia em sobrepor os sinais transmitidos simultaneamente por dois ou mais usuários, no mesmo canal de frequência, utilizando diferentes níveis de potência, de forma que os receptores possam detectar os sinais corretamente aplicando SIC.

### 2.2.1 Cancelamento Sucessivo de Interferência

O cancelamento sucessivo de interferência é uma técnica que permite separar sinais que estão sobrepostos no domínio da potência. O sucesso da técnica SIC depende da diferença dos níveis de potências dos sinais que estão sobrepostos. A detecção com SIC pode ser explicada considerando o sinal ilustrado na Figura 2.4, composto da sobreposição de  $n$  sinais com diferentes níveis de potência.

O sinal  $Y_n$  resultante é dado por

$$Y_n = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n, \quad (2.1)$$

em que, cada sinal  $X_i$  tem potência  $P_i$ , e  $P_i < P_{i+1}$  para  $i \in \{1, 2, \dots, n-1\}$ . Dado que o  $n$ -ésimo sinal possui o maior nível de potência  $P_n$ , o sinal  $X_n$  pode ser recuperado desde que os outros sinais de menor potência sejam tratados como ruído de fundo no receptor interessado em  $X_n$ .

Considerando que o sinal  $X_n$  possa ser recuperado e decodificado com sucesso, o sinal  $X_{n-1}$  pode ser recuperado aplicando o mesmo método anterior ao sinal  $Y_{n-1} = Y_n - X_n = X_1 + X_2 + \dots + X_{n-1}$ , como mostra a Figura 2.5. Nesse caso, o receptor interessado em  $X_{n-1}$  deve ser capaz de decodificar também  $X_n$  [4].

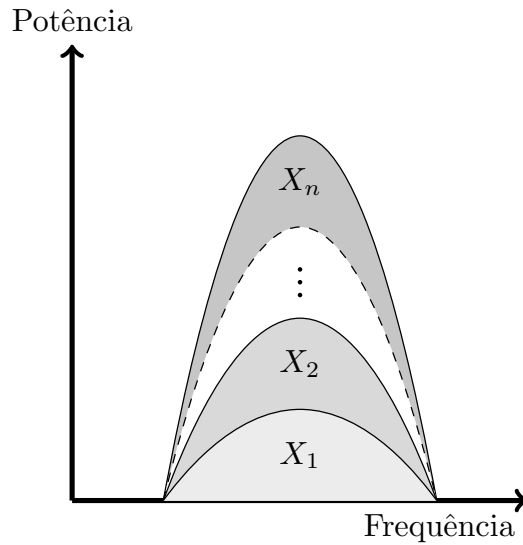


Figura 2.4: Espectro de potência NOMA dos sinais transmitidos.

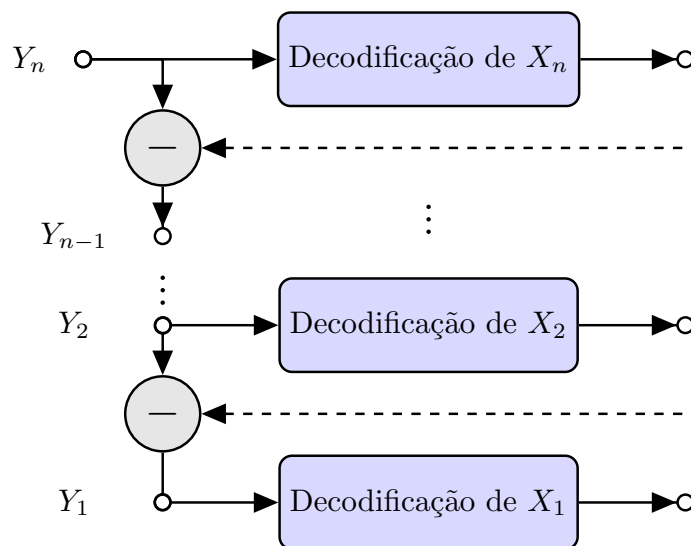


Figura 2.5: Decodificação do sinal no receptor baseada em SIC.

O cancelamento da interferência de um sinal sobre o outro pode ser aplicado sucessivamente até que todos os  $n$  sinais sejam recuperados. Entretanto, essa técnica pode exigir grande esforço computacional, e o atraso de processamento é algo indesejável em sistemas de comunicações. A troca de mensagens deve fluir com baixa latência, uma vez que os atrasos na entrega das mensagens podem inviabilizar uma comunicação síncrona como uma conversa de voz. Nos últimos anos, o uso da técnica SIC em comunicações tem se mostrado viável devido ao aumento da capacidade de processamento dos computadores e dispositivos móveis.

Deve-se destacar, que a técnica SIC quando aplicada a sistemas de comunicações pode introduzir um problema de segurança da informação, pois para que um receptor possa

recuperar um determinado sinal, ele deve ser capaz de decodificar todos os sinais de maior potência destinados a outros usuários e então realizar o cancelamento da interferência.

## 2.2.2 Princípio NOMA para *downlink*

Em sistemas celulares, a comunicação no sentido da ERB para o equipamento de usuário (EU) é chamada de enlace de descida ou *downlink*, enquanto que a transmissão dos usuários móveis para a ERB é denominada de enlace de subida, ou *uplink*. O *downlink* de um sistema de comunicação móvel utilizando NOMA como técnica de acesso múltiplo corresponde ao modelo do canal de *broadcast* em Teoria da Informação [10]. Nesse modelo de canal, há apenas um transmissor enviando a mesma mensagem ou mensagens independentes para dois ou mais usuários.

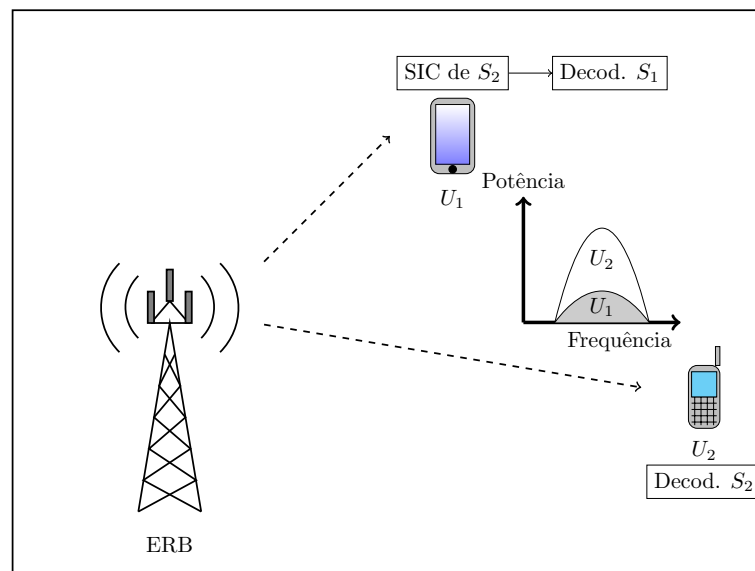


Figura 2.6: ERB transmitindo com NOMA.

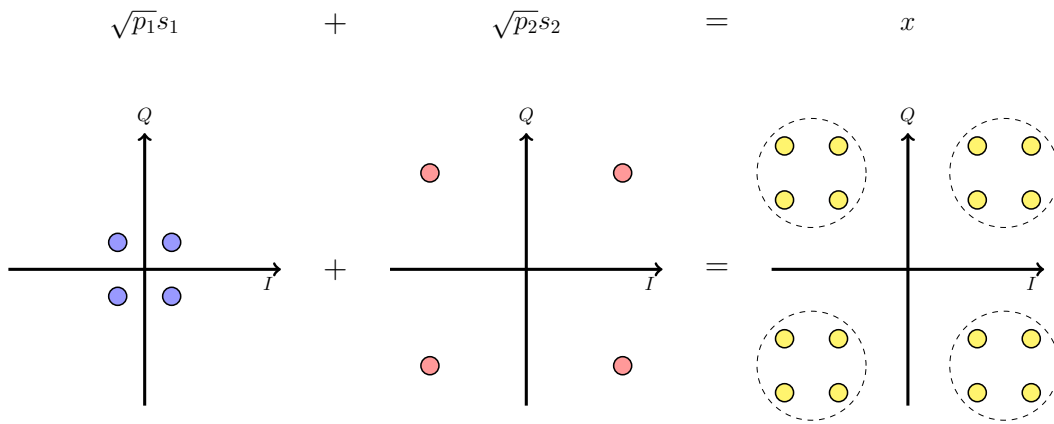
No cenário apresentado na Figura 2.6, uma ERB deseja enviar mensagens independentes para dois usuários móveis  $U_1$  e  $U_2$ , com taxas de transmissão iguais a  $R_1$  e  $R_2$ , respectivamente. Deve-se garantir que o usuário com piores condições de canal ( $U_2$ ) receba pelo menos o mínimo de informação, ao mesmo tempo que o usuário com o melhor canal ( $U_1$ ) deve ser capaz de receber alguma informação extra [11]. Considerando a capacidade do canal gaussiano para apenas um usuário, dada por  $C(x) = \frac{1}{2} \log_2(1 + x)$ , a região de capacidade NOMA pode ser expressa por

$$R_1 < C\left(\frac{\alpha P_t}{N_1}\right) \quad \text{e} \quad R_2 < C\left(\frac{(1-\alpha)P_t}{\alpha P_t + N_2}\right), \quad (2.2)$$

em que  $R_1$  e  $R_2$  são, respectivamente, as taxas de dados de  $U_1$  e  $U_2$  e  $P_t$  é a potência máxima de transmissão da ERB. As potências do ruído aditivo gaussiano experimentado por  $U_1$  e  $U_2$  são dadas por  $N_1$  e  $N_2$ , respectivamente. O coeficiente  $\alpha$  é um parâmetro de troca que

pode ser ajustado ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) para variar a taxas  $R_1$  e  $R_2$ , de forma que a potência total de transmissão permaneça constante [11].

Em NOMA os usuários são multiplexados no domínio da potência, de forma que as mensagens direcionadas individualmente para cada usuário são transmitidas sobrepostas com níveis específicos de potência. Considerando ainda o cenário da Figura 2.6, em que a ERB transmite os sinais  $s_1$  e  $s_2$  para os usuários  $U_1$  e  $U_2$ , respectivamente. Esse sinais são somados para compor o sinal NOMA a ser transmitido. Essa operação é ilustrada na Figura 2.7 pelo diagrama de constelação de sinais com modulação por deslocamento de fase quaternário (*Quaternary Phase-Shift Keying – QPSK*).



**Figura 2.7:** Diagrama de Constelação para NOMA.

Considerando apenas dois usuários, o sinal a ser transmitido com NOMA é expresso por

$$x = \sqrt{p_1}s_1 + \sqrt{p_2}s_2, \quad (2.3)$$

em que  $p_1$  e  $p_2$  são os níveis de potência alocados para  $U_1$  e  $U_2$ , respectivamente. A potência total é  $P_t = p_1 + p_2$  e  $E[|s_i|^2] = 1$ . Dessa forma, o sinal recebido por cada usuário é

$$\begin{aligned} y_i &= h_i x + w_i \\ &= h_i \sum_{k=1}^2 \sqrt{p_k} s_k + w_i, \quad i \in \{1, 2\}. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Na Expressão 2.4,  $h_i$  é o ganho do canal entre a ERB e o  $i$ -ésimo usuário  $U_i$ , e  $w_i$  é o ruído aditivo gaussiano experimentado pelo usuário  $U_i$ , com nível médio nulo e variância igual a  $N_i$  ( $w_i \sim \mathcal{N}(0, N_i)$ ).

Dado que  $|h_1|^2 > |h_2|^2$ , deve-se garantir que a potência de transmissão alocada para o sinal  $s_2$  seja maior do que a potência alocada para o sinal  $s_1$  ( $p_1 \leq p_2$ ), para que assim, ambos os usuários  $U_1$  e  $U_2$  recebam, pelo menos,  $s_2$ . O sinal  $s_1$  deve ser enviado como

informação adicional a ser recuperada por  $U_1$  aplicando SIC. As potências alocadas para os usuários podem ser escritas em função do coeficiente  $\alpha$  e  $P_t$ , como

$$\left. \begin{aligned} p_1 &= \alpha P_t \\ p_2 &= (1 - \alpha) P_t \end{aligned} \right\}, \quad 0 \leq \alpha \leq 1. \quad (2.5)$$

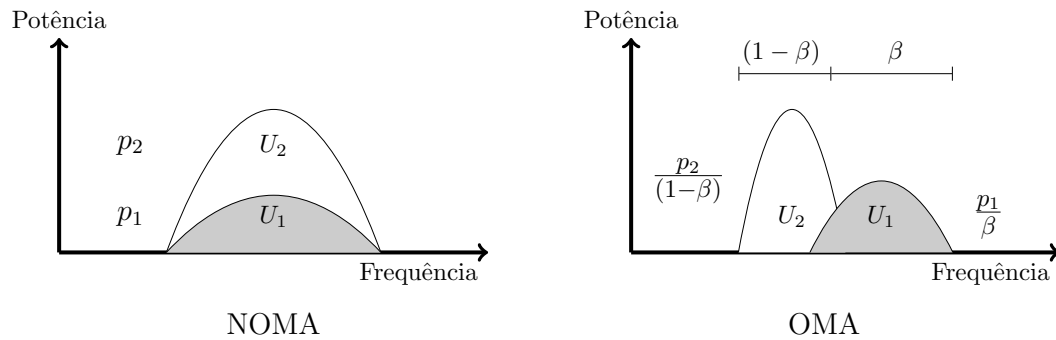
As taxas alcançáveis em NOMA podem ser obtidas a partir da capacidade do canal gaussiano de tempo discreto e largura de banda limitada. Para o *downlink* de um sistema celular com dois usuários móveis em NOMA e largura de banda de 1 Hz, as taxas dos usuários  $U_1$  e  $U_2$  são, respectivamente,

$$R_1 = \log_2 \left( 1 + \frac{\alpha P_t |h_1|^2}{N_1} \right) \quad \text{e} \quad (2.6)$$

$$R_2 = \log_2 \left( 1 + \frac{(1 - \alpha) P_t |h_2|^2}{\alpha P_t |h_2|^2 + N_2} \right). \quad (2.7)$$

### 2.2.3 Comparação com Acesso Múltiplo Ortogonal

A fim de ilustrar as vantagens da técnica NOMA, pode-se comparar as taxas alcançáveis para dois usuários no canal de *downlink* utilizando NOMA no domínio da potência e OMA na frequência. Para realizar uma comparação justa das duas técnicas, a largura de banda considerada é 1 Hz e a potência de transmissão total é  $P_t = p_1 + p_2$ , para ambos os casos, como é ilustrado na Figura 2.8.



**Figura 2.8:** Espectro de potência NOMA versus OMA.

O parâmetro  $\beta$  que aparece na Figura 2.8 é um coeficiente de alocação de banda que determina a proporção do canal de frequência que cada usuário pode utilizar em OMA. As taxas teóricas alcançáveis por cada usuário em OMA são

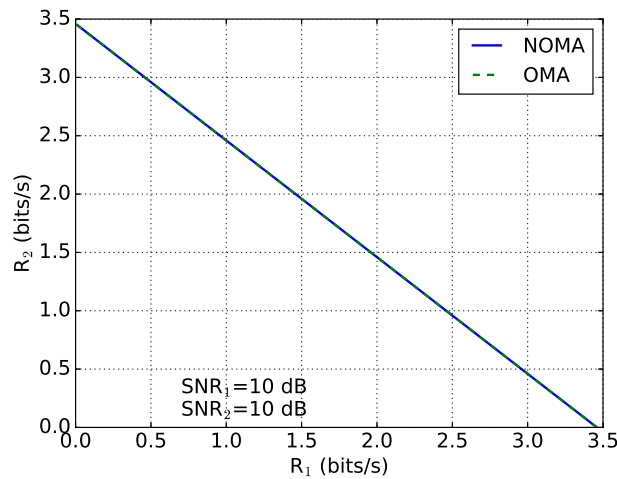
$$R_1 = \beta \log_2 \left( 1 + \frac{p_1 |h_1|^2}{\beta N_1} \right), \quad (2.8)$$



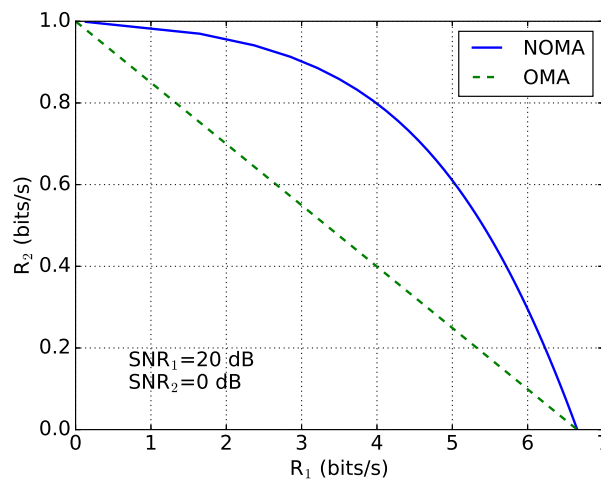
$$R_2 = (1 - \beta) \log_2 \left( 1 + \frac{p_2 |h_2|^2}{(1 - \beta) N_2} \right). \quad (2.9)$$

No caso em que ambos os usuários experimentam a mesma SNR, e a largura de banda é igualmente distribuída entre os usuários ( $\beta = 0.5$ ), a região de capacidade teórica das técnicas NOMA e OMA são iguais, mostrando que ambas as técnicas de múltiplo acesso permitem os usuários alcançarem taxas semelhantes [6]. Esse comportamento pode ser verificado no exemplo exibido pela Figura 2.9, em que usuários tem  $\text{SNR}_1 = \text{SNR}_2 = 10$  dB.

Entretanto, os benefícios oferecidos por NOMA aparecem em cenários nos quais há diferenças de ganho de canal entre os usuários. A Figura 2.10 compara a região de capacidade em NOMA e em OMA, considerando canais com diferentes ganhos ( $|h_i|^2$ ), em que  $U_1$  tem  $\text{SNR}_1 = 20$  dB e  $U_2$  tem  $\text{SNR}_2 = 0$  dB. Nesse caso, é possível notar que NOMA apresenta taxas alcançáveis maiores para ambos os usuários quando comparado com OMA.



**Figura 2.9:** Região de capacidade NOMA *versus* OMA para usuários com a mesma SNR.



**Figura 2.10:** Região de capacidade NOMA *versus* OMA para usuários com diferentes SNR.

Dado que a técnica NOMA consegue aproveitar as diferenças de ganho de canal entre os usuários para aumentar a região de capacidade do canal compartilhado, essa técnica se torna uma proposta atrativa para alcançar os requisitos estabelecidos para o 5G, principalmente, devido às grandes variações de canal que ocorrem em sistemas de comunicações móveis.

## 2.3 Pareamento dos Usuários e Alocação de Potência em NOMA

O aumento da capacidade de canal oferecido pela técnica NOMA é maior em cenários nos quais os usuários experimentam diferentes ganhos de canal. Dessa forma, a tarefa de escolher os usuários a serem pareados em NOMA é fundamental para que haja ganho de desempenho no sistema [5]. Caso não ocorra uma escolha adequada dos pares, é possível que o sistema não apresente ganho significativo em relação a OMA. Um exemplo disso, são os pares formados por usuários com níveis de SNR semelhantes.

Além disso, os usuários pareados estão relacionadas de forma que a alteração na potência de transmissão de um dos usuários altera também as taxas dos demais. Com isso surge a necessidade de técnicas de alocação da potência de transmissão (*Transmit Power Allocation* – TPA), que proporcione o aumento da capacidade do sistema e justiça entre os usuários.

Para obter resultados ótimos no pareamento de usuários e na alocação de potência (*Power Allocation* – PA), é preciso realizar uma Busca Completa (*Full Search* – FS) para encontrar os melhores pares e melhores coeficientes de alocação de potência [3]. Entretanto, testar todas as combinações de pares e coeficientes de alocação de potência, pelo método de força bruta, pode demandar alto esforço computacional, aumentar o atraso de processamento e elevar o consumo de energia. Além disso, em sistemas de comunicações móveis as condições de canal são dinâmicas e necessitam ser verificadas e atualizadas constantemente, portanto, métodos eficientes e de baixa complexidade computacional de UPPA em NOMA devem ser avaliados.

### 2.3.1 Trabalhos Relacionados

Recentemente, muitos trabalhos têm sido publicados com resultados de estudos sobre o uso de NOMA para a próxima geração de comunicações móveis. Entre os primeiros trabalhos a tratarem desse tema estão [3] e [12]. Esses trabalhos apresentam considerações práticas e conceituais sobre NOMA em *downlink*, aplicando SIC no receptor. Os autores discutem sobre alocação de potência multiusuário, sobrecarga (*overhead*) de sinalização, propagação de erro em SIC, desempenho em cenários de alta mobilidade e combinação de NOMA com MIMO. Por meio de simulações de nível de sistema, levando em considerações

aspectos práticos do LTE, os resultados mostram que NOMA alcança um ganho de desempenho igual ou superior a 30%, comparado com OMA.

Em [4] é demonstrado, por meio de simulações computacionais, que NOMA aplicado no *downlink* aumenta a taxa de dados do usuário na borda da célula (*cell-edge user throughput*). Os autores apontam ainda direções para utilizar NOMA combinado com MIMO e SIC com combinação de rejeição da interferência (*Interference Rejection Combining – IRC*). Em [13], mostra-se que NOMA oferece ganho em diferentes cenários, incluído células pequenas (*small cells*), que é uma das metodologias candidatas para o 5G.

Ding *et. al.* [5] fazem uma avaliação analítica do desempenho NOMA em células com usuários distribuídos aleatoriamente. Os resultados mostram que NOMA pode proporcionar um desempenho superior em termos de soma ergódica das taxas dos usuários. Além disso, os autores mostram que a probabilidade do sistema operar acima do limite da célula (*Outage Probability – OP*) está criticamente relacionada com a escolha das taxas de dados projetada e a potência alocada para os usuários, de forma que a escolha errada desses dois parâmetros pode conduzir a uma OP sempre igual a um. Além disso, verifica-se que o ganho NOMA para baixos níveis de SNR é insignificante.

Uma avaliação da capacidade de sistemas com múltiplas entradas e múltiplas saídas (*Multiple-Input Multiple-Output – MIMO*) combinados com NOMA é feita em [14]. Os autores apresentam uma demonstração analítica de que MIMO-NOMA é estritamente melhor que MIMO-OMA em termos da soma de capacidade do canal. Os resultados são confirmados por simulações computacionais.

Além da demonstração de ganho NOMA sobre OMA, alguns trabalhos têm abordado os métodos de UPPA para aumentar efetivamente a capacidade do sistema. Em [12], investiga-se o desempenho de métodos ótimos e simplificados de UPPA. São avaliados métodos de alocação de potência por busca completa (*Full Search Power Allocation – FSPA*) e alocação de potência de transmissão fracionária (*Fractional Transmit Power Allocation – FTPA*). Em outro método avaliado, o agrupamento de usuários é pré-definido e alocação de potência é fixa (*Fixed Power Allocation – FPA*). Os resultados indicam que em cenários de alta mobilidade o efeito da propagação de erros é pequeno e pode ser desprezado. Os autores apresentam um esquema de UPPA para alcançar o ganho em NOMA com redução de sobrecarga de sinalização no *downlink*.

