



Christian Fragoas Fernandez Rodrigues

**Simulação de Redes de Acesso rádio:
posicionamento de estações base e alocação de
recursos usando um critério de utilidade**

Tese de Doutorado

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, do Departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio.

Orientador : Prof. Luiz da Silva Mello

Co-orientador: Prof. Lisandro Lovisolo

Rio de Janeiro
Março de 2023

Christian Fragoas Fernandez Rodrigues

**Simulação de Redes de Acesso rádio:
posicionamento de estações base e alocação de
recursos usando um critério de utilidade**

Tese apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de
Doutor pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica
da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo:

Prof. Luiz da Silva Mello

Orientador

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Lisandro Lovisolo

Departamento de Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações

– UERJ

Prof. Alan Conci Kubrusly

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Marco Antonio Grivet Mattoso Maia

Departamento de Engenharia Elétrica – PUC-Rio

Prof. Charles Casimiro Cavalcanti

Departamento de Engenharia de Teleinformática – UFC

Prof. Francisco Rodrigo Porto Cavalcanti

Departamento de Engenharia de Teleinformática – UFC

Prof. Paulo Cardieri

Departamento de Comunicações – Unicamp

Rio de Janeiro, 24 de Março de 2023

Todos os direitos reservados. A reprodução, total ou parcial do trabalho, é proibida sem a autorização da universidade, do autor e do orientador.

Christian Fragoas Fernandez Rodrigues

Graduado em Engenharia Elétrica com Ênfase em Telecomunicações pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Mestre em Engenharia Eletrônica pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

Ficha Catalográfica

Rodrigues, Christian Fragoas Fernandez

Simulação de Redes de Acesso rádio: posicionamento de estações base e alocação de recursos usando um critério de utilidade / Christian Fragoas Fernandez Rodrigues; orientador: Luiz da Silva Mello; co-orientador: Lisandro Lovisolo. – 2023.

138 f: il. color. ; 30 cm

Tese (doutorado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Elétrica, 2023.

Inclui bibliografia

1. Telecomunicações – Teses. 2. Redes de Acesso por Rádio. 3. Simulação. 4. Arranjos de Estações Base. 5. Alocação de Recursos de Rádio. 6. Utilidade. I. Silva Mello, Luiz. II. Lovisolo, Lisandro. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica. IV. Título.

CDD: 621.3

À minha querida família e aos meus preciosos amigos,
cujo amor, apoio e companhia foram essenciais para que eu pudesse trilhar
este caminho com confiança e determinação.

Agradecimentos

À Capes e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

Aos meus amigos Jonathan de Oliveira, Pedro Henrique e Manuchi Dansa por todo apoio, paciência e compreensão.

Aos meus pais e minha avó, pela educação, atenção e carinho de todas as horas.

À minha esposa Eleonora Cominato Weiner pelo apoio incondicional, paciência, orientação e por todo o amor que me ajudaram a superar todas as dificuldades.

Aos meus orientadores Professor Luiz da Silva Mello e Professor Lisandro Lovisollo pelo estímulo e parceria para a realização deste trabalho.

Aos professores que participaram da Comissão examinadora.

A todos os professores e funcionários do Departamento pelos ensinamentos e pela ajuda.

A todos os amigos e familiares que de uma forma ou de outra me estimularam ou me ajudaram.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Resumo