Em [15] é investigado o desempenho de NOMA no *downlink* utilizando um esquema de alocação de potência de transmissão baseado no método de Justiça Proporcional (*Proportional Fair – PF*). Os autores comparam três métodos de TPA, um método ótimo, alocação fixa (FPA) e alocação fracionária (FTPA). Os resultados mostram que o desempenho dos métodos subótimos, como FPA e FTPA, é levemente inferior ao método ótimo, porém esses métodos representam boas alternativas para aumentar a capacidade e reduzir a sobrecarga de sinalização e a complexidade NOMA.

Outros trabalhos também abordam métodos baseados em PF. Os autores de [16] analisam a solução ótima para um método de UPPA baseado no escalonamento PF. Para evitar testes de pares desnecessários e reduzir a complexidade, são estabelecidos pré-requisitos para os usuários. Os resultados mostram que o método UPPA proposto para NOMA alcança melhor desempenho, quando comparado com OFDMA, em termos de eficiência e justiça entre os usuários. Em [17] é apresentado também um método pareamento de usuários baseado no escalonamento PF. Nesse método os pares são escolhidos com o objetivo de maximizar a métrica PF, enquanto que a potência alocada para cada usuário é pré-configurada fixa. Os resultados das simulações mostram que o método proposto em [17] tem melhor desempenho que o método exaustivo FS e que o escalonamento Round Robin.

Timotheou e Krikidis [18] investigam a justiça na alocação de recursos em NOMA considerando o princípio max-min *fairness*, a informação instantânea do estado do canal (*Channel State Information* – CSI) e a CSI média. Os autores mostram que o problema de alocação de potência em NOMA formulado é não-convexo. Entretanto, é apresentado um método polinomial de baixa complexidade para alcançar a solução ótima. Os resultados mostram que o método NOMA proposto obtém melhor desempenho, em termos de justiça entre os usuários, comparado com TDMA.

O estudo apresentado em [19] aborda métodos UPPA visando reduzir a interferência e maximizar a capacidade do sistema. O esquema de pareamento é baseado na ordenação dos usuários em relação ao ganho de canal. O coeficiente de PA é calculado para maximizar a soma das taxas, respeitando os requisitos de ganho sobre OMA. O ganho de desempenho é avaliado em termos de eficiência espectral e probabilidade de erro de símbolo. Porém, os autores não avaliam o nível de justiça que as técnicas oferecem.

Oveiedo e Sadjadpour [20] introduzem um método de alocação de potência justo, o *Fair-NOMA*. Esse método estabelece critérios para garantir que os usuários pareados em NOMA sempre alcancem taxas, no mínimo iguais às taxas alcançadas em OMA. A partir desse critério, os limites do coeficiente de PA são derivados como funções do ganho de canal. Isso significa que a ERB deve conhecer a CSI de cada usuário. Nenhuma métrica para realizar uma avaliação quantitativa de justiça é utilizada. No contexto desse trabalho, "justiça" é definida como uma característica do método de PA, que garante que nenhum usuário NOMA experimente enlaces com capacidade menor que a capacidade alcançada em OMA.

Em [21] é avaliado NOMA em *downlink*. Na estratégia de UPPA investigada, os usuários são agrupados em subcanais com diferentes larguras de bandas. A potência de transmissão e a banda são juntamente otimizadas para maximizar a EE na transmissão, respeitando os requisitos mínimos de potência e taxas. Os autores mostram que esse problema de otimização é não-convexo, e propõem um algoritmo iterativo baseado no procedimento côncavo-convexo. Os resultados numéricos obtidos mostram que o algoritmo proposto al-

cança melhor desempenho, em termos de EE, do que NOMA com sub-banda de largura fixa e OMA.

Ni et. al. [22] exploram a relação de compromisso entre EE e eficiência espectral (*Spectral Efficiency* – SE) para *downlink* NOMA. O problema é avaliado por métodos de otimização multiobjetivo visando atingir a eficiência de Pareto. Os resultados de simulações mostram que NOMA tem melhor desempenho em termos de SE e EE quando os níveis de justiça entre os usuários são altos. A mesma relação entre SE e EE é abordada em [23], e uma solução de otimização em duas camadas é proposta e avaliada.

Em [24] é proposto um método de alocação de potência que visa atingir índices de justiça pré-definidos. Os autores propõem um algoritmo para maximizar a capacidade total do sistema mantendo um nível de justiça alvo definido previamente. O nível de justiça é avaliado pelo Índice de Jain. Os resultados mostram ganho de desempenho de NOMA sobre OMA. Entretanto, à medida que o índice de justiça estabelecido cresce, as taxas obtidas diminui.

O estudo apresentado em [25] investiga um método ótimo de PA para maximizar a soma das taxas em NOMA. O método apresentado é baseado em apenas um escalar para alcançar diferentes níveis de justiça considerando dois tipos de informação de canal, CSI estatístico e CSI perfeito. Os autores propõem um algoritmo de otimização, que para ambos os tipos de CSI, o desempenho de NOMA é maior que OMA.

Esta dissertação apresenta uma análise do comportamento da técnica NOMA com dois usuários multiplexados por sub-banda. A partir da análise, propõe-se o método de pareamento de usuários que fornece altos níveis de eficiência e também de justiça. Da mesma forma, defini-se um critério de justiça para calcular o coeficiente de alocação de potência. A estratégia proposta é avaliada por meio de simulações computacionais e os resultados são discutidos.

## CAPÍTULO 3

---

# Pareamento de Usuários e Alocação de Potência em NOMA

---

Este capítulo discute as estratégias de formação de pares e alocação de potência entre os usuários multiplexados no domínio da potência em NOMA. As técnicas de UPPA devem buscar o equilíbrio ótimo entre máxima da capacidade do sistema e distribuição justa de recursos entre os usuários.

### 3.1 Descrição do Sistema NOMA

Considera-se um sistema celular com  $L$  células e com  $J$  usuários alocados por célula. Cada célula opera com um canal de largura de banda  $W$  para o enlace de descida, subdividido em  $M$  sub-bandas de mesma largura  $W_{SB} = W/M$ . A potência total de transmissão por célula é  $P_t$  e é distribuída igualmente entre as sub-bandas. São alocados  $K$  usuários por sub-banda, e o desempenho do sistema com NOMA e OMA é avaliado.

A relação sinal-interferência mais ruído (*Signal-to-Interference-plus-Noise-Ratio* – SINR) de um usuário  $U_k$ ,  $k \in \{1, 2, \dots, K\}$ , alocado exclusivamente em uma sub-banda  $S_m$ ,  $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ , de uma célula  $C_l$ ,  $l \in \{1, 2, \dots, L\}$ , é dada por

$$\gamma_k = \frac{P_{R,l,k}}{I_{l,k} + N}, \quad (3.1)$$

em que  $P_{R,l,k}$  é a potência recebida pelo usuário  $U_k$  referente ao sinal transmitido pela ERB na célula  $C_l$ , considerando os efeitos em grande e pequena escala, devido à perda de percurso, ao padrão de radiação da antena, ao sombreamento e ao desvanecimento Rayleigh. A potência do ruído branco gaussiano aditivo (*Additive White Gaussian Noise* – AWGN) na sub-banda está representada por  $N$ , e a interferência recebida pelo usuário a partir de outras células que estão fazendo reuso da mesma sub-banda é  $I_{l,k} = \sum_{i=1, i \neq l}^C P_{R,i,k}$ .

Em NOMA, múltiplos usuários podem ser sobrepostos em uma mesma sub-banda de uma célula, de forma que os sinais destinados aos usuários são transmitidos com diferentes níveis de potência. Na recepção, cada usuário remove os sinais de maior potência destinados a outros usuários utilizando SIC, e os demais sinais são tratados como interferência. Organizando os usuários em ordem decrescente do ganho de canal ( $\gamma_k \geq \gamma_{k+1}$ ), é possível obter o valor da SINR  $\phi_k$  para o  $k$ -ésimo usuário NOMA conectado à célula  $C_l$ , em função de  $\gamma_k$ , e do coeficiente de alocação de potência  $a_k$ :

$$\phi_1 = \frac{a_1 P_{R,l,1}}{I_{l,1} + N} = a_1 \gamma_1. \quad (3.2)$$

$$\phi_2 = \frac{a_2 P_{R,l,2}}{a_1 P_{R,l,2} + I_{l,2} + N} = \frac{a_2 \gamma_2}{a_1 \gamma_2 + 1}. \quad (3.3)$$

$$\phi_3 = \frac{a_3 P_{R,l,3}}{a_1 P_{R,l,3} + a_2 P_{R,l,3} + I_{l,3} + N} = \frac{a_3 \gamma_3}{(a_1 + a_2) \gamma_3 + 1}. \quad (3.4)$$

Para o  $k$ -ésimo usuário

$$\phi_k = \frac{a_k \gamma_k}{\gamma_k \sum_{i=0}^{k-1} a_i + 1}, \quad (3.5)$$

em que  $\sum_{i=0}^K a_i = 1$ ,  $a_0 = 0$  e, portanto, o coeficiente de alocação de potência do sinal destinado ao  $k$ -ésimo usuário é dado por

$$a_k = 1 - \sum_{i=0, i \neq k}^K a_i. \quad (3.6)$$

Dessa forma, considerando um canal gaussiano, a taxa alcançável por um usuário NOMA em uma sub-banda de largura  $W_{SB}$ , é

$$R_{N,k} \leq C(\phi_k) = W_{SB} \log_2(1 + \phi_k). \quad (3.7)$$

Assim como foi definida a SINR para os usuários NOMA pela Expressão 3.5, pode-se definir a SINR para cada usuário em OMA no domínio da frequência alocado na mesma sub-banda. Assumindo que a largura de banda e a potência de transmissão são divididas igualmente entre os  $K$  usuários, a potência recebida pelo  $k$ -ésimo usuário, alocado na  $l$ -ésima célula é  $P_{R,l,k}/K$ , enquanto a potência da interferência somada ao ruído é proporcional à fração da sub-banda reservada para cada usuário, e é dada por  $\beta_k(I_{l,k} + N)$ . Assumindo que cada usuário em OMA utiliza a mesma proporção da sub-banda, o coeficiente de alocação de banda pode ser definido como  $b_k = \beta$ , em que  $\beta = 1/K$ . Portanto, a SINR para um usuário em OMA é

$$\theta_k = \frac{P_{R,l,k}}{K\beta(I_{l,k} + N)} \quad \text{e} \quad \theta_k = \gamma_k. \quad (3.8)$$

Como consequência, a taxa alcançável por um usuário OMA é

$$R_{O,k} \leq C(\gamma_k) = \beta W_{SB} \log_2(1 + \theta_k). \quad (3.9)$$

## 3.2 Capacidade e Eficiência do Sistema NOMA

Ao utilizar NOMA para multiplexar os usuários em uma mesma sub-banda, pode-se obter maiores somas das taxas de comunicação individuais, quando comparado com OMA. É possível mostrar que há sempre uma configuração de pares e alocação de potência em NOMA, que oferece um desempenho ao sistema melhor ou igual ao seu desempenho em OMA. Sem perda de generalidade, assume-se uma célula com dois usuários ( $K = 2$ ) alocados por sub-banda, indexados em ordem decrescente do ganho do canal ( $\gamma_1 \geq \gamma_2$ ) e  $\gamma_2 > 0$ . Os coeficientes de alocação de recursos para NOMA e OMA são, respectivamente  $\mathbf{a} = \{0, \alpha, (1 - \alpha)\}$  e  $\beta = 1/2$ . Dessa forma, as taxas alcançáveis em NOMA são:

$$R_{N,1} \leq W_{SB} \log_2(1 + \alpha\gamma_1), \quad (3.10)$$

$$R_{N,2} \leq W_{SB} \log_2\left(1 + \frac{(1 - \alpha)\gamma_2}{\alpha\gamma_2 + 1}\right), \quad (3.11)$$

e em OMA são:

$$R_{O,1} \leq \frac{W_{SB}}{2} \log_2(1 + \gamma_1), \quad (3.12)$$

$$R_{O,2} \leq \frac{W_{SB}}{2} \log_2(1 + \gamma_2). \quad (3.13)$$

A soma das taxas de cada usuário em múltiplo acesso indica a capacidade total alcançável por sub-banda. A eficiência espectral é definida como a capacidade total normalizada para a largura de banda de 1 Hz [26]. As expressões para a eficiência espectral para um par de usuários em NOMA e OMA são, respectivamente,

$$\begin{aligned} \eta_N &= \frac{R_{N,1} + R_{N,2}}{W_{SB}} \\ &= \log_2\left[\left(1 + \alpha\gamma_1\right)\left(1 + \frac{(1 - \alpha)\gamma_2}{\alpha\gamma_2 + 1}\right)\right], \end{aligned} \quad (3.14)$$

$$\begin{aligned} \eta_O &= \frac{R_{O,1} + R_{O,2}}{W_{SB}} \\ &= \frac{1}{2} \log_2[(1 + \gamma_1)(1 + \gamma_2)]. \end{aligned} \quad (3.15)$$



O comportamento das Expressões de 3.10 até 3.15 pode ser avaliado a partir de seus argumentos. A fim de simplificar a análise, as seguintes funções são definidas:

$$f_{N,1}(\alpha, \gamma_1) \triangleq 1 + \alpha\gamma_1. \quad (3.16)$$

$$f_{N,2}(\alpha, \gamma_2) \triangleq \frac{(1 + \gamma_2)}{(1 + \alpha\gamma_2)}. \quad (3.17)$$

$$f_{O,1}(\gamma_1) \triangleq \sqrt{1 + \gamma_1}. \quad (3.18)$$

$$f_{O,2}(\gamma_2) \triangleq \sqrt{1 + \gamma_2}. \quad (3.19)$$

$$s_N(\alpha, \gamma_1, \gamma_2) \triangleq (1 + \gamma_2) \frac{(1 + \alpha\gamma_1)}{(1 + \alpha\gamma_2)}. \quad (3.20)$$

$$s_O(\gamma_1, \gamma_2) \triangleq \sqrt{(1 + \gamma_1)(1 + \gamma_2)}. \quad (3.21)$$

Essas funções apresentam as propriedades demonstradas a seguir.

**Propriedade 3.1.** A função  $f_{N,1}(\alpha, \gamma_1)$  é monotônica crescente em  $\alpha$ , dado  $\alpha \in [0, 1]$ .

*Demonstração.* Tomando a derivada parcial da Função 3.16 em  $\alpha$ , tem-se que

$$\frac{\partial f_{N,1}(\alpha, \gamma_1)}{\partial \alpha} = \gamma_1, \quad (3.22)$$

e  $\gamma_1 > 0$  pela definição do sistema. □

**Propriedade 3.2.** A função  $f_{N,2}(\alpha, \gamma_2)$  é monotônica decrescente em  $\alpha$ , dado  $\alpha \in [0, 1]$ .

*Demonstração.* Tomando a derivada parcial da Função 3.17 em  $\alpha$ , tem-se que

$$\frac{\partial f_{N,2}(\alpha, \gamma_2)}{\partial \alpha} = -\gamma_2 \frac{(1 + \gamma_2)}{(1 + \alpha\gamma_2)^2}, \quad (3.23)$$

como  $\gamma_2 > 0$  pela definição do sistema,  $\frac{\partial f_{N,2}}{\partial \alpha} < 0$ . □

**Propriedade 3.3.** A função  $s_N(\alpha, \gamma_1, \gamma_2)$  é monotônica crescente em  $\alpha$ , dado  $\alpha \in [0, 1]$ .

*Demonstração.* Tomando a derivada parcial da Função 3.20 em  $\alpha$ , tem-se que

$$\frac{\partial s_N(\alpha, \gamma_1, \gamma_2)}{\partial \alpha} = \frac{(\gamma_1 - \gamma_2)(1 + \gamma_2)}{(1 + \alpha\gamma_2)^2} \quad (3.24)$$

como  $\gamma_1 \geq \gamma_2 > 0$  pela definição do sistema,  $\frac{\partial s_N}{\partial \alpha} \geq 0$ . □

As propriedades anteriores mostram que o aumento do coeficiente de alocação de potência  $\alpha$  provoca um aumento da taxa alcançável pelo usuário  $U_1$  (com maior SINR), ao mesmo tempo que reduz a taxa alcançável do usuário  $U_2$ . Apesar disso, a soma das taxas, e consequentemente, a eficiência espectral da sub-banda cresce com o aumento do coeficiente

$\alpha$ . Entretanto, deve-se observar que a taxa de crescimento dada pela Derivada 3.24 diminui com o crescimento de  $\alpha$ , indicando que o ganho obtido para valores de  $\alpha$  próximos a um é pequeno e a soma das taxas é quase contante. Dessa forma, valores de  $\alpha$  nessa região devem ser evitados, pois além de não oferecer ganho significativo, apenas o usuário com maior ganho de canal é beneficiado. A Figura 3.1 mostra o comportamento das funções apresentadas pelas Funções de 3.16 a 3.19, considerando  $\gamma_1 = 20$  e  $\gamma_2 = 10$ . Nota-se que as curvas das funções estão de acordo com as propriedades demonstradas.

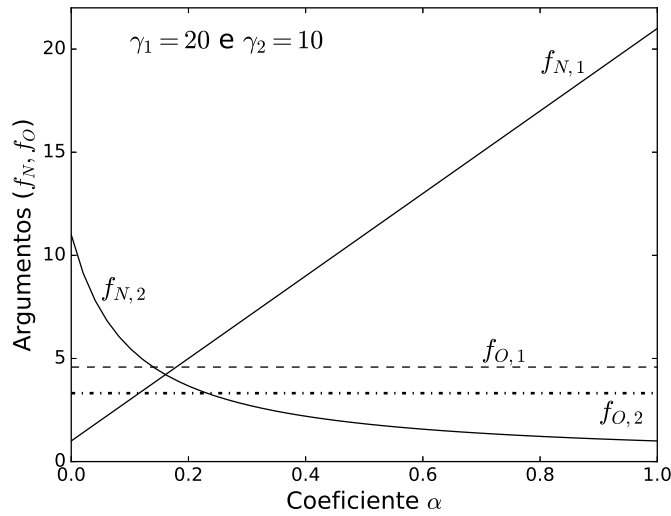


Figura 3.1: Comportamento dos argumentos das funções de capacidade.

### 3.3 Ganho NOMA

Inicialmente o ganho de desempenho do sistema NOMA sobre OMA é avaliado em termos da máxima eficiência espectral alcançável por sub-banda. Para o sistema definido nas Seções 3.1 e 3.2 é possível demonstrar a Propriedade 3.4, apresentada a seguir.

**Propriedade 3.4** (Eficiência Total Máxima). A soma máxima das taxas alcançáveis por um par de usuários  $(U_1, U_2)$  em NOMA é maior ou igual à soma das taxas alcançáveis em OMA

$$\max(\eta_N) \geq \max(\eta_O).$$

*Demonstração.* Os valores da eficiência total da sub-banda, tanto em NOMA ( $\eta_N$ ) quanto em OMA ( $\eta_O$ ), são maximizados quando os argumentos dos logaritmos das Expressões 3.14 e 3.15 são máximos. Dessa forma, pode-se analisar as Funções definidas por 3.20 e 3.21 para encontrar o valor do coeficiente de alocação de potência  $\alpha$  que satisfaça,

$$\max[s_N(\alpha, \gamma_1, \gamma_2)] \geq \max[s_O(\gamma_1, \gamma_2)]. \quad (3.25)$$

A Propriedade 3.3 mostra que a função  $s_N$  é monotônica crescente em  $\alpha$ , de forma que ela atinge seu valor máximo em  $\alpha = 1$ . Portanto, para que o valor máximo de  $\eta_N$  seja maior ou igual ao valor máximo de  $\eta_O$ , a seguinte condição deve ser verdadeira

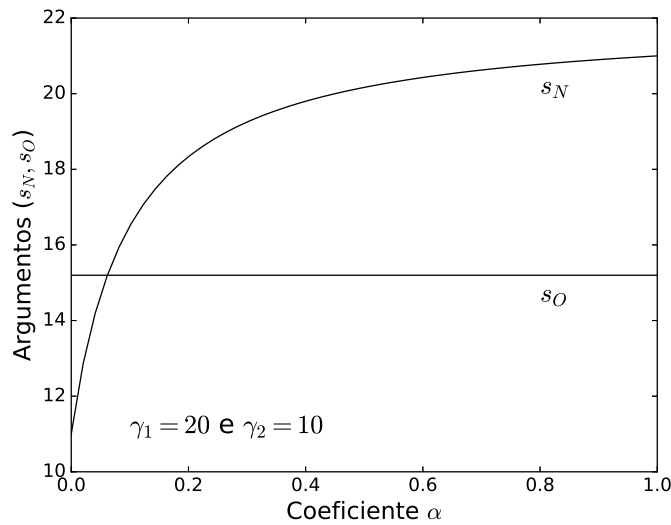
$$\begin{aligned} \max(s_N) &\geq \max(s_O) \\ (1 + \gamma_1) &\geq \sqrt{(1 + \gamma_1)(1 + \gamma_2)}. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Essa condição pode ser verificada a partir da consideração inicial que,

$$\begin{aligned} \gamma_1 &\geq \gamma_2 \\ 1 + \gamma_1 &\geq 1 + \gamma_2 \\ (1 + \gamma_1)^2 &\geq (1 + \gamma_1)(1 + \gamma_2) \\ 1 + \gamma_1 &\geq \sqrt{(1 + \gamma_1)(1 + \gamma_2)}. \end{aligned} \quad (3.27)$$

□

A partir do resultado anterior, nota-se que a eficiência máxima em NOMA ocorre quando  $\alpha = 1$ . Isso implica que toda a potência de transmissão é alocada apenas para a mensagem destinada a  $U_1$ , que é o usuário com melhor ganho de canal, enquanto  $U_2$  não recebe nenhuma informação da ERB. É evidente que essa situação não é desejável, pois além de caracterizar uma alocação injusta de recursos, apenas um dos usuários utiliza a sub-banda, não havendo acesso múltiplo entre os usuários. A Figura 3.2 mostra o comportamento das Funções 3.20 e 3.21.



**Figura 3.2:** Argumentos das funções de eficiência espectral por sub-banda.

Como forma de garantir o mínimo de justiça entre os usuários, deve-se escolher o coeficiente de alocação de potência  $\alpha$  de forma que ambos os usuários pareados em NOMA

obtenham ganhos de desempenho simultaneamente, quando comparados com OMA. Essa ideia é formalmente apresenta a seguir.

**Propriedade 3.5** ( $R_N \geq R_O$ ). Para todo o par de usuários  $(U_1, U_2)$  em acesso múltiplo com  $\gamma_1 \geq \gamma_2 > 0$ , existe  $\alpha \in \mathbb{R}$ , tal que,  $0 \leq \alpha \leq \frac{1}{2}$ , que satisfaz simultaneamente as desigualdades

$$R_{N,1} \geq R_{O,1} \quad \text{e} \quad R_{N,2} \geq R_{O,2}. \quad (3.28)$$

*Demonstração.* A partir das Expressões de 3.16 a 3.19, para que a proposição seja verdadeira, as seguintes relações devem existir,

$$1 + \alpha\gamma_1 \geq \sqrt{1 + \gamma_1} \quad \text{e} \quad \frac{1 + \gamma_2}{1 + \alpha\gamma_2} \geq \sqrt{1 + \gamma_2}, \quad (3.29)$$

de forma que

$$\frac{\sqrt{1 + \gamma_1} - 1}{\gamma_1} \leq \alpha \leq \frac{\sqrt{1 + \gamma_2} - 1}{\gamma_2}. \quad (3.30)$$

Portanto, deve existir um par  $(\gamma_1, \gamma_2)$ , tal que,

$$\frac{\sqrt{1 + \gamma_1} - 1}{\gamma_1} \leq \frac{\sqrt{1 + \gamma_2} - 1}{\gamma_2}. \quad (3.31)$$

Partindo das considerações feitas inicialmente, tem-se que

$$\begin{aligned} \gamma_2 &\leq \gamma_1 \\ \sqrt{1 + \gamma_2} + 1 &\leq \sqrt{1 + \gamma_1} + 1, \end{aligned} \quad (3.32)$$

e ainda,

$$\begin{aligned} \gamma_1 &> 0 \\ \sqrt{1 + \gamma_1} - 1 &> 0. \end{aligned} \quad (3.33)$$

Assim, é possível multiplicar ambos os lados da Desigualdade 3.32 pelo lado esquerdo da Desigualdade 3.33, sem que haja mudança de sinal, obtendo que

$$\begin{aligned} (\sqrt{1 + \gamma_1} - 1)(\sqrt{1 + \gamma_2} + 1) &\leq (\sqrt{1 + \gamma_1} - 1)(\sqrt{1 + \gamma_1} + 1) \\ (\sqrt{1 + \gamma_1} - 1)(\sqrt{1 + \gamma_2} + 1) &\leq \gamma_1 \\ \frac{(\sqrt{1 + \gamma_1} - 1)(\sqrt{1 + \gamma_2} + 1)}{\gamma_2} &\leq \frac{\gamma_1}{\gamma_2} \\ \frac{(\sqrt{1 + \gamma_1} - 1)(\sqrt{1 + \gamma_2} + 1)}{(\sqrt{1 + \gamma_2} - 1)(\sqrt{1 + \gamma_2} + 1)} &\leq \frac{\gamma_1}{\gamma_2}, \end{aligned}$$

e por fim,

$$\frac{\sqrt{1+\gamma_1}-1}{\gamma_1} \leq \frac{\sqrt{1+\gamma_2}-1}{\gamma_2}. \quad (3.34)$$

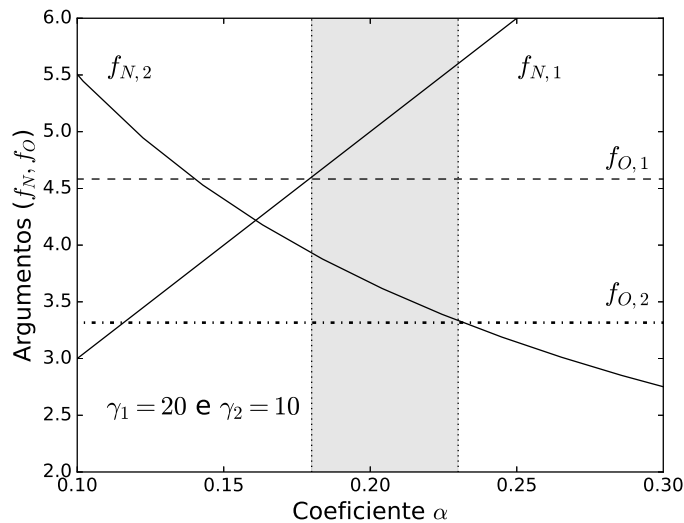
Logo, existe pelo menos um  $\alpha \in \mathbb{R}$  que satisfaz a Desigualdade 3.30. O valores extremos do intervalo em que  $\alpha$  está compreendido podem ser obtidos calculando os limites superiores e inferiores de ambos os lados da Desigualdade 3.30 [20]:

$$\lim_{\gamma_1 \rightarrow \infty} \frac{\sqrt{1+\gamma_1}-1}{\gamma_1} = \lim_{\gamma_1 \rightarrow \infty} \frac{1}{\sqrt{1+\gamma_1}+1} = 0 \quad (3.35)$$

$$\lim_{\gamma_2 \rightarrow 0} \frac{\sqrt{1+\gamma_2}-1}{\gamma_2} = \lim_{\gamma_2 \rightarrow 0} \frac{1}{\sqrt{1+\gamma_2}+1} = \frac{1}{2}. \quad (3.36)$$

Conclui-se com isso, que  $\alpha$  existe em  $\mathbb{R}$  compreendido no intervalo  $[0, \frac{1}{2}]$  que satisfaz a proposição.  $\square$

A propriedade anterior mostra que para que ambos os usuários pareados experimentem ganhos de desempenho em NOMA, é necessário uma fração igual ou maior que a metade da potência de transmissão total por sub-banda seja alocada à mensagem destinada ao usuário com menor SINR ( $\gamma_2$ ). A Figura 3.3 destaca a região na qual os valores de  $\alpha$  podem oferecer ganhos para os usuários NOMA.



**Figura 3.3:** Região de ganho NOMA em função de  $\alpha$ .

### 3.4 Escolha do Coeficiente $\alpha$

A escolha do valor para o coeficiente de alocação de potência  $\alpha$  deve ser feita objetivando maximizar a eficiência espectral, mantendo a justiça entre os usuários. Entretanto, não se pode garantir que os usuários pareados atinjam a mesma taxa de dados, pois cada usuário experimenta diferentes condições físicas de propagação. Dessa forma, caso o coeficiente de alocação  $\alpha$  seja escolhido para forçar a mesma taxa para os usuários pareados em NOMA, um usuário com uma SINR alta, ficaria limitado às taxas proporcionadas pela SINR baixa do usuário que compõe seu par. Isso implicaria em desperdício de recursos espectrais, que poderiam ser melhor aproveitados pelo usuário com maior ganho de canal.

Dado que o coeficiente de alocação de potência afeta diretamente os níveis de SINR de cada usuário, propõe-se nesta dissertação um critério de justiça baseado na fração da SINR total que cada usuário pode alcançar. A SINR total  $\gamma_k$  de um usuário  $U_k$  é obtida quando este usuário é alocado exclusivamente na sub-banda, e é definida pela Expressão 3.1. A fração de  $\gamma_k$  que  $U_k$  obtém após a ser pareado em NOMA, é definida como

$$\rho_k \triangleq \frac{f_{N,k}(\alpha, \gamma_k) - 1}{\gamma_k} = \frac{\phi_k}{\gamma_k}. \quad (3.37)$$

Para o par de usuários  $(U_1, U_2)$ ,

$$\rho_1 = \frac{\phi_1}{\gamma_1} = \alpha \quad (3.38)$$

$$\text{e} \quad (3.39)$$

$$\rho_2 = \frac{\phi_2}{\gamma_2} = \frac{1 - \alpha}{1 + \alpha\gamma_2}. \quad (3.40)$$

O caso de maior justiça ocorre quando cada usuário utiliza a mesma proporção da sua SINR total, isto é,  $\rho_1 = \rho_2$ . A partir daí, tem-se a seguinte equação,

$$\gamma_2\alpha^2 + 2\alpha - 1 = 0. \quad (3.41)$$

A equação anterior apresenta apenas uma solução positiva, que é dada por

$$\alpha = \frac{\sqrt{1 + \gamma_2} - 1}{\gamma_2}. \quad (3.42)$$

Nota-se, que o critério de justiça apresentado ( $\rho_1 = \rho_2$ ) atende ao princípio do canal de *broadcast* [11]. Primeiro, garante-se que o usuário com menor ganho de canal ( $U_2$ ) possa obter a informação mínima necessária, nesse caso, a taxa em NOMA deve ser no mínimo igual à taxa obtida em OMA ( $R_{O,2} \leq R_{N,2}$ ). Segundo, o usuário com maior ganho de canal ( $U_1$ ) deve receber, além das informações destinadas a  $U_2$ , alguma informação adicional.

O mesmo valor de  $\alpha$  em 3.42 é adotado também em [19] para o coeficiente de alocação de potência, porém essa escolha se dá com o intuito de maximizar a soma das taxas, respeitando as condições discutidas na demonstração da Propriedade 3.5. Entretanto, a busca por um valor de  $\alpha$  que maximize a eficiência espectral poderia conduzir a uma situação de injustiça entre os usuários, pois a soma das taxas é função crescente de  $\alpha$  (Propriedade 3.3), e o aumento desse coeficiente beneficia apenas o usuário com maior ganho de canal. Por isso, é necessário que seja feita uma análise sobre justiça na alocação de recursos.

Mostra-se aqui, que o valor de  $\alpha$  dado por 3.42 além de proporcionar a maior eficiência espectral dentro dos limites impostos pela Desigualdade 3.30, satisfaz também o critério de justiça proposto. Nesse caso, o usuário  $U_2$  alcança em NOMA a mesma taxa de *downlink* alcançável em OMA.

### 3.5 Escolha dos Pares

Com base nos resultados obtidos nas seções anteriores, é proposto um método de pareamento de usuários que tem como objetivo maximizar a eficiência espectral total por sub-banda e oferecer oportunidades justas de ganho entre os pares. Para tal, deve ser considerado o comportamento da eficiência espectral em função de  $\alpha$  descrito pela Propriedade 3.3. Isso indica que para maximizar a eficiência espectral em NOMA, deve-se buscar os maiores valores possíveis para  $\alpha$ . Entretanto, de acordo com o coeficiente dado pela Expressão 3.42 e com os resultados da Propriedade 3.5, para obter valores elevados de  $\alpha$ , deve-se escolher os menores valores de  $\gamma_2$ .

Para que os maiores valores de  $\alpha$  sejam distribuídos entre os pares, os usuários com menor ganho de canal devem ser identificados e alocados, um em cada sub-banda. Após isso, cada sub-banda terá um usuário alocado, o qual corresponde ao usuário  $U_2$  de um par. A conclusão da formação dos pares ocorre com alocação dos usuários com maiores ganhos de canal. Em cada sub-banda deverá ser alocado um usuário que corresponde ao  $U_1$  de um par. Para orientar essa escolha, apresenta-se a seguinte propriedade.

**Propriedade 3.6.** A eficiência espectral total por sub-banda é função monotônica crescente da diferença de SINR ( $\Delta\gamma = \gamma_1 - \gamma_2$ ) entre o par de usuários ( $U_1, U_2$ ) alocados em NOMA, para  $\gamma_2$  e  $\alpha$  previamente definidos, e portanto, constantes.

*Demonstração.* Da mesma forma que foi feito anteriormente, o comportamento da função de eficiência espectral é avaliado a partir do argumento do logaritmo. Assim, a Expressão 3.20 pode ser reescrita, utilizando a seguinte substituição,  $\gamma_1 = \gamma_2 + \Delta\gamma$ :

$$s_N(\Delta\gamma) = (1 + \alpha\gamma_2 + \alpha\Delta\gamma) \frac{(1 + \gamma_2)}{(1 + \alpha\gamma_2)}. \quad (3.43)$$

Tomando a derivada da função anterior em  $\Delta\gamma$ ,

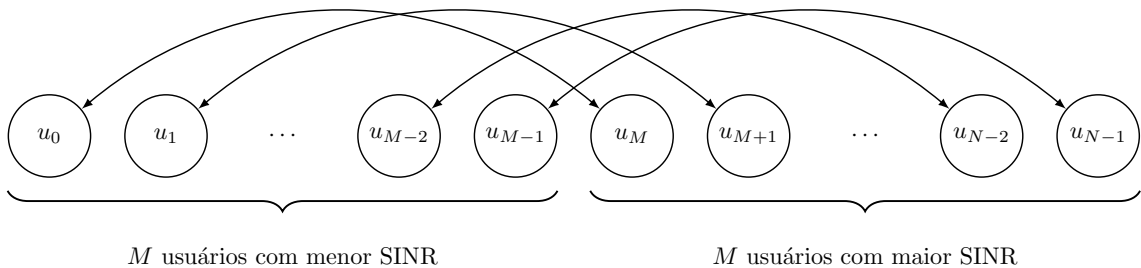
$$\frac{ds_N(\Delta\gamma)}{d\Delta\gamma} = \alpha \frac{1 + \gamma_2}{1 + \alpha\gamma_2}, \quad (3.44)$$

que é positiva para todo  $\alpha$  e todo  $\gamma_2$  positivos. □

Logo, deve-se escolher os usuários que garantam as maiores diferenças de SINR para compor os pares com os usuários já alocados. Uma estratégia possível, seria parear os usuários com maior e menor SINR, de forma que o primeiro e o último par a ser formado teria o maior e o menor valor de  $\Delta\gamma$ , respectivamente. Dessa forma, o primeiro par configuraria e situação em que a técnica NOMA ofereceria os maiores ganhos para ambos os usuários, comparado com o sistema OMA. Porém, esse método não distribui de forma justa as oportunidades de ganho entre os pares, pois os pares formados primeiro experimentariam maiores índices de ganho, do que os pares formados por último.

Dessa forma, além de escolher a combinação de pares que maximiza a eficiência espectral, a estratégia de pareamento deve permitir que todos os pares tenham oportunidades semelhantes de serem beneficiados pelo ganho da técnica NOMA. Para atingir esses objetivos, sugere-se que o pareamento seja feito buscando minimizar as discrepâncias entre os valores de  $\Delta\gamma$  de cada par. Para isso, os pares devem ser formados de acordo com o método que segue.

Dada uma célula com  $N$  usuários e  $M$  sub-bandas ( $M = \frac{N}{2}$ ), a ERB classifica os usuários em ordem crescente do nível de SINR que cada UE experimenta. Em seguida, os  $M$  primeiros usuários ordenados formam um grupo, enquanto os  $M$  últimos usuários formam um segundo grupo, ambos mantendo a ordem já estabelecida. Após essa classificação, os pares são formados alocando na mesma sub-banda um usuário do primeiro grupo juntamente com um usuário de mesma posição do segundo grupo, como sugere a Figura 3.4. Essa estratégia é também apresentada e avaliada em [19].



**Figura 3.4:** Estratégia de pareamento.



### 3.5.1 Algoritmo UPPA

O Algoritmo 1, apresentado a seguir, implementa o método de pareamento proposto e utiliza o critério de justiça definido na Seção 3.4 para realizar a alocação de potência. A primeira linha indica os parâmetros de entrada que são o conjunto de usuários da célula e o conjunto de sub-bandas. Em seguida, realiza-se a ordenação do vetor de usuários, utilizando como chave a SINR. Por fim, os pares são formados e alocados em uma sub-banda, e o coeficiente  $\alpha$  é calculado. Esse procedimento se repete até que todos os pares tenham sido alocados.

---

#### Algoritmo 1: Pareamento de Usuários e Alocação de Potência

---

**Entrada:**  $\mathbf{U} = \{u : u \text{ é um usuário } \}$ ,  $\mathbf{S} = \{s : s \text{ é uma sub-banda } \}$

**início**

$\mathbf{U}.\text{ordenar}(\text{chave} = u.\text{SINR}, \text{ordem} = \text{cresc});$

$N = |\mathbf{U}|, M = \frac{N}{2}, n = 0;$

**enquanto**  $(\exists s \in \mathbf{S})$  **faça**

$u_2 = \mathbf{U}[n], u_1 = \mathbf{U}[n + M];$

$s.\text{par} = (u_1, u_2);$

$s.\alpha = \frac{\sqrt{(1 + u_2.\text{SINR})} - 1}{u_2.\text{SINR}};$

$n = n + 1;$

**fim**

**fim**

---

Embora, tenha sido utilizada a ordem crescente para descrever o algoritmo, o mesmo resultado pode ser obtido com a classificação em ordem decrescente. A única mudança que isso exigiria, seria a troca da ordem de atribuição dos usuários  $(u_1, u_2)$  dentro do laço **enquanto**.

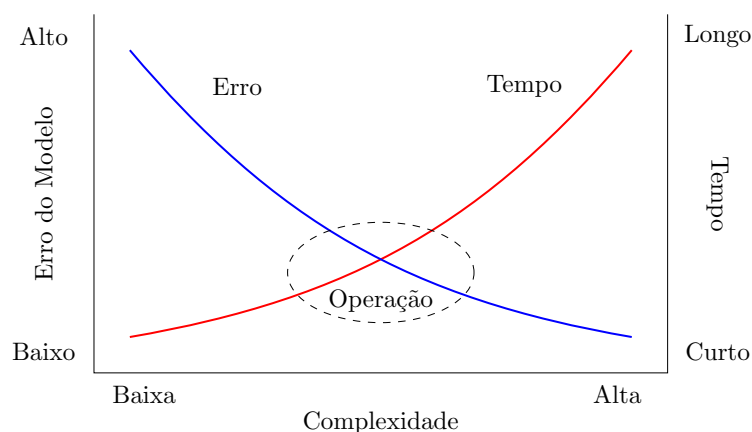
Em relação à complexidade, o algoritmo pode ser dividido em duas partes, a primeira delas é a função de ordenação, que pode ser calculada em  $O(n \log n)$ . A segunda parte a ser avaliada é o laço **enquanto**, que tem complexidade linear dada por  $O(n)$ . Desde que  $O(n \log n) > O(n)$ , tem-se que a complexidade desse algoritmo é a mesma da função de ordenação.

## CAPÍTULO 4

# Simulação Computacional

O ganho de desempenho da técnica NOMA sobre técnicas convencionais OMA depende da diferença de qualidade do canal dos usuários que compartilham os recursos de comunicações. Entretanto, um sistema típico de comunicações móveis pode envolver dezenas ou centenas de usuários, o que torna complexa a avaliação analítica do desempenho das técnicas de acesso múltiplo. Por outro lado, a construção de protótipos para sistemas de comunicações tem custo muito elevado, o que inviabiliza essa abordagem em fases iniciais das pesquisas nessa área.

A simulação computacional é um método eficiente para avaliar o desempenho de técnicas de comunicações. Por meio de simulações é possível investigar e comparar o comportamento do sistema com diferentes técnicas em diferentes cenários. A precisão dos resultados obtidos por simulações depende da complexidade da modelagem do sistema, quanto mais detalhes do sistema real o modelo representar, maior será a precisão dos resultados obtidos por simulações [27]. Porém, modelos muito complexos podem demandar alto custo computacional e tempos longos de simulação, a relação entre complexidade, erro e tempo de execução está representada na Figura 4.1.



**Figura 4.1:** Relação entre o tempo de execução e a complexidade do modelo de simulação [27].

As simulações de sistemas de comunicações móveis, geralmente, são divididas em dois níveis de abstração, o nível de enlace (*Link-Level Simulation* – LLS) e o nível de sistema (*System-Level Simulation* – SLS). As simulações do tipo LLS têm como objetivo avaliar a capacidade do enlace e, como resultado, são obtidas as taxas de comunicação (*throughput*) e de erro de *bit* (*Bit Error Rate* – BER) para uma faixa de valores da relação SNR ou métrica semelhante. Já as simulações SLS são utilizadas para avaliar de uma forma mais ampla o comportamento do sistema a partir de um nível de abstração mais alto, quando comparado à LLS. Esse tipo de simulação é útil para avaliar o desempenho de técnicas de alocação de recursos físicos, modelos de tráfegos [28] e o ganho de diversidade multiusuário.

Para investigar o comportamento do sistema e o impacto da variação de condições, como o número e a disposição dos usuários na região de interesse, configurações de níveis de potência, tráfego demandado, reuso de frequências e alocação de recursos, é necessário considerar os múltiplos usuários e não apenas um enlace individual. Nessas situações, é conveniente utilizar as simulações SLS e abstrair as simulações dos enlaces de cada usuário, a fim de reduzir a complexidade computacional. Para isso, é necessário utilizar um modelo de enlace-para-sistema (*Link-to-System* – L2S), que pode ser uma função que mapeia uma medida de desempenho do enlace a partir de uma métrica de entrada. O objetivo do L2S é prever o desempenho e a qualidade do enlace a partir de uma medida de entrada, sem que uma simulação LLS seja executada [29].

Para avaliar o desempenho das estratégias de pareamento de usuário e alocação de potência em NOMA, implementou-se um simulador<sup>1</sup> de nível de sistema (SLS) utilizando a linguagem de programação Python e as bibliotecas do ecossistema SciPy [30]. Este capítulo descreve cada parte do modelo computacional proposto e implementado para compor o simulador.

## 4.1 Modelo de Rede

O sistema celular implementado é composto por rede, *sites* e células. A célula é a menor região de cobertura do sinal emitido por uma ERB. Cada célula pode ser modelada como uma área hexagonal ou triangular e representa um setor de um *site*. O *site*, por sua vez, é composto por um ou mais setores (células) e representa a área de cobertura total de uma ERB, que é fixada no centro do *site*. Uma rede (*grid*) celular é formada por um conjunto de *sites* dispostos geograficamente de forma a proporcionar cobertura em área de interesse. Neste trabalho, implementa-se um cenário de simulação LTE típico, composto por uma rede de 19 *sites*, cada um com três setores hexagonais, totalizando 57 células. Esse cenário é ilustrado na Figura 4.2.

---

<sup>1</sup>Esse simulador é um projeto de código aberto sob a licença MIT e está disponível em: [https://github.com/joeugenio/noma\\_simulation](https://github.com/joeugenio/noma_simulation)

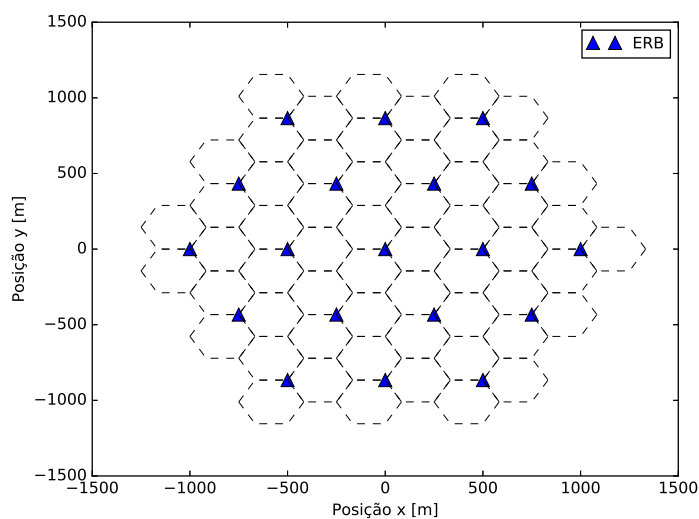


Figura 4.2: Configuração de 19 sites com três setores.