Rodrigues, Christian Fragoas Fernandez; Silva Mello, Luiz; Lovisolo, Lisandro. **Simulação de Redes de Acesso rádio: posicionamento de estações base e alocação de recursos usando um critério de utilidade**. Rio de Janeiro, 2023. 138p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Esta tese apresenta um simulador para avaliação de desempenho de uma rede de acesso por rádio 5G. O simulador, Sama¹, permite definir os modelos de equipamentos das estações base com múltiplos setores e conformação de feixes (*beamforming*), os arranjos de estações base da rede, os equipamentos dos usuários, a distribuição de usuários na área de serviço, e pode empregar diferentes algoritmos de alocação dos recursos tempo-frequenciais, dentre outro parâmetros customizáveis. O simulador produz diversos indicadores de desempenho da rede de acesso, como condições de canal, taxas/capacidades de dados, latências, e satisfação dos usuários, em diversos níveis hierárquicos (por estações base, seus setores, ou feixes). As funcionalidades do simulador são demonstradas considerando diversos casos de uso de redes 5G. Propõe-se metodologias para alocação de posições de estações base, isto é, para encontrar bons arranjos de estações base. Propõe-se uma metodologia heurística baseada em critérios de projeto para redes de radiodifusão. Para redes de acesso celular apresenta-se uma metodologia baseada em agrupamentos (*clusters*) das posições dos UEs. Por fim, nesta tese, apresenta-se um algoritmo de alocação de recursos de tempo-frequência baseado em um critério de utilidade para alocar recursos tempo-frequenciais em redes de acesso por rádio 5G considerando as demandas de capacidade dos usuários. A partir da demanda individual de um terminal, estima-se qual a utilidade em servi-lo e, a partir disso, ordenam-se os terminais em um setor e alocam-se os recursos de tempo-frequência. O algoritmo de alocação de recursos apresentado obtém resultados competitivos e muitas vezes melhores que algoritmos de alocação conhecidos.

Palavras-chave

Redes de Acesso por Rádio; Simulação; Arranjos de Estações Base; Alocação de Recursos de Rádio; Utilidade.

¹“Sama” é a palavra em Tupi para corda/cabo; como também é o acrônimo para *Simulation and Analysis of Mobile Access*.

Abstract

Rodrigues, Christian Fragoas Fernandez; Silva Mello, Luiz (Advisor); Lovisolo, Lisandro (Co-Advisor). **Simulation of radio access networks: base stations positioning and resource allocation using utility criteria**. Rio de Janeiro, 2023. 138p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This thesis presents a simulator for evaluating the performance of a 5G radio access network. The simulator, called Sama², allows for defining the equipment models of base stations with multiple sectors and beamforming, the arrangement of base stations in the network, the user equipment, the distribution of users in the service area, and can employ different algorithms for allocating time-frequency resources, among other customizable parameters. The simulator produces various performance indicators for the access network, such as channel conditions, data rates/capacities, latencies, and users satisfaction, at different hierarchical levels (per base stations, their sectors, or beams). The functionalities of the simulator are demonstrated considering different use cases for 5G networks. Methodologies are proposed for allocating base station positions, that is, finding good base station arrangements. A heuristic methodology based on design criteria (such as elevation, coverage of the region of interest, and interference between stations) is proposed for broadcasting networks. Meanwhile, for cellular access networks, a methodology based on clustering of UE positions is presented. Finally, this thesis presents a resource allocation algorithm based on a utility criterion to allocate time-frequency resources in 5G radio access networks considering the users capacity demands. Based on the individual demand of a terminal, the algorithm estimates its utility and orders the terminals in a sector to allocate the time-frequency resources accordingly. The presented resource allocation algorithm obtains competitive results and often outperforms known allocation algorithms.

Keywords

Radio Access Networks; Simulation; 5G; Base Station Arrangements; Single Frequency Networks; Radio Resource Allocation; Utility.

²“Sama” is the Tupi word for rope/cable, and also stands for Simulation and Analysis of Mobile Access.

Sumário

1	Introdução	20
1.1	Redes de Radiodifusão SFN	20
1.2	Redes celulares 5G	22
1.3	Contribuições	24
1.3.1	Simulador de Redes de Acesso por Rádio	24
1.3.2	Posicionamento de Estações em uma RAN	25
1.3.3	Algoritmo de Alocação de Recursos Baseado em Utilidade	26
1.4	Estrutura da Tese	26
2	Simulador de Redes de Acesso por Rádio	27
2.1	Trabalhos Sobre Simuladores de Camada Física	27
2.2	Desenvolvimento do Simulador Sama	28
2.3	Parâmetros Relevantes da Simulação	29
2.4	Modelagem do sistema celular	31
2.4.1	Região de Interesse	31
2.4.2	Equipamento de Usuário (UE)	31
2.4.3	Estação Rádio Base (BS)	32
2.4.3.1	Diagramas de Antenas Setoriais	33
2.4.3.2	Antenas com conformação de feixe - <i>Beamforming</i>	36
2.4.3.3	Grade de feixes - <i>Grid of Beams</i> (GOB)	38
2.4.4	Informação de Estado do Canal - <i>Channel State Information</i> (CSI)	39
2.4.4.1	Modelo de Perda de Propagação	40
2.4.5	Associação UE–BS	41
2.4.5.1	Distribuição de UEs	42
2.4.5.2	Arranjo de BSs	44
2.5	Estrutura de Recursos Tempo-Frequência	45
2.6	Algoritmos de Alocação de Recursos	46
2.6.1	<i>Round-Robin</i> (RR)	47
2.6.2	<i>Best Channel Quality Indicator</i> (BCQI)	47
2.6.3	<i>Proportional Fair</i> (PF)	48
2.6.4	Tabelas de Ativação e Controle de Potência	48
2.7	Duplexação	50
2.8	Medidas de Desempenho da Rede	51
2.8.1	Indicadores de Desempenho por UE	51
2.8.1.1	SINR - Razão Sinal-Ruído Mais Interferência	51
2.8.1.2	Capacidade	52
2.8.1.3	Deficit de Capacidade	53
2.8.1.4	Latência	53
2.8.2	Indicadores Agregados de Desempenho da RAN	53
2.8.2.1	<i>Throughput</i> da RAN	54
2.8.2.2	Deficit de Capacidade Médio	54
2.8.2.3	Eficiência Espectral	54
2.8.2.4	Índice de Equidade (<i>Fairness Index</i>)	54
2.8.3	Critério de Parada	55

2.8.3.1	Teste de Mann Whitney	55
2.9	Desenvolvimento do Simulador	56
2.9.1	Definição da RAN	60
2.9.2	Cálculo de Interferências	60
2.9.3	Armazenamento de Indicadores	61
3	Casos de Uso do Sama para Avaliação de RANs 5G	62
3.1	Comparativo de Algoritmos de Alocação – Cenário A	62
3.2	Efeitos da Duplexação por Divisão do Tempo – Cenário B	71
3.3	Projeto de RAN para Atender um Município – Cenário C	73
3.4	Desempenho de Serviço URLLC – Cenário D	75
3.5	Desempenho do Serviço mMTC – Cenário E	78
4	Arranjos e Posicionamento de Estações para Redes de Acesso por Rádio	82
4.1	Formulação Geral	82
4.2	Arranjo de BSs para SFNs	83
4.2.1	Definição do Problema	83
4.2.2	Algoritmo Proposto	84
4.2.3	Heurísticas	85
4.2.3.1	Altura Normalizada	85
4.2.3.2	Fração de Cobertura	86
4.2.3.3	Regiões Não Cobertas	86
4.2.3.4	Candidatos Fora da ROI	87
4.2.3.5	Superfície Aleatória Gaussiana	88
4.2.3.6	Região de Busca	88
4.2.4	Algoritmo	90
4.2.5	Resultados	91
4.3	Arranjos de Estações para Redes Celulares	93
4.3.1	Estimando Bons Pontos Candidatos para a RAN	93
4.3.1.1	Clusterização para Determinar o Arranjo de Posições se BSs	94
4.3.2	Projeto do Arranjo de BSs	97
4.3.2.1	Resultados	97
5	Alocação de Recursos a Partir de um Critério de Utilidade	102
5.1	Alocação de Recursos em Redes Celulares	102
5.1.1	Função de Utilidade	104
5.2	Formulação do Problema	106
5.2.1	Deficit de Capacidade	106
5.2.2	Modelagem do Problema	106
5.3	Solução Proposta	107
5.3.1	Pontuações de Utilidade	108
5.3.1.1	Utilidade de um UE	108
5.3.1.2	Utilidade de um Feixe	109
5.3.1.3	Utilidade de uma BSs	110
5.3.2	Alocação de Recursos Usando a Utilidade	110
5.3.3	Alocação de RBs	111
5.4	Algoritmo de Alocação	112
5.5	Desempenho do Algoritmo de Alocação Baseado em Utilidade	113