Nesse cenário cada célula ou setor é ser representada por um hexágono regular cuja a antena está posicionada no vértice comum aos três setores de um site. As medidas de alcance e distância *inter-site* são definidas em função do raio da célula, que é a distância a partir do centro do hexágono até um de seus vértices. O alcance da célula é definido como a maior distância em linha reta (vértice a vértice) que pode ser percorrida dentro de uma célula, essa distância é o dobro do raio. Já a distância *inter-site* é a menor distância entre duas ERBs e mede o triplo do raio. A Figura 4.3 mostra a relação entre as medidas para uma rede com células de raio  $R$ , alcance  $2R$  e a distância *inter-site*  $3R$ .

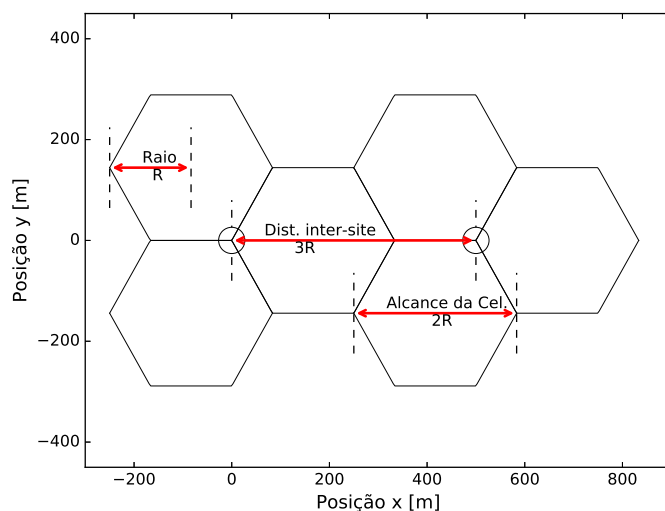


Figura 4.3: Relação de medidas de sites e células.

## 4.2 Dispositivos

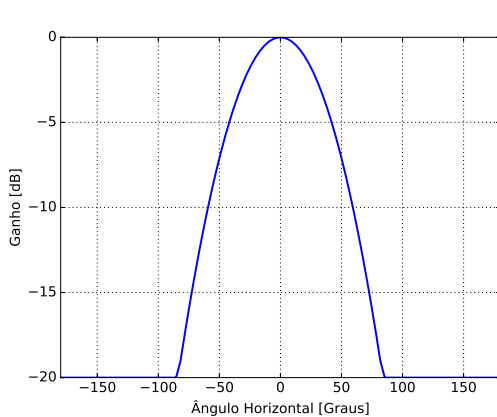
Nesse trabalho, apenas dois tipos de dispositivos são considerados como parte da rede celular, a ERB e o EU. Uma vez que objeto de estudo é o desempenho do enlace de descida (*downlink*) a partir da ERB para os EUs, outros dispositivos de uma rede celular não são implementados.

### 4.2.1 Estação Radiobase

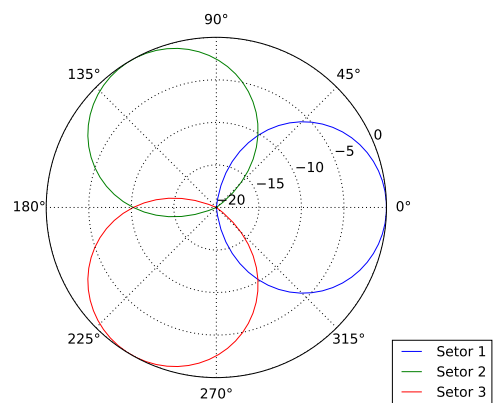
A ERB é posicionada ao centro de cada *site*, de forma a atender aos três setores do *site*. Para cada setor há uma antena direcional, em que o padrão de radiação que especifica a atenuação em função do ângulo de abertura horizontal do setor é dado por [31]

$$A(\theta) = -\min \left[ 12 \left( \frac{\theta}{\theta_{3dB}} \right)^2, A_m \right], \quad -\pi \leq \theta \leq \pi, \quad (4.1)$$

em que  $\theta_{3dB}$  é o ângulo do feixe de meia potência definido como  $\frac{13}{36}\pi$  ( $65^\circ$ ), e  $A_m$  é a atenuação máxima, igual a 20 dB. Devido a pequena variação da altura entre ERBs e EU, o padrão de radiação vertical é considerado constante, com ganho de 0 dBi. A Figura 4.4(a) mostra o diagrama de radiação da antena de um setor da célula, e a Figura 4.4(b) exibe o diagrama de radiação polar para cada setor.



(a) Diagrama de radiação.



(b) Diagrama de radiação polar dos 3 setores da ERB.

**Figura 4.4:** Padrão de radiação horizontal de cada setor da ERB.

As medidas de altura e ganho das antenas variam com o tipo de ambiente, como é apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Ganho e altura das antena da ERB em diferentes cenários [31].

| Parâmetros | Rural   | Urbano   |         |
|------------|---------|----------|---------|
|            | 900 MHz | 2000 MHz | 900 MHz |
| Ganho      | 15 dBi  | 15 dBi   | 12 dBi  |
| Altura     | 45 m    | 30 m     | 30 m    |

## 4.2.2 Equipamento do Usuário

O EU é modelado como um dispositivo simples que só se comunica com a ERB à qual está associado. A antena desse dispositivo tem ganho de 0 dBi e é omnidirecional em relação aos ângulos horizontais e verticais. A posição de cada EU é definida aleatoriamente durante a simulação, e a altura considerada é de 1.5 m.

O sistema implementado é de entrada única e saída única (*Single Input Single Output* – SISO), de forma que para ambos os dispositivos, ERB e EU, é considerada apenas uma antena.

## 4.3 Modelo de Enlace

Para avaliar o desempenho do enlace de descida entre ERBs e EUs, utiliza-se um modelo de enlace com ganho variável em função do tempo e da localização espacial. Dessa forma, é possível obter a potência do sinal recebido pelo EU a partir do ganho em macroescala, do desvanecimento em pequena escala e da potência do sinal transmitido [29]. Para um sinal transmitido com potência  $P_t$ , a potência  $P_r$  do sinal recebido por uma estação móvel é dada por

$$P_r = \underbrace{P_p \cdot P_s \cdot G_{ant,ERB} \cdot G_{ant,EU}}_{\text{macroescala}} \cdot \underbrace{P_h}_{\text{pequena escala}} \cdot P_t, \quad (4.2)$$

em que  $P_h$  é o ganho do canal devido às variações temporais e espalhamento Doppler,  $P_p$  representa as perdas de percurso,  $P_s$  é o ganho devido ao efeito de sombreamento (*shadowing*),  $G_{ant,ERB}$  e  $G_{ant,EU}$  representam os ganhos das antenas do ERB e do EU, respectivamente.

### 4.3.1 Perdas em Macroescala

As perdas que afetam o sinal transmitido devido à variação da posição do receptor, são tratadas como efeitos em macroescala. Normalmente, essas perdas estão associadas às características topográficas e geográficas do local onde a comunicação ocorre, e sofrem pouca ou nenhuma variação ao longo do tempo. Dessa forma, para pequenos intervalos de tempo, as perdas em macroescala experimentadas por um EU são consideradas constantes e dependentes apenas da sua posição. Os principais efeitos a serem considerados são a perda de propagação, o desvanecimento por sombreamento (*shadow fading*), e o padrão de radiação das antenas do transmissor e receptor.

### Modelo de Propagação

O intensidade do sinal transmitido por um canal sem fio sofre atenuações à medida que o receptor se afasta da fonte de transmissão. Isso ocorre devido às condições de propagação as quais o canal sem fio está sujeito. Genericamente, o modelo de propagação de um canal sem fio, pode ser representado por

$$\frac{P}{P_0} = Ad^{-n}, \quad (4.3)$$

em que  $P$  é a potencia recebida,  $P_0$  é a potência transmitida,  $A$  é uma constante,  $d$  é a distância entre transmissor e receptor, e  $n$  é o fator de atenuação. Entretanto, em projetos de sistemas de comunicações móveis é desejável utilizar modelos de predição das perdas de propagação mais apurados, que podem ser empíricos ou analíticos [7].

Para obter resultados mais realistas, são utilizadas neste trabalho os modelos de propagação para macrocélulas sugeridos em [31]. As perdas de propagação são calculadas em dB para ambientes urbanos pela Fórmula 4.4 e para ambientes rurais pela Fórmula 4.5.

$$L_u = 4(1 - 4h_d \cdot 10^{-3}) \log_{10} d - 18 \log_{10} h_d + 21 \log_{10} f_c + 80dB . \quad (4.4)$$

$$L_r = 69,55 + 26,16 \log_{10} f_c - 13,82 \log_{10} h_b + (44,9 - 6,55 \log_{10} h_b) \log d + \\ -4,78 \log_{10}^2 f_c + 18,33 \log_{10} f_c - 40,94 \quad (4.5)$$

Nas fórmulas anteriores,  $h_d$  é a altura da antena da ERB em metros a partir do nível médio do telhado,  $h_b$  é a altura da antena da ERB em metros a partir do nível do solo,  $d$  é a distância entre a ERB e o EU em quilômetros e  $f_c$  é a frequência da portadora em megahertz (MHz). Considerando os valores apresentados na Tabela 4.1, as expressões para os modelos de propagação podem ser resumidas na Tabela 4.2.

**Tabela 4.2:** Modelos de Propagação.

| Ambiente | Frequência | Modelo ( $L$ )                 |
|----------|------------|--------------------------------|
| Urbano   | 900 MHz    | $L = 120,9 + 37,6 \log_{10} d$ |
| Urbano   | 2000 MHz   | $L = 128,1 + 37,6 \log_{10} d$ |
| Rural    | 900 MHz    | $L = 95,5 + 34,1 \log_{10} d$  |

As expressões na Tabela 4.2 são definidas para todo  $d \in \mathbb{R}$  e  $d > 0$ . Entretanto, em um cenário real o EU sempre estará a uma distância mínima da ERB. Para representar essa distância, é definida a Perda Mínima de Acoplamento (*Minimum Coupling Loss* – MCL), que é a menor perda que pode ocorrer entre a ERB e o EU, considerando o ganho das antenas [31]. Os valores de MCL em diferentes cenários são apresentado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3: MCL entre ERB e EU.

| MCL/Ambiente | Rural   | Urbano   |         |
|--------------|---------|----------|---------|
|              | 900 MHz | 2000 MHz | 900 MHz |
| MCL          | 80 dB   | 70 dB    | 70 dB   |

A Figura 4.5 mostra o gráfico da perda de propagação para diferentes configurações de ambientes e frequências portadoras. A Figura 4.6 exibe em um mapa de cores a intensidade da perda na área de uma célula (setor), considerando o padrão de radiação da antena descrito na Seção 4.2.1 e o modelo de propagação para ambiente urbano.

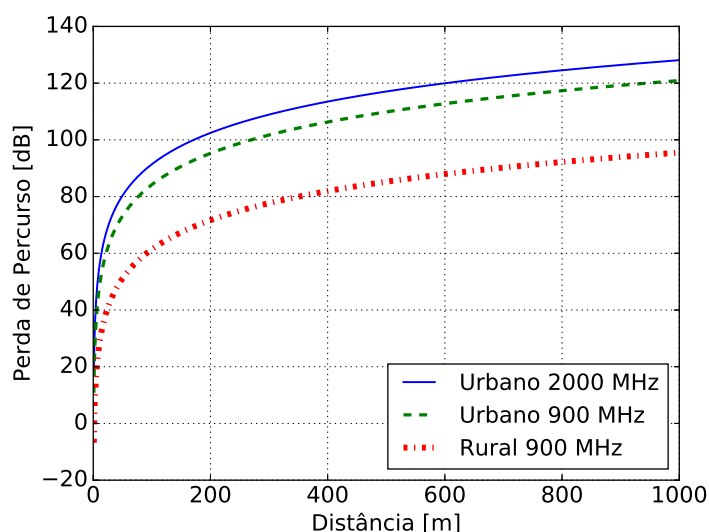


Figura 4.5: Perda de percurso para diferentes cenários.

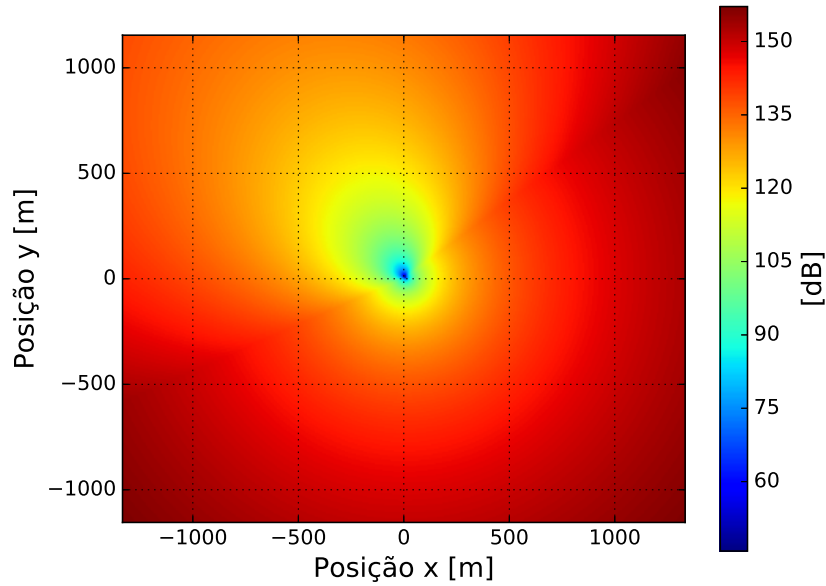
## Sombreamento

Em sistemas de comunicações móveis, a existência de obstáculos entre transmissor e receptor faz com que diferentes EUs, que estejam à mesma distância da ERB, possam experimentar valores de perda de propagação diferentes [8]. Essa variação em torno do valor médio da perda de propagação é conhecida como sombreamento (*shadow fading* ou *shadowing*) e é um problema largamente conhecido em sistemas de comunicações sem fio.

Os obstáculos que causam o sombreamento do sinal transmitido estão relacionados às características do ambiente como topologia, relevo, prédios e vegetações, portanto, esses obstáculos são considerados fixos para curtos intervalos de observação. Dessa forma, é mais conveniente modelar o efeito de sombreamento como um processo aleatório dependente da posição espacial, embora esse efeito também possa ser modelado como um processo dependente do tempo [29].

A variação da perda de propagação devido ao sombreamento é modelada como um processo log-normal distribuído e, portanto, apresenta distribuição normal com média  $\mu$  e





**Figura 4.6:** Intensidade da perda na região de um setor da ERB, modelo Urbano ( $f_c = 2000$  MHz).

desvio padrão  $\sigma$  quando avaliado em decibéis. Além disso, devido às causas desse efeito estarem associadas a obstáculos físicos, os valores de sombreamento apresentam correlação espacial. Para representar a correlação espacial, a seguinte função de correlação normalizada pode ser utilizada [32, 33],

$$r(x) = e^{-\frac{x}{d_{cor}}}, \quad x \geq 0, \quad (4.6)$$

em que  $x$  representa a distância entre dois pontos de sombreamento e  $d_{cor}$  é distância de correlação.

Utilizando um método descrito em [34] e aperfeiçoado em [29], foi implementado o efeito de sombreamento considerando a correlação espacial. Para cada *site* foi gerada uma matriz que corresponde ao mapa de sombreamento em duas dimensões, em que cada elemento da matriz armazena o valor do sombreamento em decibéis (dB) para uma área de  $D_{somb}$  m<sup>2</sup>.

Os mapas de sombreamento são gerados para cada *site* a partir da distribuição e dos parâmetros apresentados na Tabela 4.4. Entretanto, inicialmente esse mapa contém amostras variáveis aleatórias descorrelacionadas. A correlação entre os elementos do mapa pode ser adicionada pela decomposição de Cholesky.

Considerando um vetor aleatório  $\mathbf{v}$  descorrelacionado e com média nula, a matriz de correlação de  $\mathbf{v}$  é dada por

$$\mathbf{R} = E[\mathbf{v}\mathbf{v}^T], \quad \text{e} \quad \mathbf{R} = \mathbf{I}, \quad (4.7)$$

Tabela 4.4: Parâmetros do modelo de sombreamento.

| Parâmetro                            | Valor |
|--------------------------------------|-------|
| Média ( $\mu$ )                      | 0 dB  |
| Desv. Padrão ( $\sigma$ )            | 10 dB |
| Dist. Cor. ( $d_{cor}$ )             | 20 m  |
| Densid. Mapa de Somb. ( $D_{somb}$ ) | 5 m   |
| Cor. <i>inter-sites</i>              | 0.5   |
| Cor. entre setores                   | 1     |

em que  $E$  é o operador valor esperado,  $\mathbf{v}^T$  denota a transposta de  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{I}$  é a matriz identidade. A partir de  $\mathbf{v}$  é possível obter o vetor  $\mathbf{s}$ , com matriz de correlação predefinida  $\mathbf{R}_s$  e mesma distribuição, multiplicando  $\mathbf{v}$  pelo fator de Cholesky  $\mathbf{L}$ ,

$$\mathbf{s} = \mathbf{L}\mathbf{v}, \quad (4.8)$$

em que  $\mathbf{L}$  é a decomposição de Cholesky da matriz  $\mathbf{R}_s$ , de forma que  $E[\mathbf{ss}^T] = \mathbf{L}\mathbf{L}^T = \mathbf{R}_s$ . Cada elemento da matriz  $\mathbf{R}_s$  é calculado pela Fórmula 4.6. Entretanto, se todos os pontos do mapa de sombreamento forem considerados para gerar  $\mathbf{R}_s$ , a obtenção de  $\mathbf{L}$  demandaria alto custo computacional, tanto em processamento quanto em memória. Para resolver esse problema, em [34] é proposto um método de baixa complexidade computacional, para calcular a matriz de correlação considerando apenas oito pontos vizinhos ao ponto de interesse no mapa. A partir desse método, [29] propôs um modelo mais preciso que considera 12 vizinhos para geração da matriz de correlação.

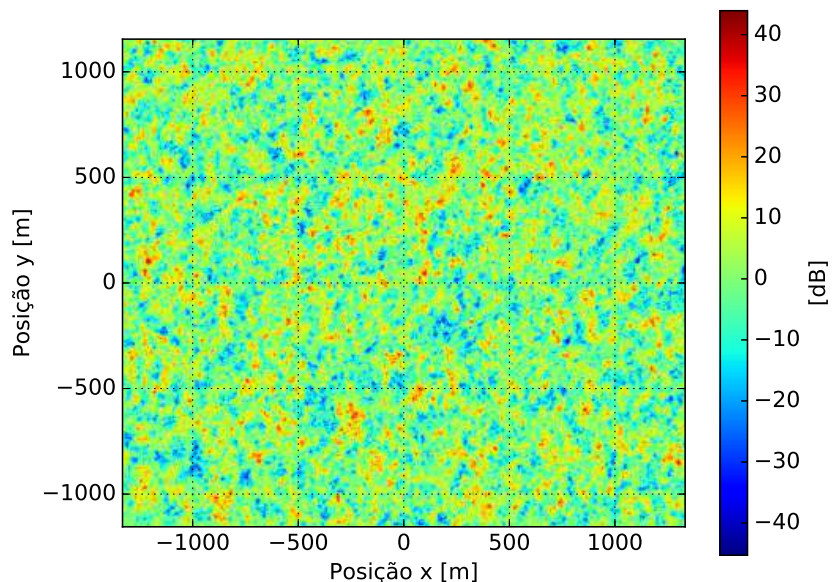
Os mapas de sombreamento de cada *site* devem apresentar correlação de  $r_{IS} = 0.5$ . A partir de mapas descorrelacionados entre si, representados pelo conjunto de vetores  $\mathbf{b}_i$ ,  $i = \{1, 2, \dots, 19\}$ , e com um vetor adicional  $\mathbf{b}_0$ , a correlação *inter-site* calculando a seguinte fórmula,

$$\mathbf{v}_i = \sqrt{r_{IS}}\mathbf{b}_0 + (1 - \sqrt{r_{IS}})\mathbf{b}_i. \quad (4.9)$$

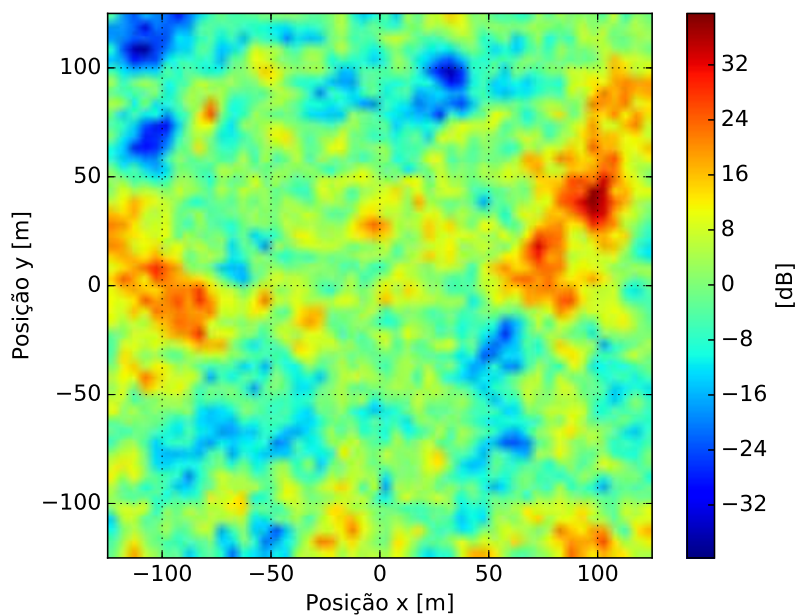
Após a geração de todos os mapas, e de adicionar a correlação espacial e a correlação *inter-site*, os mapas são armazenados em arquivos para serem carregados no momento da simulação. Dessa forma, não é necessário gerar os mapas de sombreamento em tempo de simulação (*online*), basta carregar os arquivos previamente gerados (*offline*). Isso reduz a complexidade e o tempo de simulação.

A Figura 4.7 apresenta um dos mapas de sombreamento gerados, a intensidade do ganho é representada pelas cores e pode ser melhor visualizada na ampliação exibida na Figura 4.8. Nota-se que, devido a esse efeito, o sinal transmitido pode ser atenuado ou amplificado. A Figura 4.9 exhibe a intensidade da perda em macroescala na região de uma célula. Para ilustrar os efeitos de sombras, o mapa de sombreamento é adicionado gradualmente à região de cobertura da célula. É possível notar que a presença do sombreamento

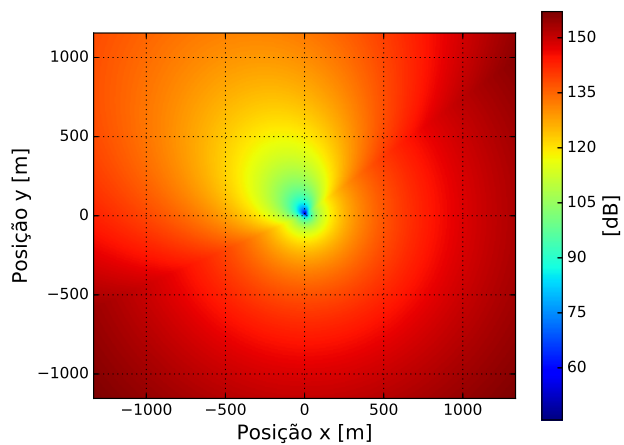
aumenta a variância da intensidade da perda. Por isso, a Figura 4.9(c) apresenta os pontos com as maiores e também com as menores perdas. Na ausência de sombreamento a distribuição de perdas na célula é bem definida.



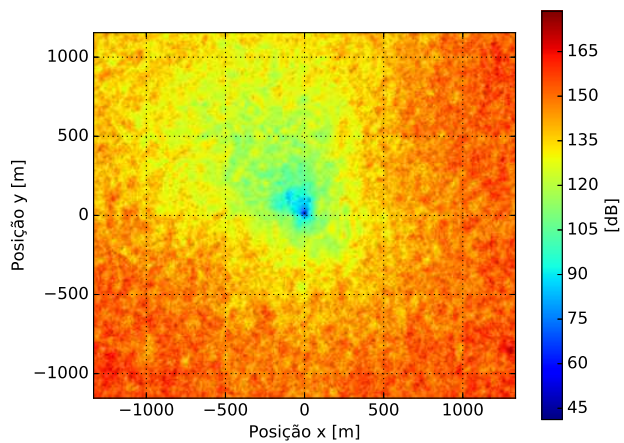
**Figura 4.7:** Mapa de sombreamento na região de cobertura total da rede ( $\sigma = 10$  dB).



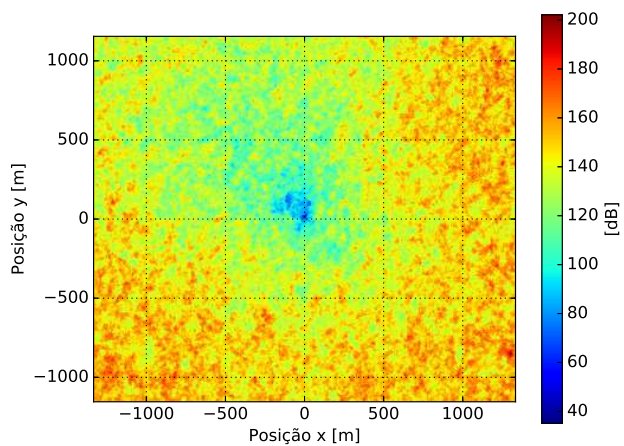
**Figura 4.8:** Sombreamento na região central do mapa ampliado.



(a) Sombreamento 0%.



(b) Sombreamento 50%.



(c) Sombreamento 100%.

Figura 4.9: Adição gradual do efeito de sombreamento ( $\sigma = 10$  dB).

### 4.3.2 Desvanecimento em Pequena Escala

O modelo de desvanecimento em pequena escala representa as variações rápidas no sinal em curtos intervalos de tempo ou de distância. Dependendo das características do ambiente, o sinal transmitido pode sofrer reflexão e dispersão em obstáculos, fazendo com que várias versões do sinal transmitido cheguem ao receptor, causando o desvanecimento por múltiplos percursos. Os principais efeitos desse tipo de desvanecimento são as mudanças rápidas na amplitude do sinal, a modulação aleatória do sinal na frequência e a dispersão do sinal no tempo [8].

Devido aos múltiplos percursos o sinal transmitido pode chegar ao receptor a partir de diferentes ângulos e com diferentes tempo de atraso, caracterizando o espalhamento de atraso (*delay spread*). O espalhamento de atraso está inversamente relacionado à largura de banda de coerência, para a qual o sinal pode ser considerado plano. Se a largura de banda do sinal for maior do que a largura de banda de coerência do canal e o espalhamento de atraso for maior do que o período do símbolo, o sinal sofrerá desvanecimento seletivo na frequência, caso o contrário aconteça o desvanecimento será plano.

Além das informações sobre a natureza dispersiva do canal, o modelo de perdas em pequena escala deve descrever as informações sobre a natureza de variação temporal do canal em pequenos intervalos de tempo e distância. Devido ao movimento relativo entre transmissor e receptor, ou ao movimento de objetos no ambiente, o sinal transmitido pode ser recebido com deslocamentos na frequência. Esse efeito é chamado de espalhamento Doppler e está inversamente relacionado ao tempo de coerência, que é o tempo para o qual a resposta ao impulso do canal é invariável. Se o sinal for recebido com altos valores para o espalhamentos Doppler e o tempo de coerência for menor que o período do símbolo, o sinal sofrerá desvanecimento rápido, pelo contrário o desvanecimento será lento. Os efeitos de desvanecimento causados pelo espalhamento de atraso e pelo espalhamento Doppler são independentes.

#### Modelo Estatístico de Desvanecimento

Para representar o desvanecimento do sinal em pequena escala para as simulações computacionais, optou-se por utilizar o modelo de Clarke e Gans descrito em [8]. Esse modelo considera o transmissor fixo e o receptor móvel, sem nenhuma linha de visada direta entre eles. Assume-se que não há nenhum excesso de atraso devido à múltiplos percursos e, portanto, o desvanecimento é plano. O envelope do sinal recebido é dado por uma variável aleatória com distribuição Rayleigh. Para introduzir a correlação temporal na atenuação,

utiliza-se o filtro de Gans. Nesse modelo, o espectro de potência da portadora não modulada é dada por

$$S(f) = \frac{1.5}{\pi f_m \sqrt{1 - \left(\frac{f - f_c}{f_m}\right)^2}}. \quad (4.10)$$

Na Equação 4.10,  $f_c$  é a frequência central da portadora e  $f_m$  é a frequência máxima de deslocamento Doppler, dada por  $f_m = v/\lambda$ , em que  $v$  é a velocidade do EU e  $\lambda$  é o comprimento de onda da portadora.

Os passos a seguir resumem o algoritmo implementado para geração do modelo estatístico de desvanecimento utilizado [8]:

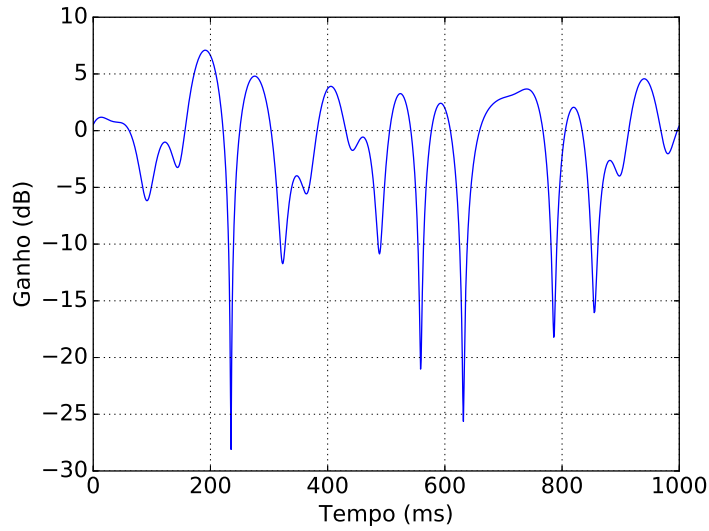
- Especificar o número  $m$  de pontos no domínio da frequência;
- Calcular o espaçamento de frequência entre as linhas espectrais, dado por  $\Delta f = 2f_m/(m - 1)$ . O valor de  $\Delta f$  define o tempo de duração  $T = 1/\Delta f$ ;
- Gerar variáveis aleatórias gaussianas complexas para cada  $m/2$  componentes de frequência positivas da fonte de ruído;
- Construir as componentes de frequências negativas da fonte de ruído a partir do conjugado complexo das componentes positivas;
- Multiplicar o ruído em fase e quadratura pelo espectro de desvanecimento dado  $\sqrt{S(f)}$ ;
- Calcular a IFFT dos sinais no domínio frequência;
- Calcular a raiz quadrada da soma obtida.

O resultado obtido dever ser uma série de  $N$  pontos no domínio do tempo que simulam o sinal de desvanecimento Rayleigh com o espalhamento Doppler e correlação temporal. A Figura 4.10(a) mostra o ganho para um modelo de desvanecimento gerado com duração de um segundo (1000 pontos). O ganho varia aproximadamente de -25 dB a 5 dB. O máximo espalhamento Doppler considerado foi de 9.27 Hz, calculado a partir da velocidade do EU de 5 km/h ( $\approx 1.39$  m/s). A Figura 4.10(b) exibe o espectro de potência para o modelo estatístico apresentado e descrito pela Equação 4.10.

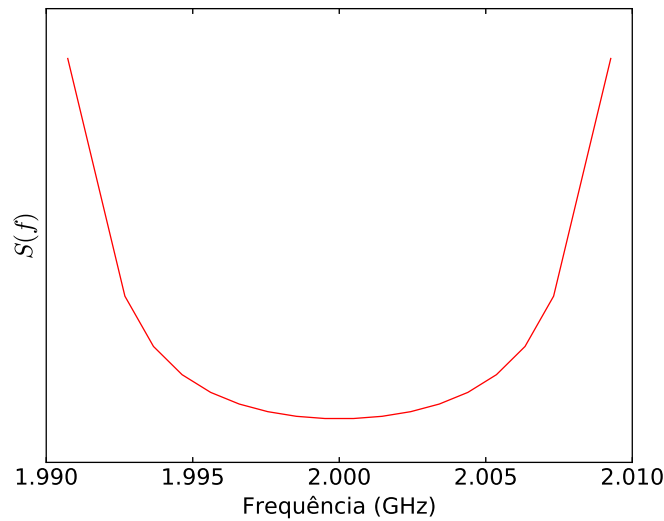
## 4.4 Ruído de Fundo e Interferência

Para as simulações é considerada a presença de ruído branco gaussiano aditivo, cuja potência é calculada a partir da temperatura ambiente e da largura de banda do canal pela seguinte expressão,

$$P_n = kTB, \quad (4.11)$$



(a) Ganho do canal Rayleigh com correlação temporal.



(b) Espectro de potência do filtro de Gans.

**Figura 4.10:** Modelo do canal com desvanecimento Rayleigh ( $DS_{max} = 9.27$  Hz).

em que  $T$  é a temperatura ambiente em Kelvin,  $B$  é a largura de banda do canal em hertz e  $k$  é a contante de Boltzmann, aproximadamente  $1.38 \times 10^{-23}$  J/K. Dessa forma, o ruído de fundo total é dado por

$$N = P_n + N_f, \tag{4.12}$$

em que  $N_f$  é a fator de ruído (*noise figure*) no receptor.

Além do ruído, para cada usuário é calculada a interferência recebida de outras células que utilizam a mesma frequência de reuso. Após o EU ser conectado a uma célula, a interferência recebida é calculada como a soma da potência de todos os sinais recebidos a partir das outras ERBs, considerando a perda de propagação, o padrão de radiação da antena da ERB, o efeito de sombreamento e desvanecimento em pequena escala.

## 4.5 Reuso de Frequência

O modelo de reuso de frequência considerado utiliza fator de reuso  $N_r = 3$ . Assim, as células que transmitem na mesma frequência estão separadas por uma célula de distância. A Figura 4.11 exibe esse esquema, em que as diferentes faixas de frequências estão indicadas por números de zero a dois. É possível verificar que uma célula com a faixa de frequências 0 está adjacente apenas de células que utilizam as faixas 1 e 2.

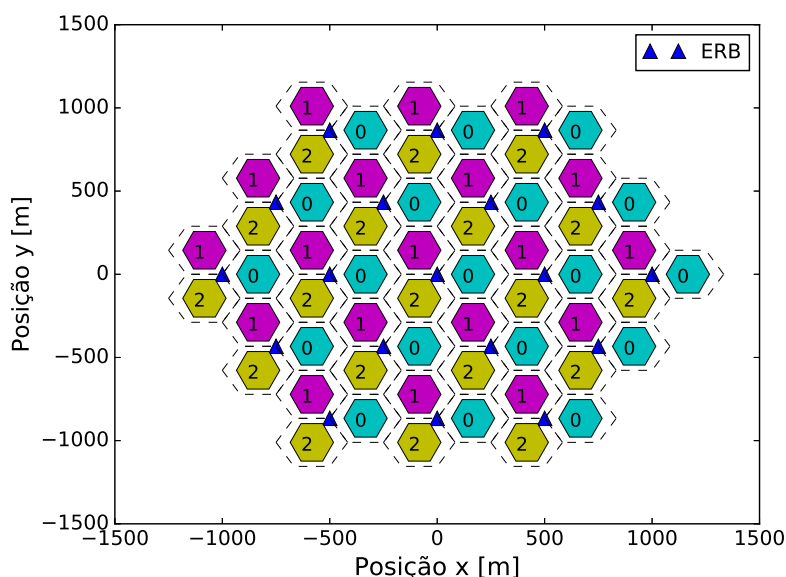


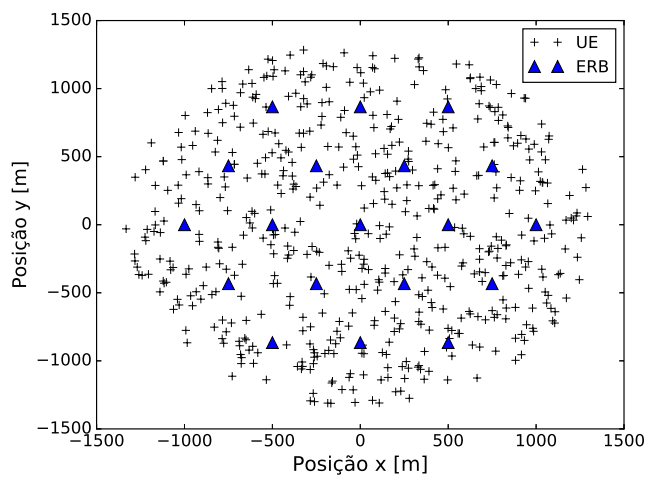
Figura 4.11: Esquema de reuso de frequência.

## 4.6 Distribuição Espacial dos EUs

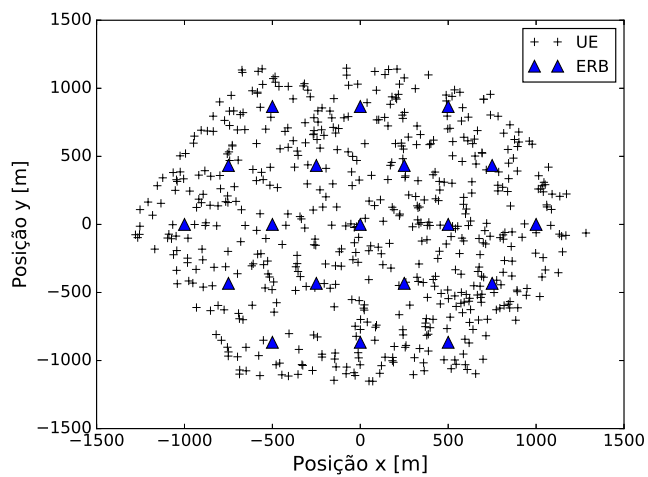
Para simular a comunicação entre ERB e EU, as posições dos usuários são definidas aleatoriamente com distribuição uniforme na região da *grid* ou *cluster* de células. A fim de melhor explorar as estatísticas relacionadas à localização dos usuários, os EUs podem ser dispostos em uma região circular, hexagonal ou quadrada na grade de *sites*.

A Figura 4.12 exibe cenários com 570 usuários distribuídos na região de cobertura do sistema, em que a distância *inter-site* é de 500 m. No caso da região circular (Figura 4.12(a)), o círculo que limita a área considerada para disposição de EUs tem raio igual à  $8R$ , em que  $R$  é o raio de uma célula. Para região hexagonal (Figura 4.12(b)), é considerado o hexágono que está inscrito ao círculo da região circular. Para o caso da região quadrada (Figura 4.12(c)) é utilizada a medida de  $16R$  para a largura do quadrado considerado.

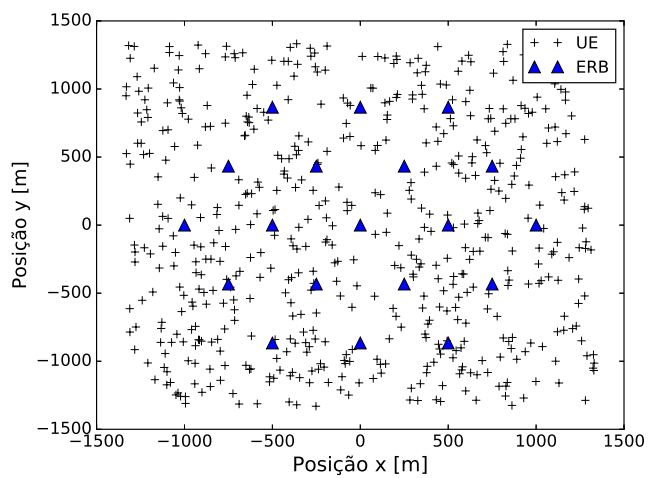




(a) Região Circular.



(b) Região Hexagonal.



(c) Região Quadrada.

Figura 4.12: Usuários distribuídos em diferentes tipos de região.

## 4.7 Conexão do EU com a ERB

Após as posições dos usuários serem definidas, cada EU realiza uma busca pela melhor célula. Para um EU a melhor célula é aquela que transmite o sinal que é recebido com a maior potência. Para isso, são consideradas todas as perdas em macroescala e pequena escala. Nesse contexto, dois cenários podem ser considerados para a simulação, o primeiro com limite de usuários por célula, e o segundo sem limite de usuários por célula ou com um limite maior do que o número médio de usuários por célula.

No cenário em que há um limite do número de EUs que podem se conectar a uma mesma célula, alguns usuários não poderão se conectar com a melhor célula, pois a célula identificada como melhor poderá ter atingido o número máximo de usuários conectados. Dessa forma, o usuário deverá realizar uma nova busca para identificar uma melhor célula dentre as que estão disponíveis.

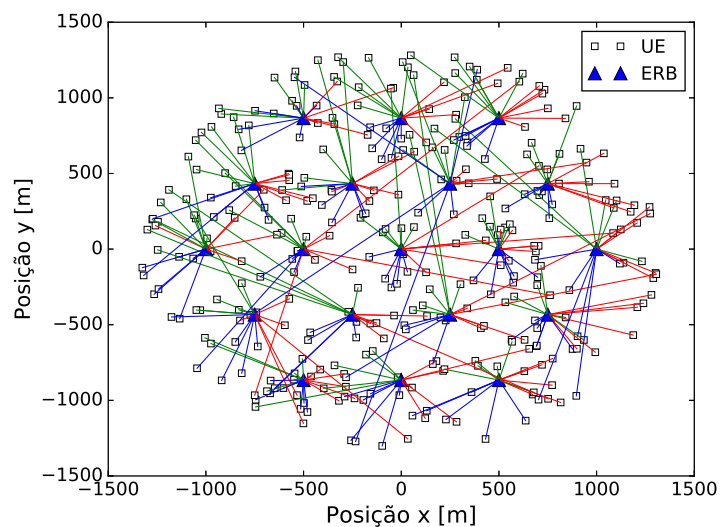
Essa situação é ilustrada na Figura 4.13(a), em que cada linha representa um enlace de descida entre ERB e EU, e as cores diferentes indicam as frequências de reuso utilizadas para cada célula. Os enlaces mais longos representam os casos dos usuários que ao ingressarem na área de cobertura do sistema celular já encontraram a melhor célula no limite da sua capacidade, e por isso, se conectaram com ERBs mais distantes.

Quando não há limite do número de usuários por célula, cada EU pode se conectar com a melhor célula identificada. Dessa forma, evita-se conexões de EU com ERBs muito distantes. Entretanto, o número de EUs por célula pode ficar desbalanceado, apresentando grandes diferenças entre o número de usuários conectados em cada célula. É importante notar que essa situação também ocorre sempre que o limite de usuários por célula é maior que o número médio de EUs por célula. Por exemplo, um sistema com 228 EUs distribuídos na área de cobertura com 57 células (média de quatro EU por célula) e o número máximo de EU por célula igual a 20. A Figura 4.13(b) exhibe a situação em que não há limite de usuários conectado por célula, observa-se que não ocorrem enlaces longos como no caso anterior. Porém, deve ser destacado que devido à presença de sombreamento nem sempre a melhor célula será a mais próxima.

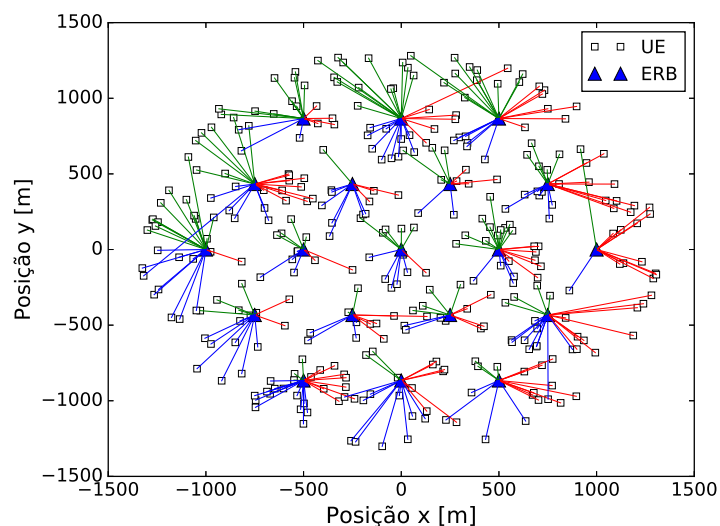
## 4.8 Modelo de Tráfego

O modelo de tráfego utilizado nas simulações é modelo de *buffer* cheio (*full buffer*). Esse modelo é amplamente utilizado em simulações SLS e foi escolhido devido a sua simplicidade [28].

No modelo de *buffer* cheio considera-se que cada usuário tem uma quantidade infinita de dados para transmitir (*uplink*) ou receber (*downlink*), mantendo assim o *buffer* sempre cheio. Além disso, nenhum processo de chegada ou partida é considerando, de forma



(a) Sistema com limite de 6 EU por célula.



(b) Sistema sem limite de EU por célula.

**Figura 4.13:** Modelos considerados para a conexão dos EUs, 342 distribuídos no área de cobertura.

que o número de usuários é constante. Esse modelo simula o comportamento semelhante ao do sistema no Horário de Maior Movimento (HMM) em sistemas celulares.

## 4.9 Modelo de Enlace para Sistema

Um modelo de enlace para sistema (L2S) é implementado para abstrair as simulações de nível de enlace (LLS). Baseado no método apresentado em [35], é utilizada a aproximação e truncamento da função de capacidade de Shannon para canais AWGN com largura de

banda de 1 Hz, dada por  $C(\gamma) = \log_2(1 + \gamma)$ . O modelo L2S mapeia a eficiência espectral do canal a partir da SINR  $\gamma$  de acordo com a seguinte função,

$$\mathcal{T}(\gamma) = \begin{cases} 0, & \gamma \leq \gamma_{min} \\ a_t C(\gamma), & \gamma_{min} \leq \gamma \leq \gamma_{max} \\ T_{max}, & \gamma \geq \gamma_{max} \end{cases}, \quad (4.13)$$

em que  $a_t$  é o fator de atenuação,  $T_{max}$  é a taxa máxima obtida para o *downlink* no canal de 1 Hz,  $\gamma_{min}$ ,  $\gamma_{max}$  são respectivamente, o menor e o maior valor de SINR. Buscando ajustar a curva de  $\mathcal{T}(\gamma)$  para obter uma aproximação do esquema de modulação e código (*Modulation and Code Scheme – MCS*) para o *downlink* do LTE (Tabela 4.6), os valores dos parâmetros foram definidos e são apresentados na Tabela 4.5.