5.5.1	Comparativo eMBB em <i>Simplex</i> - Cenário 2.A	113
5.5.2	Comparativo eMBB em TDD - Cenário 2.B, 2.C e 2.D	118
5.6	Conclusões	122
6	Conclusão e trabalhos futuros	124
7	Referências bibliográficas	127
8	Apêndice	135
8.1	SISO e MIMO	135
8.2	Antenas da Estação Rádio Base	137

Lista de figuras

Figura 1.1	Sobreposição de coberturas de estações base de TV Digital para o atendimento desse serviço no município do Rio de Janeiro.	21
Figura 1.2	Diagrama esquemático dos elementos que compõem a RAN e o <i>core</i> de uma rede celular. Pode-se dividir a rede em duas camadas: a rede de acesso por rádio e o núcleo de rede. A primeira conecta os aparelhos com o <i>core</i> da rede, enquanto a segunda faz a conexão com a internet.	22
Figura 1.3	Comparativo entre a cobertura obtida por antenas setoriais e por antenas com conformação de feixe.	23
Figura 1.4	Diagrama esquemático dos elementos que compõem uma rede de acesso por rádio (RAN) e seu relacionamento. A BS se conecta aos UEs através dos seus feixes.	24
Figura 2.1	Representação em escala macro da simulação provida pelo Sama com suas entradas e saídas. O simulador recebe o arranjo de BSs e suas características, o arranjo de UEs e suas características e a configuração da ROI (terreno e formato). Então, o Sama itera entre múltiplas amostras da distribuição de UEs (se for o caso). Após concluídas as rodadas de simulação, os dados obtidos são organizados e a saída pode ser compartimentalizada em três categorias: alocação de recursos, indicadores de canal e indicadores de capacidade.	30
Figura 2.2	Recorte de São José de Ubá retirado de um serviço de imagem de satélite (esquerda) e o recorte da ROI em setores censitários da mesma região (direita).	31
Figura 2.3	Diagramas de radiação no plano de azimute derivados da ITU-R F.1336-5 para $\sigma_1 = 60^\circ$, $\sigma_2 = 180^\circ$ e $\sigma_3 = 300^\circ$.	35
Figura 2.4	Diagrama de radiação no plano de elevação derivado da ITU-R F.1336-5 para $\theta = 10^\circ$.	35
Figura 2.5	Mapa de SINR gerado a partir do uso de 4 BSs alocadas equidistantemente em uma grade de 1000×1000 pixels de $30m^2$ com diagramas setoriais das Figuras 2.3 e 2.4.	36
Figura 2.6	Exemplo de um arranjo de beamforming de uma antena cujos elementos estão dispostos ao longo do eixo z e espaçados de $\Delta H \times \Delta V$.	37
Figura 2.7	Diagramas no plano vertical para uma antena de arranjo 8×8 com $\phi_b = 10^\circ$ e $\phi_b = 20^\circ$, à esquerda e à direita, respectivamente.	38
Figura 2.8	Diagramas no plano vertical para uma antena de arranjo 8×8 com $\theta_b = 10^\circ$ e $\theta_b = -30^\circ$, à esquerda e à direita, respectivamente.	38
Figura 2.9	Ilustração de uma GOB para uma BS. As circunferências em azul representam todas as possíveis configurações de feixes que complementam a região de cobertura da BS. As circunferências preenchidas em amarelo representam os feixes ativos num instante de tempo.	39
Figura 2.10	Diagrama esquemático da obtenção do CSI de uma UE u atendida por um feixe b de uma BS n .	40

Figura 2.11	Curvas de PL calculadas com o modelo de propagação alpha-beta-gama (ABG), com valores médios e variação de larga escala. O modelo foi calculado com $\alpha = 4$, $\beta = 92.45$, $\gamma = 2$ e $\sigma = 1$, para d em km e f em GHz.	41
Figura 2.12	Ilustração do processo de associação entre UEs e feixes de BSs. As duas BSs apresentam conjuntos de feixes com os mesmos ângulos de elevação.	42
Figura 2.13	Comparativo entre a distribuição de 1000 UEs em uma ROI de 100×100 pixels. Na esquerda, usa-se a distribuição uniforme para sortear as posições e, na direita, usa-se a soma de quatro gaussianas.	43
Figura 2.14	Um exemplo de distribuição de UEs e do arranjo de BSs resultantes do algoritmo de clusterização, detalhado na Seção 4.3, aplicado ao bairro da Tijuca na cidade do Rio de Janeiro. (a) Definição da ROI a partir de um serviço de mapas. (b) Número estimado de residências com acesso à conexão banda larga sem-fio usando dados do Censo e PNAD (1, 2). (c) Probabilidade derivada de (b) de um pixel conter um UE. (d) 800 UEs sorteados a partir da densidade em (c) e a posição de 4 BSs (círculos maiores e coloridos) resultante do algoritmo de clusterização.	45
Figura 2.15	Representação típica de um Bloco de Recursos (<i>Resource Block</i> , RB). O LTE RB é o conjunto de 12 subportadoras \times 7 símbolos OFDM que resulta em 84 Elementos de Recurso (<i>Resource Elements</i> , RE), a menor fração do RB.	46
Figura 2.16	Fluxograma do algoritmo de alocação de recursos <i>Round-Robin</i> .	47
Figura 2.17	Fluxograma do algoritmo de alocação de recursos <i>BCQI</i> .	48
Figura 2.18	Fluxograma do algoritmo de alocação de recursos <i>proportional fair</i> .	49
Figura 2.19	Comparativo entre as tecnologias FDD e TDD na alocação de recursos para obter duplexação.	50
Figura 2.20	Fluxograma da avaliação da distribuição dos indicadores no Sama via teste U de Mann Whitney.	56
Figura 2.21	Diagrama de classes do simulador Sama. Em cada classe, as variáveis são apresentadas na parte superior e as suas funções, na parte inferior. A classe relacionada às UEs está colorida em azul, as relacionadas às BSs estão coloridas em verde e está colorida em rosa a classe relacionada à rede. A classe responsável pelos indicadores está colorida em cinza.	57
Figura 2.22	Fluxograma do processo de simulação. O simulador avalia a RAN calculando a interferência e obtendo os indicadores de desempenho. Esse divide-se em três estágios: a criação da rede, onde os parâmetros das UEs, BSs e RAN são usados para instanciar as representações digitais dos elementos; o cálculo de interferência, em que os algoritmos de alocação e duplexação são executados para os UEs e BSs e obtêm-se os resultados de interferência e os indicadores de desempenho por UE; e, por último, o armazenamento de indicadores, quando os indicadores agregados são obtidos e armazenados juntamente com outros dados produzidos pelo Sama.	59
Figura 3.1	Distribuição do CSI entre UE e BS para diferentes quantidades de BS que compõem a RAN.	64
Figura 3.2	Mapa de associação UE-BS para $N=5, 10, 15, 20$ obtido em uma das simulações do comparativo de algoritmos de alocação de recursos.	64