**Tabela 4.5:** Parâmetros da função L2S.

| Parâm. | $a_t$ | $\gamma_{min}$ | $\gamma_{max}$ | $T_{max}$             |
|--------|-------|----------------|----------------|-----------------------|
| Valor  | 0.75  | -10 dB         | 20 dB          | 5.55 <i>bits/s/Hz</i> |

**Tabela 4.6:** Modelo MCS para LTE (*downlink*) [36].

| Índice | Ordem de Modulação | Taxa de Código<br>$\times(1/1024)$ | Eficiência Espectral<br>( <i>bits/s/Hz</i> ) | Limiar de SINR (dB)<br>(10% BLER) |
|--------|--------------------|------------------------------------|--|-----------------------------------|
| 1      | QPSK               | 78                                 | 0,1523                                       | -9.478                            |
| 2      | QPSK               | 120                                | 0,2344                                       | -6.658                            |
| 3      | QPSK               | 193                                | 0,3770                                       | -4.098                            |
| 4      | QPSK               | 308                                | 0,6016                                       | -1.798                            |
| 5      | QPSK               | 449                                | 0,8770                                       | 0.399                             |
| 6      | QPSK               | 602                                | 1,1758                                       | 2.424                             |
| 7      | 16QAM              | 378                                | 1,4766                                       | 4.489                             |
| 8      | 16QAM              | 490                                | 1,9141                                       | 6.367                             |
| 9      | 16QAM              | 616                                | 2,4063                                       | 8.456                             |
| 10     | 64QAM              | 466                                | 2,7305                                       | 10.266                            |
| 11     | 64QAM              | 567                                | 3,3223                                       | 12.218                            |
| 12     | 64QAM              | 666                                | 3,9023                                       | 14.122                            |
| 13     | 64QAM              | 772                                | 4,5234                                       | 15.849                            |
| 14     | 64QAM              | 873                                | 5,1152                                       | 17.786                            |
| 15     | 64QAM              | 948                                | 5,5547                                       | 19.809                            |

A Figura 4.14 exibe as curvas para  $C(\gamma)$ ,  $\mathcal{T}(\gamma)$  e para os valores discretos da Tabela 4.6. Nota-se que a função  $\mathcal{T}(\gamma)$  fornece uma boa aproximação para os valores obtidos para um canal com modulação e código adaptativo (*Adaptive Modulation and Coding – AMC*), os quais estão abaixo dos valores máximos teóricos fornecido por  $C(\gamma)$ .

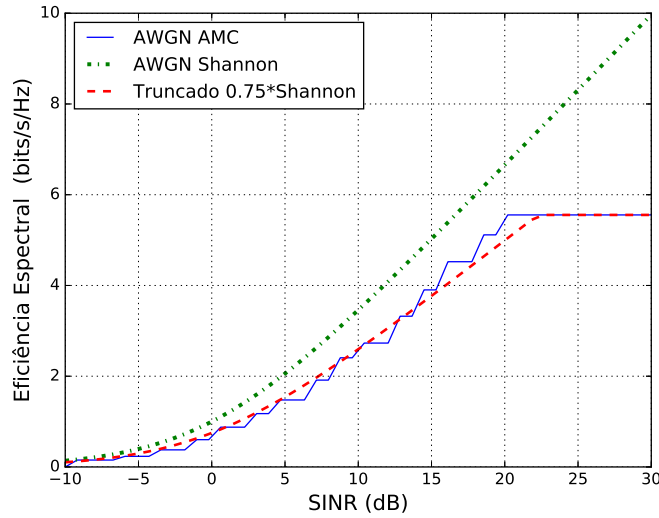


Figura 4.14: Modelo de enlace para SLS baseado em AMC.

Para calcular as taxas obtidas utilizando NOMA, a função  $\mathcal{T}(\gamma)$  é multiplicada pela largura da sub-banda, e a SINR é calculada pela Expressão 3.5. Dessa forma, para um usuário  $U_k$  em NOMA, a taxa obtida pelo modelo L2S é,

$$T_{N,k} = W_{SB} \mathcal{T} \left( \frac{a_k \gamma_k}{\gamma_k \sum_{i=0}^{k-1} a_i + 1} \right), \quad (4.14)$$

em que  $\gamma_k$  é a SINR obtida pela simulação para o usuário  $U_k$  alocado exclusivamente sobre uma sub-banda de largura  $W_{SB}$ .

## 4.10 Fluxo da Simulação

As simulações de sistema foram realizadas baseadas na técnica de Monte Carlo, seguindo as orientações dadas em [31], [29] e [33]. A lista dos valores de parâmetros utilizados nas simulações que não foram apresentados nas seções anteriores, estão na Tabela 4.7. As simulações foram realizadas considerando diferentes configurações de cenários, variando o número de usuário por célula e a potência de transmissão da célula para os usuários NOMA. Ao iniciar a simulação a rede celular é criada, as ERBs são ativadas, os mapas de sombreamento de cada *site* são carregados e o modelo de desvanecimento em pequena escala é gerado.

Para cada *snapshot* (ou evento de Monte Carlo) da simulação, um conjunto de EUs é distribuído uniformemente na região de cobertura do sistema. Em seguida, cada EU calcula a potência de sinal recebido a partir de cada célula no sistema, e então tenta se conectar à célula com o melhor nível de sinal. Considera-se fixo o número de EUs por célula.

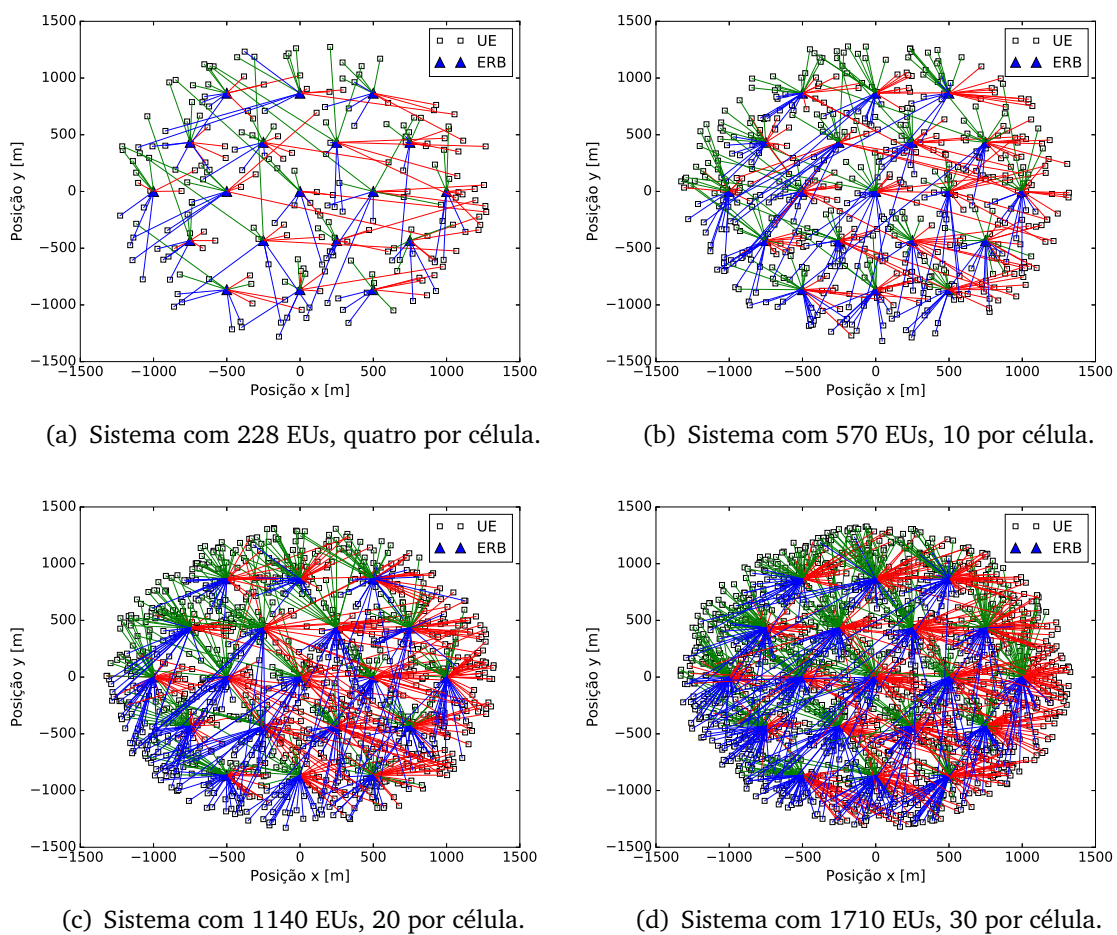
Tabela 4.7: Parâmetros de simulação.

| Parâmetros                           | Valores                          |
|--------------------------------------|----------------------------------|
| Largura de banda                     | 10 MHz                           |
| Frequência Portadora                 | 2 GHz                            |
| Distância entre ERBs                 | 500 m                            |
| Potência de transmissão da ERB       | 46 dBm                           |
| Número de antenas                    | SISO (1 x 1)                     |
| Modelo de propagação                 | Urbano                           |
| Máx. Desloc. Doppler                 | 9.27 Hz (5 km/h)                 |
| Número de usuários por célula        | $k = \{2, 4, 6, 8, 10, 20, 30\}$ |
| Dens. espectral de potência do ruído | -174 dBm/Hz                      |
| Fator de ruído no receptor           | 9 dB                             |
| Intervalo de trans.                  | TTI=1 ms                         |
| Distrib. de EU                       | Unifor. em área circular         |

Depois que todos os usuários estão conectados, formam-se os pares de EU em múltiplo acesso e atribuem-se as sub-bandas a cada par. Em seguida, uma célula é sorteada aleatoriamente, e então, a SINR de cada EU é calculada. A Figura 4.15 ilustra os sistemas e os enlaces formados com diferentes números de usuários.

Foi considerado que durante a execução de um *snapshot*, a ERB conseguiu manter a comunicação com os EUs por um segundo (1000 TTI de 1 ms). Durante um *snapshot* as características do ambiente em macroescala não sofrem alterações, como o sombreamento e posição do usuário. Entretanto, para cada intervalo de transmissão (*Transmission Time Interval*– TTI) ocorrem variações em pequena escala no canal devido ao efeito Doppler.

Dessa forma, os valores de SINR e a taxa de comunicação experimentada por cada EU é atualizada a cada TTI. Ao final de cada *snapshot*, as estatísticas são contabilizadas e os usuários são desconectados e removidos do cenário. A cada novo *snapshot* executado, os EUs são distribuídos em novas posições, a fim de coletar as estatísticas sobre a região de cobertura do sistema. Os resultados apresentados nesse trabalho foram obtidos simulando 10.000 eventos de Monte Carlo em cada cenário.



**Figura 4.15:** Sistemas com diferentes números de usuários conectados.

## CAPÍTULO 5

---

# Resultados

---

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos a partir de simulações computacionais da técnica NOMA no domínio da potência. Para melhor compreensão dos resultados obtidos, as Seções 5.1 e 5.2 apresentam uma pequena introdução às métricas utilizadas para investigar o comportamento das técnicas de acesso múltiplo abordadas neste trabalho.

### 5.1 Métricas de Avaliação da Capacidade do Sistema

O Capítulo 4 apresenta o modelo computacional utilizado para simular a comunicação do enlace de descida em um sistema celular. Para cada *snapshot* da simulação é calculada  $t_{k,m}$ , que é a taxa individual obtida pelo  $k$ -ésimo EU alocado à  $m$ -ésima sub-banda da célula, considerando todas as variações das técnicas de múltiplo acesso investigadas. A partir dessa taxa, calcula-se a eficiência espectral da célula  $\eta$  e a média amostral da taxa de dados por usuário  $\bar{t}$ , dadas respectivamente pelas expressões:

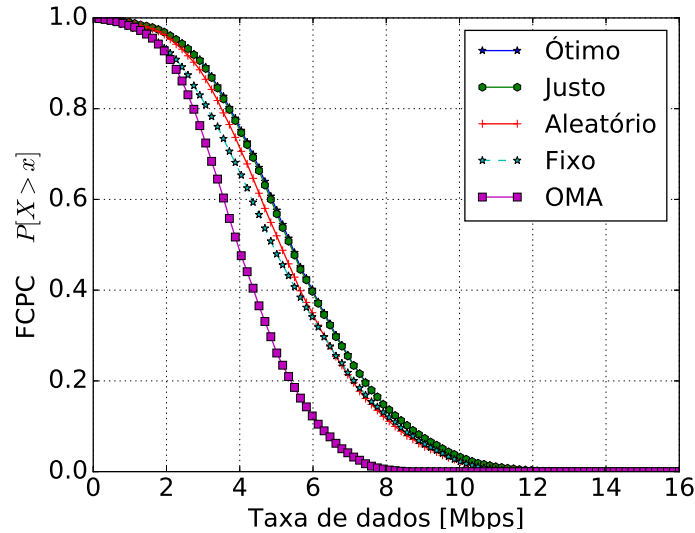
$$\eta = \frac{1}{W} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^2 t_{k,m} \quad (5.1)$$

$$\bar{t} = \frac{1}{2M} \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^2 t_{k,m}. \quad (5.2)$$

Na expressão 5.1,  $W$  é a largura de banda alocada pela célula, enquanto na expressão 5.2,  $M$  é o número de sub-bandas da célula. Ao final das simulações são obtidas aproximações da Função Cumulativa de Probabilidade (FCP), dada por  $P[X < x]$ , em que  $x$  é o valor da medida utilizada na avaliação e  $X$  é uma variável aleatória (v.a.) que representa os valores resultantes das simulações. Considerando as medidas  $\eta$  e  $\bar{t}$ , os valores da FCP entre 0% e 5% retornam as piores taxas obtidas, que são atribuídas aos EUs com piores condições de SINR. É definida em [26] a eficiência espectral dos usuários localizados na borda da célula tomando a FCP igual 5%. De forma semelhante, as maiores taxas são obtidas tomando



a FCP igual a 95%, e são atribuídas aos EUs mais próximos da ERB. A média da eficiência espectral é calculada a partir da distribuição de probabilidades extraída da FCP. A Figura 5.1 apresenta a FCP Complementar (FCPC) da taxa média do usuário calculada por diferentes técnicas de acesso múltiplo para o cenário com seis EUs alocados por célula.



**Figura 5.1:** Função Cumulativa de Probabilidade Complementar da taxa média por usuário para 6 EU por células.

## 5.2 Métrica de Avaliação de Justiça

Em sistemas de comunicações a distribuição justa de recursos é um importante parâmetro a ser avaliado, pois isso afeta diretamente a satisfação dos usuários, podendo incentivar ou desestimular o uso de determinada tecnologia. Para avaliar o nível de justiça entre as taxas proporcionadas para os usuários sob as diferentes formas de acesso múltiplo, é utilizado o índice de Jain [37], dado por

$$\mathcal{J}(\mathbf{x}) = \frac{(\sum_{i=1}^n x_i)^2}{n \sum_{i=1}^n x_i^2}. \quad (5.3)$$

O índice de Jain expressa o nível de justiça entre a distribuição de recursos para  $n$  indivíduos, em que  $x_i$  é uma medida associada aos recursos alocados ao  $i$ -ésimo indivíduo. Para o caso de maior igualdade na distribuição de recursos, o índice é  $\mathcal{J}(\{x_1, x_2, \dots, x_n\}) = 1$ . No caso de maior desigualdade, em que apenas um indivíduo detém todos os recursos, o índice assume o valor  $\frac{1}{n}$ .

Dado que as capacidades dos enlaces entre ERB e EUs são diferentes, a taxa individual obtida por cada EU não é uma boa medida de alocação de recursos para avaliação de justiça. Entretanto, como o pareamento de usuários em NOMA deve oferecer oportunidades

justas de ganho aos pares, a soma  $p_m = t_{1,m} + t_{2,m}$  das taxas dos usuários alocados na  $m$ -ésima sub-banda pode ser utilizada, e o índice de justiça calculado por  $\mathcal{J}(\{p_1, p_2, \dots, p_M\})$ . Baseado no critério definido na Seção 3.4, o índice de justiça proporcionado pela alocação de potência entre os usuários em NOMA é avaliado a partir da diferença entre a taxa obtida quando o usuário é alocado exclusivamente em uma sub-banda, e entre a taxa obtida quando o usuário compartilha a sub-banda em múltiplo acesso.

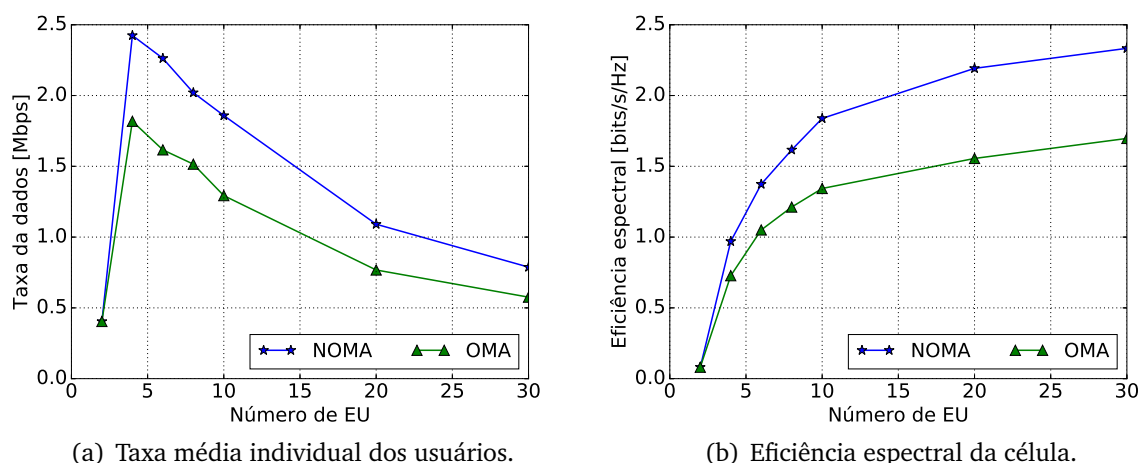
### 5.3 Comparação de Desempenho entre OMA e NOMA

Inicialmente foi realizada uma comparação entre NOMA no domínio da potência e OMA no domínio da frequência. Foram simulados cenários com diferentes números de usuários por célula, em que os pares são formados pelo método apresentado na Seção 3.5. Após cada par ser alocado a uma sub-banda, avaliam-se as métricas discutidas nas seções anteriores, calculando as medidas de avaliação para NOMA e OMA. Em NOMA cada usuário que forma o par utiliza todo o espectro da sub-banda, enquanto que a potência de transmissão é alocada de acordo com o critério apresentado em 3.4. Em OMA, tanto a banda em frequência quanto a potência de transmissão, são distribuídas igualmente entre os usuários.

A Figura 5.2(a) exibe a taxa de dados obtida para os usuários localizados na borda da célula, indicando que o aumento do número de EU na célula provoca uma redução na taxa individual dos usuários. Esse comportamento é esperado, uma vez que a potência total de transmissão e a largura de banda da célula são mantidos fixos. Entretanto, nota-se que em todos os casos as taxas obtidas em NOMA são superiores as taxas em OMA. A exceção ocorre apenas no caso em que há dois EUs por célula, no qual as taxas obtidas nas duas técnicas comparadas são muito próximas, e representam os menores valores obtidos. Nesse caso, os usuários experimentam baixos níveis de SINR e diferenças pouco significativas no ganho do canal (EU distante da ERB). Assim, considerando o coeficiente de alocação de potência, dado pela Expressão 3.42, um dos EUs experimenta a mesma taxa, tanto em NOMA quanto em OMA, enquanto o outro EU experimenta um pequeno ganho em NOMA. Além disso, como há apenas um par de usuários por sub-banda, não é possível explorar o ganho de diversidade multiusuário oferecida por NOMA.

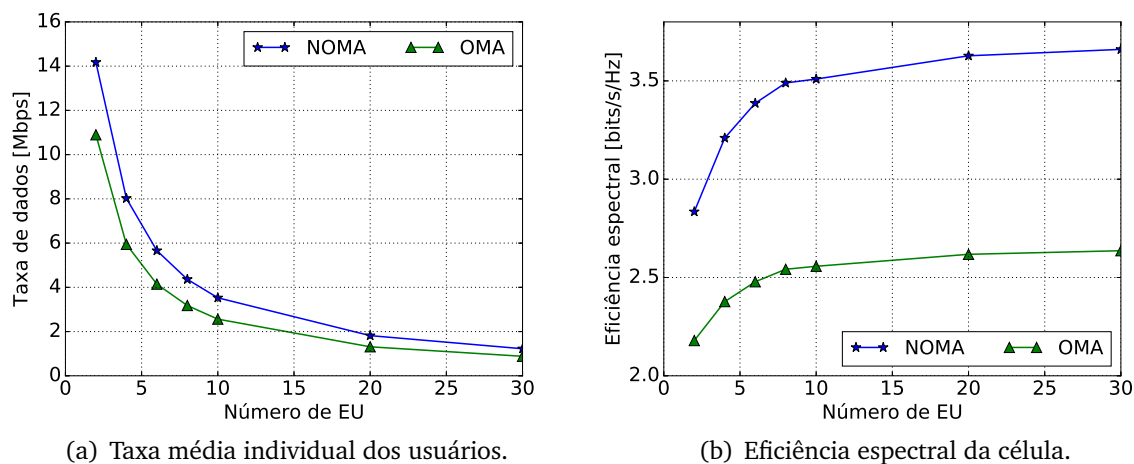
A eficiência espectral na região de borda da célula é representada na Figura 5.2(b) em função do número de EU por célula. Diferente do comportamento das taxas individuais dos usuários, a eficiência espectral da célula aumenta à medida que o número de EUs cresce. Isso indica que os recursos de frequência e potência são subutilizados quando há poucos usuários na célula, e que esses recursos podem ser melhor aproveitados aumentando o número de EUs com NOMA. Nota-se que técnica NOMA promove níveis de eficiência espectral superiores ao níveis obtidos em OMA.

A taxa individual média e a eficiência espectral média da célula são apresentadas na Figura 5.3. Assim como ocorreu no caso anterior, a taxa individual reduz com o aumento



**Figura 5.2:** Taxas e eficiência espectral na borda da célula em NOMA e OMA.

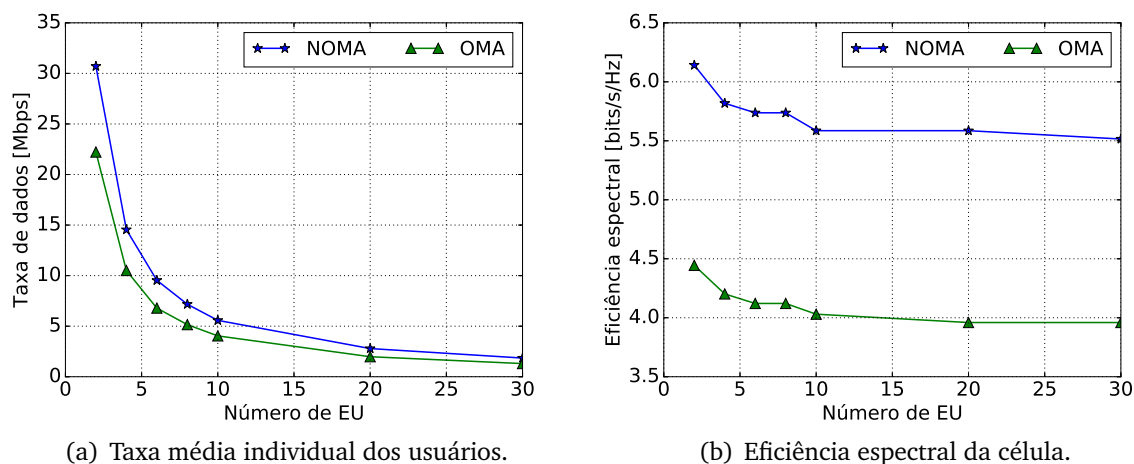
do número EU enquanto a eficiência espectral cresce. Entretanto, a taxa individual média apresenta um comportamento mais previsível, em que o valor máximo ocorre quando apenas dois EUs estão conectados à ERB. A Figura 5.3(b) indica que a diferença de desempenho entre NOMA e OMA é maior no caso médio, do que quando os usuários estão localizados na borda da célula.



**Figura 5.3:** Taxas e eficiência espectral média em NOMA e OMA.

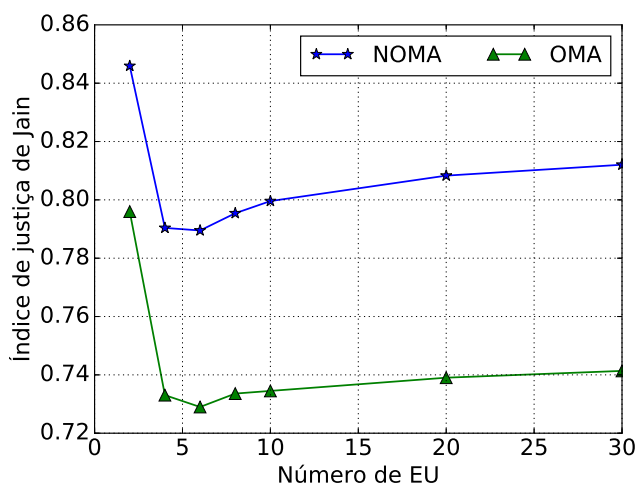
A partir dos resultados das simulações é possível avaliar as maiores taxas alcançadas individualmente pelos usuários e os maiores níveis de eficiência espectral fixando o valor da FCP em 95%. Esse valor é atribuído aos EUs localizados mais próximos da ERB e com maiores níveis de SINR. A Figura 5.4 mostra que NOMA proporciona taxas maiores e o uso mais eficiente dos recursos em todos os cenários. Nota-se que para a região próxima à ERB a eficiência espectral (Figura 5.4(b)) decresce lentamente com o aumento de EUs conectados. Essa redução ocorre devido ao aumento do número de usuários equilibrar a distribuição de recursos dentro da célula, reduzindo as grandes diferenças de ganho de canal

experimentadas quando há um número muito pequeno de usuários localizados próximos à ERB. Outra situação que favorece a ocorrência da eficiência máxima é o baixo nível de interferência a partir de outras células quando há poucos usuários no sistema.



**Figura 5.4:** Taxas e eficiência espectral próxima da ERB em NOMA e OMA.

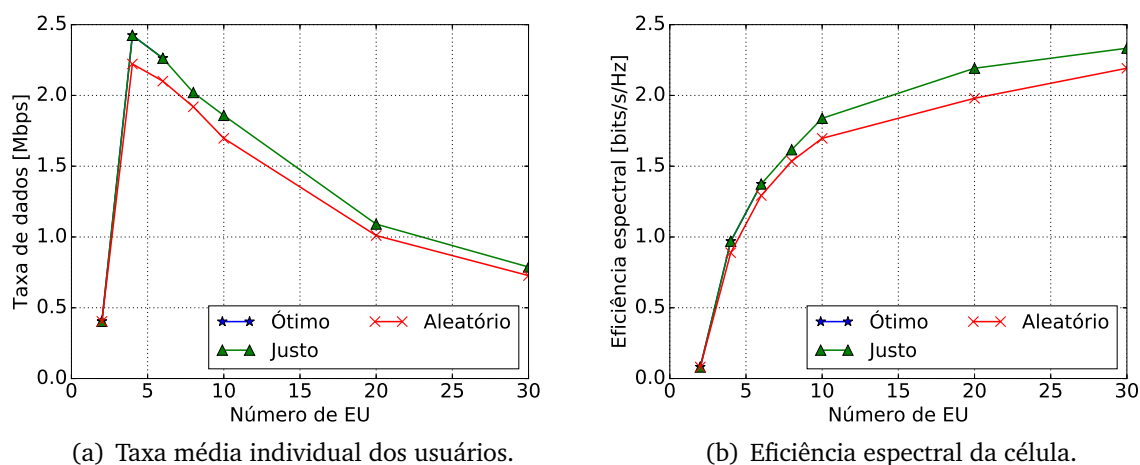
A Figura 5.5 apresenta um comparativo do nível de justiça na distribuição de recursos entre os usuários em NOMA e OMA, utilizando a medida de justiça apresentada na Seção 5.2. Em OMA, a sub-banda e a potência de transmissão são igualmente distribuídas. Apesar dessa abordagem parecer justa, ela não leva em consideração as diferenças de ganho de canal previamente estabelecidas pelas posições de cada EU na célula. Já em NOMA, o critério de justiça empregado na alocação de potência é baseado na SINR experimentada pelo EU, visando com isso, oferecer oportunidades justas para todos os usuários. Como resultado, verifica-se na Figura 5.5 que os valores calculados para o índice de Jain são maiores em NOMA do que em OMA. Isso indica que utilizando NOMA, a variação das taxas dos EUs é menor e o nível de justiça é mais alto.



**Figura 5.5:** Índice de justiça entre os usuários em NOMA e OMA.

## 5.4 Métodos de Pareamento

Após observar os ganhos de desempenho proporcionados pela técnica NOMA sobre OMA, são investigados alguns métodos de pareamento de usuários com escolha dos pares de maneira aleatória, ótima e justa. Um dos métodos de pareamento avaliados consiste em escolher aleatoriamente cada EU para compor os pares. O pareamento ótimo é feito com uma busca exaustiva, pela combinação de pares que proporcione a maior soma das taxas da célula. Devido à alta complexidade computacional exigida para realizar a busca completa pela melhor combinação de pares, esse método foi simulado apenas para os cenários com dois, quatro e seis usuários por célula. A estratégia de pareamento discutida e apresentada no Capítulo 3 busca maximizar a soma das taxas, ao mesmo tempo que todos os pares tenham chances justas de usufruir do ganho oferecido pela técnica NOMA. Por isso, essa abordagem é referida como pareamento justo. A Figura 5.6 exibe as taxas individuais e a eficiência espectral para os usuários na borda da célula. Nesse caso, o método de pareamento justo alcança resultados muito próximos do método ótimo e superior ao pareamento aleatório.



**Figura 5.6:** Taxas e Eficiência Espectral na borda da célula com diferentes métodos de pareamento.

A Figura 5.7(a) mostra que as três estratégias de pareamento avaliadas apresentam desempenho parecido para as taxas médias alcançadas pelos usuários. Entretanto, é possível notar que o pareamento justo apresenta uma leve vantagem sobre o pareamento aleatório. Já em relação a eficiência espectral, a comparação apresentada na Figura 5.7(b) mostra que o pareamento justo tem desempenho superior ao pareamento aleatório e muito próximo do pareamento ótimo. Assim como na região de borda da célula a eficiência espectral cresce com o aumento da quantidade e EU conectados.

Para os usuários próximos à ERB as técnicas de pareamento proporcionam taxas de usuários bem próximas, como indicam as curvas da Figura 5.8(a). Isso mostra, que nos casos em que os usuários experimentam bons níveis de SINR, a estratégia de pareamento

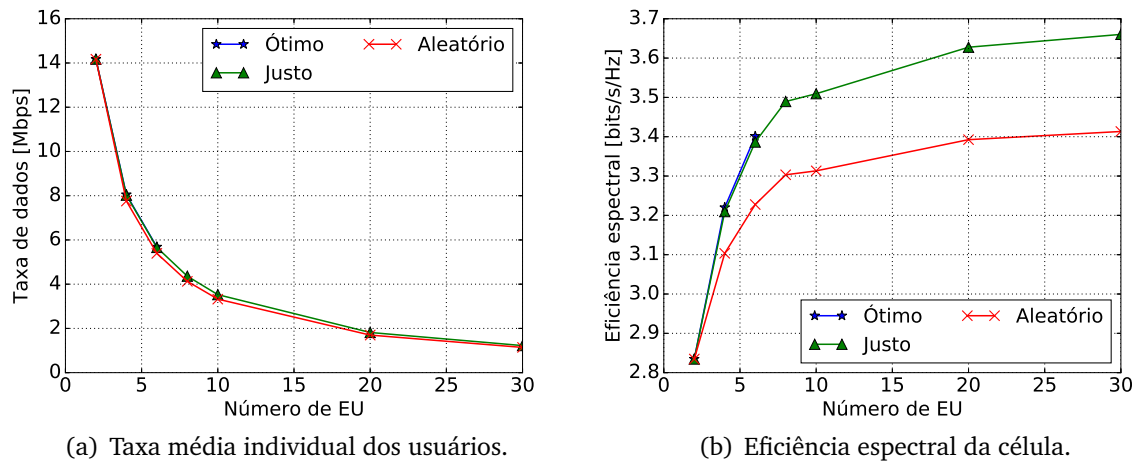


Figura 5.7: Taxas e eficiência espectral média com diferentes métodos de pareamento.

têm pouca influência sobre as taxas individuais alcançadas. Entretanto, os melhores níveis de eficiência espectral são obtidos utilizando o pareamento justo e o pareamento ótimo (Figura 5.6(b)).

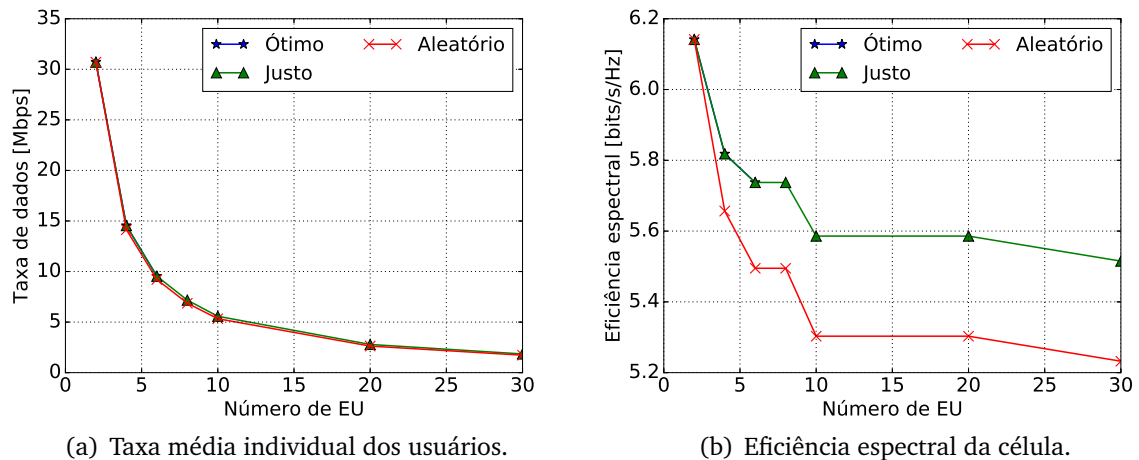


Figura 5.8: Taxas e eficiência espectral próximo à ERB com diferentes métodos de pareamento.

A partir da soma das taxas obtidas por cada par, avalia-se o nível de justiça proporcionados pela estratégia de pareamento. A Figura 5.9(a) mostra que o pareamento justo apresenta altos níveis de justiça, que sofrem pequenas reduções com o aumento do número de usuários. Deve ser destacado que o índice de Jain calculado apresenta valor unitário apenas no caso em que há um único par na célula. A Figura 5.9(b) mostra os índices de justiça obtidos a partir da diferença entre as taxas calculadas sem NOMA e com NOMA. Para avaliar as taxas alcançadas sem NOMA, o EU é alocado exclusivamente sobre uma sub-banda e utiliza todos os recursos reservados a ela. Observa-se que os índices do pareamento justo crescem com o aumento do número de usuários, enquanto que os índices obtidos para o pareamento aleatório diminuem.

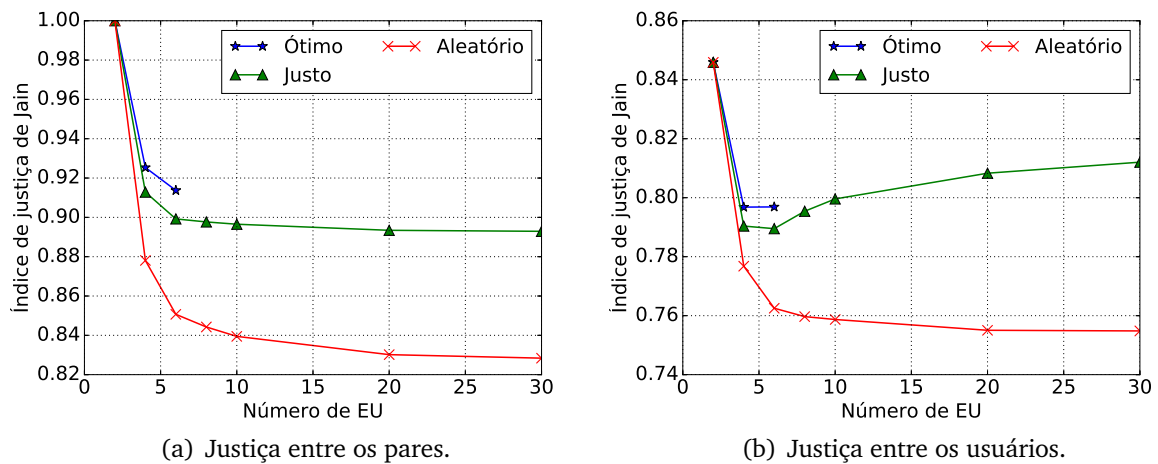


Figura 5.9: Índice de justiça de Jain para diferentes métodos de pareamento.

O método de pareamento justo apresenta os melhores resultados para as taxas individuais, eficiência espectral e níveis de justiça entre os usuários, quando comparado com o pareamento aleatório. Embora o pareamento ótimo apresente resultados iguais ou melhores que os resultados obtidos pelo pareamento justo, deve-se destacar que a complexidade computacional dessa técnica inviabiliza o seu uso em sistemas de comunicações. Para esse trabalho o pareamento ótimo foi implementado como um algoritmo de complexidade  $O(n!(n/2)2^{-(n/2)})$ , o que implica em um custo computacional muito mais alto do que o custo exigido pelo pareamento justo, o qual tem complexidade  $O(n \log n)$ .

## 5.5 Alocação de Potência

O método de alocação de potência entre os usuários em NOMA também é avaliado por meio das mesmas métricas utilizadas na seção anterior. Dois métodos distintos foram simulados, o primeiro consiste em utilizar um valor fixo para o coeficiente de alocação de potência, e portanto é referenciado como Fixo. O segundo método é referenciado como justo, pois utiliza a estratégia de alocação de potência apresentada na Seção 3.4. No caso da alocação com coeficiente fixo, foi adotado o valor  $\alpha = 0,2$ , escolhido com base em trabalhos anteriores [17] [3]. Para ambos os métodos de alocação de potência, foi utilizado o método de pareamento de usuários justo.

Os resultados para as taxas individuais dos usuários e eficiência espectral na borda da célula são exibidos na Figura 5.10(a) e Figura 5.10(a), respectivamente. Os valores médios calculados a partir das FCPs são exibidos na Figura 5.11. O comportamento das curvas é muito semelhante aos resultados que foram analisado na Seção 5.4, a eficiência espectral da célula aumenta com o crescimento do número de usuários, enquanto a taxa individual é reduzida. Nesse caso, nota-se que a diferença de desempenho entre as técnicas

de alocação de potência é maior do que a diferença entre os métodos de pareamento, esse comportamento é discutido na próxima seção.

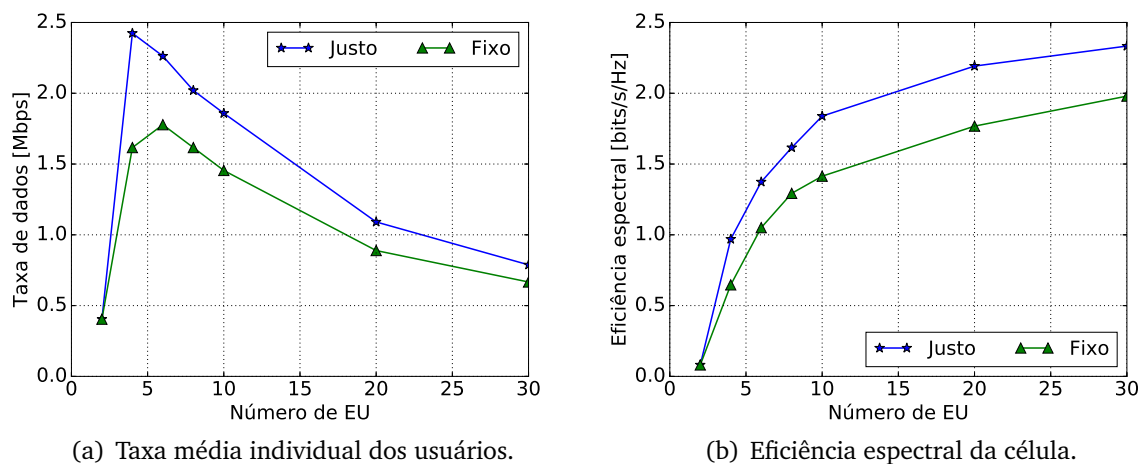


Figura 5.10: Taxas e eficiência espectral dos usuários na borda da célula para diferentes métodos de alocação de potência.

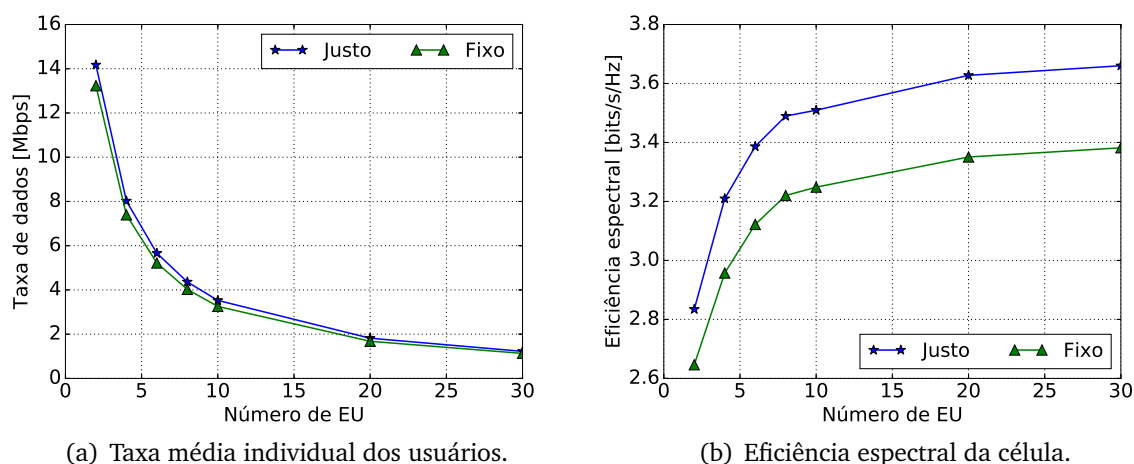
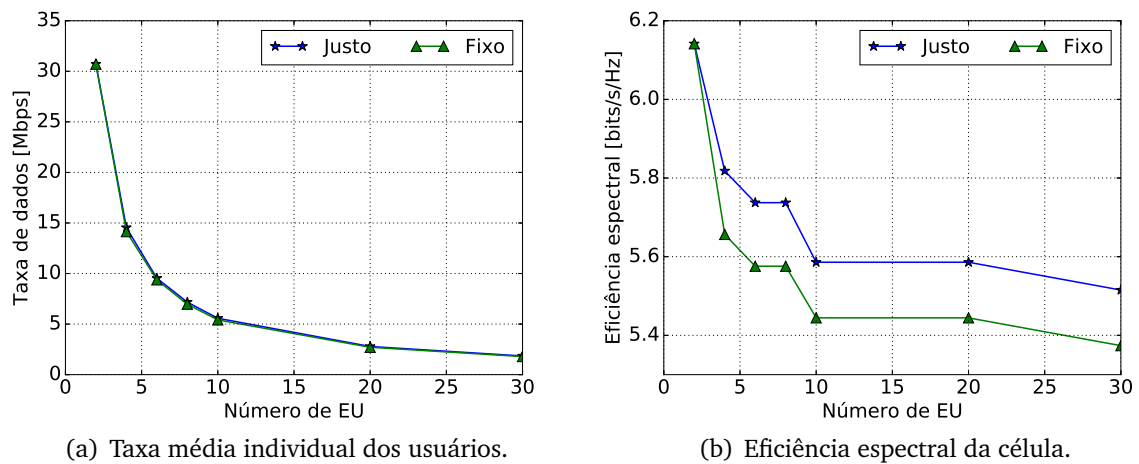


Figura 5.11: Taxas médias e eficiência espectral para diferentes métodos de alocação de potência.

Os resultados para os usuários próximos da ERB (FCP= 95%) são exibidos na Figura 5.12. Comparando os Figuras 5.8(b) e 5.12(b), é possível notar que as taxas alcançadas com pareamento justo e coeficiente de alocação de potência Fixo são maiores que as taxas obtidas com paramento aleatório e coeficiente de alocação de potência justo. Isso indica o método de pareamento tem uma influência maior sobre os valores máximos de eficiência espectral alcançados, do que o método de alocação de potência.

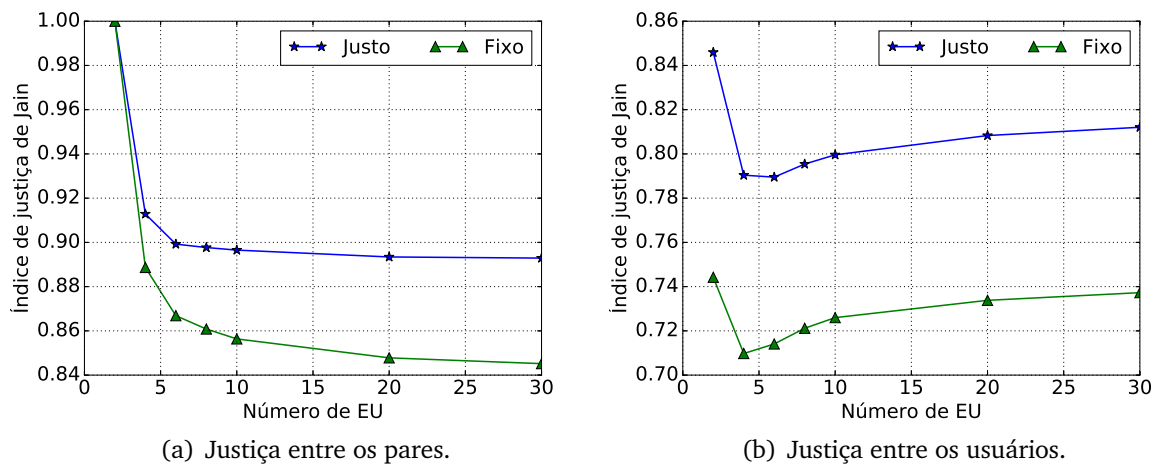
Os índices de justiça são apresentados na Figura 5.13, e os melhores níveis de justiça ocorrem quando é utilizado o pareamento justo e a alocação de potência com coeficiente justo. Comparando esses dados com os resultados da Seção 5.4, observa-se que o método de alocação de potência tem maior efeito sobre a medida de justiça entre os usuários. Por





**Figura 5.12:** Taxas dos usuários próximos da ERB para diferentes métodos de alocação de potência.

outro lado, o índice de justiça da soma das taxas entre os pares sofre maior influência da técnica de pareamento.



**Figura 5.13:** Índice de justiça de Jain para diferentes métodos de alocação de potência.

A técnica de alocação de potência com coeficiente fixo apresenta bom desempenho, sendo uma boa alternativa quando a ERB não tem conhecimento das condições do enlace com os usuários. Apesar disso, os resultados mostram que com baixo custo computacional é possível implementar a alocação de potência Justa, proporcionando aumento das taxas, e uso mais eficiente do espectro na região de cobertura da célula.

## 5.6 Potência de Transmissão da ERB

Foram realizadas simulações variando a potência de transmissão da ERB, para assim avaliar o comportamento de cada técnica sob diferentes cenários de consumo de energia e interferência. Os resultados são apresentados na Figura 5.14 para o caso em que há dez

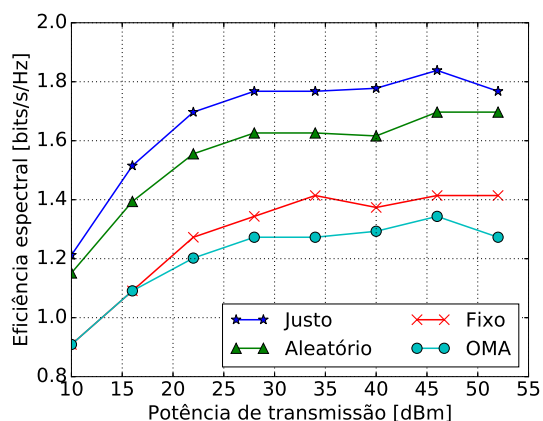
usuários por célula. Observa-se que na maior parte dos casos avaliados, o aumento da potência de transmissão implica o aumento da eficiência espectral da célula e também dos níveis de justiça na distribuição de recursos entre os usuários. Entretanto, a partir de um determinado ponto, a eficiência espectral da célula permanece igual com o aumento da potência de transmissão, e em alguns casos chega a sofrer reduções. Isso ocorre devido ao aumento da interferência entre diferentes células, o que limita as taxas alcançáveis por cada usuário.

As curvas de eficiência espectral que foram obtidas apresentam comportamento previsível, que é uma característica desejável, pois permite realizar alterações controladas no sistema. Por exemplo, é possível ajustar a potência de transmissão da ERB para gerenciar os níveis de interferência e o alcance da célula, conhecendo os impactos que isso irá causar no desempenho do sistema. Outro resultado interessante observado, é que os mesmos níveis de eficiência espectral obtidos em OMA com potência de transmissão de 45 dBm, podem ser alcançados em NOMA com a ERB transmitindo abaixo de 15 dBm. É possível verificar que para os casos apresentados na Figura 5.14(b) e na Figura 5.14(c), a potência de 10 dBm é o suficiente para superar as taxas alcançadas em OMA. Essa característica pode ser utilizada para economizar energia e reduzir interferência quando não houver demanda por altas taxas.

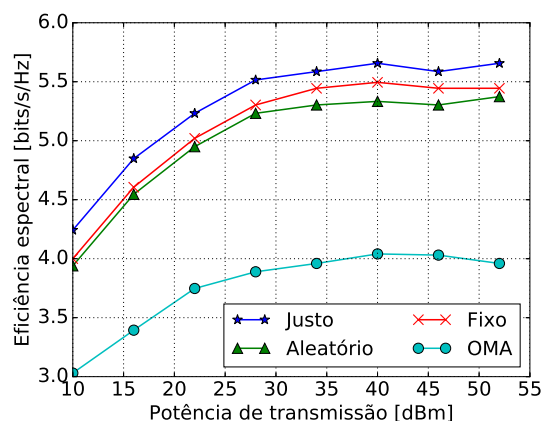
A Figura 5.14(d) apresenta os índices de justiça considerando as diferenças entre as taxas obtidas para o uso exclusivo e compartilhado da sub-banda. Os melhores índices de justiça são alcançados pelas técnicas NOMA que aplicam o método de alocação de potência justo. Isso indica os níveis de justiça são mais sensíveis ao método de alocação de potência do que à estratégia de pareamento. Entretanto, a Figura 5.14(b) mostra que as taxas mais altas são alcançadas pelas técnicas NOMA que implementam o pareamento justo. Portanto, a estratégia de pareamento define o valor máximo a ser alcançado em NOMA, enquanto a alocação de potência define os valores médios das taxas e o nível de justiça na distribuição de recursos.

Na Figura 5.14(d), nota-se que para valores altos de potência de transmissão, os níveis de justiça para a técnica NOMA com alocação de potência fixa são menores que os índices para OMA. Nesse caso, tanto OMA quanto NOMA alocam porções fixas da potência para os usuários em múltiplo acesso. Com o aumento da intensidade do sinal transmitido, as diferenças de SINR entre os usuários são reduzidas, favorecendo a distribuição de potência igualitárias feita em OMA.

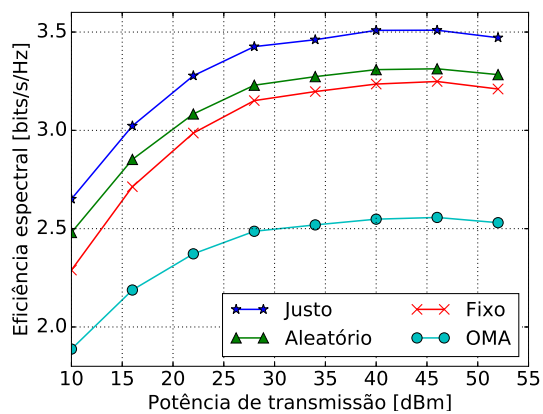
Para todos os casos avaliados a técnica NOMA com pareamento justo e alocação justa de potência apresenta o melhor desempenho, tanto em eficiência espectral quanto em índices de justiça. Os resultados exibidos na Figura 5.14(c) indicam que com potência de transmissão acima de 10 dBm no enlace de descida, essa técnica já satisfaz os requisitos da eficiência espectral por célula da União Internacional de Telecomunicações (*International Telecommunication Union – ITU*), que é de 2.6 bits/s/Hz para a microcélula e 2.2 bits/s/Hz



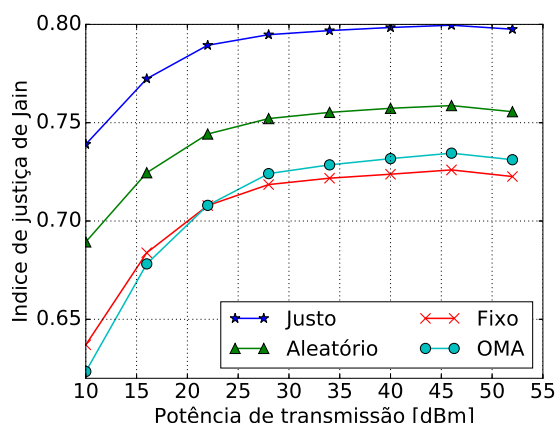
(a) Usuários na borda da célula FCP= 5%.



(b) Usuários próximos da ERB FCP= 95%.



(c) Valores médios totais da célula.



(d) Justiça entre os usuários.

**Figura 5.14:** Desempenho das técnicas de acesso múltiplo em função da potência de transmissão da ERB.

para cobertura urbana. Da mesma forma, a partir dos resultados apresentados nas seções anteriores, é possível verificar que os requisitos para eficiência espectral do usuário na borda da célula, de 0.075 bits/s/Hz para microcélula e 0.06 bits/s/Hz para cobertura urbana, são facilmente superados com NOMA [26].

## CAPÍTULO 6

---

# Conclusão

---

Esta dissertação apresentou um estudo sobre as estratégias de pareamento de usuários e alocação de potência para a técnica de múltiplo acesso não-ortogonal no domínio da potência aplicada ao enlace de descida de sistemas de comunicações móveis. Foi realizada uma análise do comportamento da técnica NOMA, apresentando propriedades importantes para guiar e definir formas de alcançar ganho de desempenho e melhores níveis de eficiência espectral. O estudo desenvolvido permitiu identificar e propor um método de alocação de potência simples e de baixa complexidade computacional, que atende ao critério de justiça estabelecido.

Para avaliar o desempenho das técnicas de UPPA aplicadas em um sistema celular, foi necessário desenvolver um simulador SLS para sistemas celulares. O simulador implementa os modelos de perdas em larga escala e em pequena escala para o *downlink* de um sistema com até 57 células. Apesar de originalmente ter sido desenvolvido apenas como ferramenta para viabilizar a pesquisa, esse simulador pode ser utilizado em outros estudos e é distribuído como *software* livre sem restrições de uso para a pesquisa. Portanto, pode ser apontado como uma importante contribuição da dissertação trabalho.

Utilizando o simulador foi possível avaliar o comportamento do sistema NOMA em diferentes cenários multicelula e multiusuário. Foi realizada uma comparação de desempenho entre os métodos de UPPA em NOMA e OMA. Com isso, foi possível verificar que NOMA proporciona ganho nas taxas alcançadas pelos os usuários, quando comparado com OMA. Os resultados mostram também que NOMA utiliza a diversidade multiusuário para aumentar a eficiência espectral média da célula, até mesmo na região de borda. Os resultados indicam ainda, que em NOMA é possível atingir uma taxa de dados alvo com uma potência de transmissão menor, quando comparada com a potência requerida em OMA. Portanto, NOMA pode promover redução do consumo de energia das ERBs, e conseqüentemente, a redução de interferência a partir de outras células.

A principal contribuição obtida com este trabalho de pesquisa é o critério de justiça para usuários NOMA que foi proposto, e o cálculo do coeficiente de alocação de potência

baseado neste critério. De fato, os resultados mostram que o coeficiente de alocação de potência proposto proporciona uma distribuição justa das oportunidades de ganho oferecido por NOMA entre os usuários. Além disso, utilizando esse mesmo coeficiente é possível obter os melhores níveis de eficiência espectral. De forma geral, os métodos de pareamento de usuários mostraram ter maior influência na determinação das taxas máximas alcançáveis, enquanto o método de alocação de potência tem efeitos mais significativos sobre as taxas médias e os níveis de justiça entre os usuários.

## 6.1 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros considera-se avaliar o desempenho da técnica UPPA proposta com diferentes modelos de tráfego, e o comportamento dessa técnica em função do tempo. Além disso, pretende-se trabalhar com outras frentes de pesquisa em NOMA como, o acesso múltiplo para o enlace de subida, a detecção de mensagens utilizando SIC e a segurança da informação aplicada a sistemas NOMA.

Pretende-se avaliar o uso de NOMA no enlace de subida (*uplink*) dos sistemas celulares, estudando e propondo estratégias que ofereçam ganho de desempenho. Para validar os resultados desse estudo, será necessário adicionar ao simulador SLS o suporte à simulações de comunicação no *uplink*.

A segurança da informação transmitida em NOMA é um importante tópico de pesquisa, e deve ser estudada em trabalhos futuros. A principal motivação surge do fato que um usuário NOMA deve decodificar a mensagem destinada a outros usuários para aplicar SIC e obter a mensagem destinada a ele. Dessa forma, é importante investigar formas de garantir a integridade, privacidade e autenticidade das mensagens enviadas em NOMA.

## 6.2 Publicações

A partir dos resultados desta dissertação, os seguintes artigos foram produzidos e submetidos para apresentação em eventos.

### 6.2.1 Trabalhos Apresentados

- J. E. Cordeiro Junior, J. V. Dos Santos Filho e M. S. Alencar. *Avaliação de Desempenho do Acesso Múltiplo Não Ortogonal no Domínio da Potência*. VIII Conferência Nacional em Comunicações, Redes e Segurança da Informação – ENCOM 2018, Salvador – BA, 19-21 de outubro de 2018.
- J. E. Cordeiro Junior, J. V. Dos Santos Filho e M. S. Alencar. *Simulação de Sistemas de Comunicações Móveis com Software Livre*. VIII Conferência Nacional em Comunicações,

---

Redes e Segurança da Informação – ENCOM 2018, Salvador – BA, 19-21 de outubro de 2018.

### 6.2.2 Trabalho Aprovado para Workshop

- J. E. Cordeiro Junior, J. V. Dos Santos Filho e M. S. Alencar. *A Fair Power Allocation for Non-Orthogonal Multiple Access in the Power Domain*. IEEE Latin-American Conference on Communications – IEEE LATINCOM 2018, Guadalajara, Mexico, 14-16 de Novembro de 2018.

---

---

## Referências Bibliográficas

---

- [1] C. X. Wang, F. Haider, X. Gao, X. H. You, Y. Yang, D. Yuan, H. M. Aggoune, H. Haas, S. Fletcher, and E. Hepsaydir. Cellular architecture and key technologies for 5g wireless communication networks. *IEEE Communications Magazine*, 52(2):122–130, February 2014. ISSN 0163-6804. doi: 10.1109/MCOM.2014.6736752.
- [2] A. Gupta and R. K. Jha. A survey of 5g network: Architecture and emerging technologies. *IEEE Access*, 3:1206–1232, 2015. ISSN 2169-3536. doi: 10.1109/ACCESS.2015.2461602.
- [3] A. Benjebbour, Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Li, A. Harada, and T. Nakamura. Concept and practical considerations of non-orthogonal multiple access (noma) for future radio access. In *2013 International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communication Systems*, pages 770–774, Nov 2013. doi: 10.1109/ISPACS.2013.6704653.
- [4] Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Benjebbour, T. Nakamura, A. Li, and K. Higuchi. Non-orthogonal multiple access (noma) for cellular future radio access. In *2013 IEEE 77th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5, June 2013. doi: 10.1109/VTCSpring.2013.6692652.
- [5] Z. Ding, Z. Yang, P. Fan, and H. V. Poor. On the performance of non-orthogonal multiple access in 5g systems with randomly deployed users. *IEEE Signal Processing Letters*, 21(12):1501–1505, Dec 2014. ISSN 1070-9908. doi: 10.1109/LSP.2014.2343971.
- [6] K. Higuchi and A. Benjebbour. Non-orthogonal multiple access (noma) with successive interference cancellation for future radio access. *IEICE Transactions on Communications*, E98.B(3):403–414, Mar 2015. doi: 10.1587/transcom.E98.B.403.
- [7] M. S. de Alencar. *Telefonia Celular Digital*, volume 1. Ed. Érica, São Paulo, Brasil, 3 edition, 2013.
- [8] Theodore S. Rappaport. *Comunicações Sem Fio: Princípios e Práticas*. Pearson Prentice Hall, São Paulo, 2 edition, 2009.

- [9] C. Ciochina and H. Sari. A review of ofdma and single-carrier fdma. In *2010 European Wireless Conference (EW)*, pages 706–710, April 2010. doi: 10.1109/EW.2010.5483464.
- [10] T. M. Cover. Comments on broadcast channels. *IEEE Transactions on Information Theory*, 44(6):2524–2530, Oct 1998. ISSN 0018-9448. doi: 10.1109/18.720547.
- [11] T. M. Cover and J. A. Thomas. *Elements of Information Theory (Wiley Series in Telecommunications and Signal Processing)*. Wiley-Interscience, 2006. ISBN 0471241954.
- [12] A. Benjebbour, A. Li, Y. Saito, Y. Kishiyama, A. Harada, and T. Nakamura. System-level performance of downlink noma for future lte enhancements. In *2013 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pages 66–70, Dec 2013. doi: 10.1109/GLOCOMW.2013.6824963.
- [13] Y. Saito, A. Benjebbour, Y. Kishiyama, and T. Nakamura. System-level performance of downlink non-orthogonal multiple access (noma) under various environments. In *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5, May 2015. doi: 10.1109/VTCSpring.2015.7146120.
- [14] Y. Liu, G. Pan, H. Zhang, and M. Song. On the Capacity Comparison Between MIMO-NOMA and MIMO-OMA. *IEEE Access*, 4:2123–2129, 2016. ISSN 2169-3536. doi: 10.1109/ACCESS.2016.2563462.
- [15] N. Otao, Y. Kishiyama, and K. Higuchi. Performance of non-orthogonal access with sic in cellular downlink using proportional fair-based resource allocation. In *2012 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)*, pages 476–480, Aug 2012. doi: 10.1109/ISWCS.2012.6328413.
- [16] F. Liu, P. Mähönen, and M. Petrova. Proportional fairness-based user pairing and power allocation for non-orthogonal multiple access. In *2015 IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*, pages 1127–1131, Aug 2015. doi: 10.1109/PIMRC.2015.7343467.
- [17] J. He, Z. Tang, and Z. Che. Fast and efficient user pairing and power allocation algorithm for non-orthogonal multiple access in cellular networks. *Electronics Letters*, 52(25):2065–2067, 2016. ISSN 0013-5194. doi: 10.1049/el.2016.3670.
- [18] S. Timotheou and I. Krikidis. Fairness for non-orthogonal multiple access in 5g systems. *IEEE Signal Processing Letters*, 22(10):1647–1651, Oct 2015. ISSN 1070-9908. doi: 10.1109/LSP.2015.2417119.



- [19] J. Guo, X. Wang, J. Yang, J. Zheng, and B. Zhao. User pairing and power allocation for downlink non-orthogonal multiple access. In *2016 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pages 1–6, Dec 2016. doi: 10.1109/GLOCOMW.2016.7849074.
- [20] J. A. Oviedo and H. R. Sadjadpour. A new noma approach for fair power allocation. In *2016 IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pages 843–847, April 2016. doi: 10.1109/INFCOMW.2016.7562194.
- [21] J. Wang, H. Xu, L. Fan, B. Zhu, and A. Zhou. Energy-efficient joint power and bandwidth allocation for noma systems. *IEEE Communications Letters*, 22(4):780–783, April 2018. ISSN 1089-7798. doi: 10.1109/LCOMM.2018.2794521.
- [22] D. Ni, L. Hao, X. Qian, and Q. T. Tran. Energy-spectral efficiency tradeoff of downlink noma system with fairness consideration. In *2018 IEEE 87th Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, pages 1–5, June 2018. doi: 10.1109/VTCSpring.2018.8417647.
- [23] Qian Liu, Fangqing Tan, Tiejun Lv, and Hui Gao. Energy efficiency and spectral-efficiency tradeoff in downlink noma systems. In *2017 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops)*, pages 247–252, May 2017. doi: 10.1109/ICCW.2017.7962665.
- [24] T. Manglayev, R. C. Kizilirmak, and Y. H. Kho. Optimum power allocation for non-orthogonal multiple access (noma). In *2016 IEEE 10th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*, pages 1–4, Oct 2016. doi: 10.1109/ICAICT.2016.7991730.
- [25] P. Xu and K. Cumanan. Optimal power allocation scheme for non-orthogonal multiple access with  $\alpha$ -fairness. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 35(10): 2357–2369, Oct 2017. ISSN 0733-8716. doi: 10.1109/JSAC.2017.2729780.
- [26] International Telecommunication Union (ITU). Requirements related to technical performance for imt-advanced radio interface(s). Itu-r m.2134-1, ITU, December 2008.
- [27] William Tranter, K. Shanmugan, Theodore Rappaport, and Kurt Kosbar. *Principles of Communication Systems Simulation with Wireless Applications*. Prentice Hall Press, Upper Saddle River, NJ, USA, first edition, 2003. ISBN 0134947908.
- [28] Pablo Ameigeiras, Yuanye Wang, Jorge Navarro-Ortiz, Preben E. Mogensen, and Juan M. Lopez-Soler. Traffic models impact on ofdma scheduling design. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2012(1):61, Feb 2012. ISSN 1687-1499. doi: 10.1186/1687-1499-2012-61. URL <https://doi.org/10.1186/1687-1499-2012-61>.

- [29] Josep Colom Ikuno. *System Level Modeling and Optimization of the LTE Downlink*. Dissertation, Vienna University of Technology – Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Vienna, Austria, 2012.
- [30] Eric Jones, Travis Oliphant, Pearu Peterson, et al. SciPy: Open source scientific tools for Python, 2001–. URL <http://www.scipy.org/>. [Online; accessed <today>].
- [31] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Evolved universal terrestrial radio access (e-utra); radio frequency (rf) system scenarios (release 14). TR 36.942 V14.0.0, 3GPP, March 2017.
- [32] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Further advancements for e-utra physical layer aspects. TR 36.814 V9.0.0, 2010.
- [33] International Telecommunication Union (ITU). Guidelines for evaluation of radio interface technologies for imt-advanced. Itu-r m.2135-1, ITU, December 2009.
- [34] H. Claussen. Efficient modelling of channel maps with correlated shadow fading in mobile radio systems, Sep 2005. ISSN 2166-9570.
- [35] 3rd Generation Partnership Project (3GPP). Physical layer aspects for evolved universal terrestrial radio access (utra). TR 25.814 V7.1.0, 2006.
- [36] J. Fan, Q. Yin, G. Y. Li, B. Peng, and X. Zhu. Mcs selection for throughput improvement in downlink lte systems. In *2011 Proceedings of 20th International Conference on Computer Communications and Networks (ICCCN)*, pages 1–5, July 2011. doi: 10.1109/ICCCN.2011.6005743.
- [37] H. SHI, R. V. Prasad, E. Onur, and I. G. M. M. Niemegeers. Fairness in wireless networks: issues, measures and challenges. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, 16(1):5–24, First 2014. ISSN 1553-877X. doi: 10.1109/SURV.2013.050113.00015.