Figura 3.3	Comparativo de UEs que atingem $C_{\text{target}}=30$ Mbps (a) e do <i>Throughput</i> da RAN (b) para $N=1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ entre os algoritmos de alocação de recursos.	65
Figura 3.4	UEs que atingem $C_{\text{target}} = 30$ Mbps ao longo do período de simulação de 1s e $N=1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ no comparativo dos algoritmos de alocação de recursos.	65
Figura 3.5	Comparativo de <i>fairness index</i> (a) e do SINR (b) para $N=1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ entre algoritmos de alocação de recursos.	66
Figura 3.6	Dispersão da capacidade \times distância para os três algoritmos de alocação, <i>Round-Robin</i> , <i>Proportional Fair</i> e <i>Best CQI</i> , usando 5, 10 e 15 BSs.	67
Figura 3.7	Comparativo de (a) SINR e (b) quantidade de UEs que alcançam $C_{\text{target}}=30$ Mbps entre os algoritmos de alocação de recursos.	68
Figura 3.8	Gráficos de distribuição de banda de frequências alocada por UE \times distância para os três algoritmos de alocação, <i>Round-Robin</i> , <i>Proportional Fair</i> e <i>Best CQI</i> , com 5, 10 e 15 BSs, considerando $C_{\text{target}} = 30$ Mbps.	69
Figura 3.9	Gráficos de distribuição de tempo ativo na simulação por UE \times distância para os três algoritmos de alocação, <i>Round-Robin</i> , <i>Proportional Fair</i> e <i>Best CQI</i> , com 5, 10 e 15 BSs, considerando $C_{\text{target}} = 30$ Mbps.	70
Figura 3.10	Gráficos de distribuição da capacidade (Mbps) alocada por UE \times distância para os três algoritmos de alocação, <i>Round-Robin</i> , <i>Proportional Fair</i> e <i>Best CQI</i> , com 5, 10 e 15 BSs, considerando $C_{\text{target}} = 30$ Mbps.	71
Figura 3.11	Comparativo de UEs que atingem $C_{\text{target}}=[30, 10]$ Mbps para $N=1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ e $r_{\text{duplex}} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ em TDD para descida e subida para diversas razões de TDD r_{duplex} .	72
Figura 3.12	Comparativo SINR (acima) e throughput para $N=1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ e $r_{\text{duplex}} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ em TDD para <i>downlink</i> e <i>uplink</i> para diversas razões de TDD r_{duplex} .	73
Figura 3.13	Comparativo de UEs que atingem $C_{\text{target}}=[30, 10]$ Mbps para $N = 1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ e $r_{\text{duplex}} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ em TDD para os enlaces de descida e subida, no município de São José de Ubá, localizado no Estado do Rio de Janeiro.	74
Figura 3.14	Mapa de Associação UE-BS para $N= 5, 10, 15, 20, 25$ obtido em uma das simulações do cenário C, no município de São José de Ubá, localizado no Estado do Rio de Janeiro.	75
Figura 3.15	Comparativo de latência entre algoritmos de alocação para $N= 1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ no URLLC. As curvas do algoritmo BQCI estão sobrepostas.	76
Figura 3.16	Comparativo da distribuição de latência entre os algoritmos de alocação PF e RR conforme se varia o número de BSs N no cenário URLLC.	76
Figura 3.17	Comparativo de <i>throughput</i> para $N = 1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ no cenário URLLC.	77
Figura 3.18	Comparativo de <i>fairness index</i> para $N= 1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ no cenário URLLC.	77
Figura 3.19	Mapa de associação UE-BS para $U=1000, 2000, 5000, 10000$ obtido em uma das simulações do cenário E (mMTC).	78

Figura 3.20	Comparativo de UEs que atingem $C_{\text{target}}=[100, 100]$ kbps para $U=500, 1000, 1500, \dots, 9500, 10000$, em <i>downlink</i> e <i>uplink</i> , no cenário E.	80
Figura 3.21	Comparativo de <i>throughput</i> para $U=500, 1000, 1500, \dots, 9500, 10000$, em <i>downlink</i> e <i>uplink</i> , no cenário E (mMTC).	80
Figura 3.22	Comparativo de <i>fairness index</i> para $U=500, 1000, 1500, \dots, 9500, 10000$, em <i>downlink</i> e <i>uplink</i> , no cenário E (mMTC).	81
Figura 4.1	Superfície de Voronoi (direita) gerada a partir dos máximos locais (esquerda) da superfície de elevação.	87
Figura 4.2	Processo de restrição da região de busca por posições candidatas para uma estação através alteração do tamanho do raio de busca conforme a variação da cobertura obtida.	88
Figura 4.3	Processo de restrição da região de busca por posições candidatas para uma estação através da definição do quadrante de busca considerando a estação n e o par de estações mais próximas m e p .	89
Figura 4.4	Fração de cobertura da ROI do município de Queimados enquanto se varia o número de estações de 2 até 4 a cada 200 iterações, usando antenas isotrópicas e 10 W de potência irradiada.	91
Figura 4.5	Mapa de pontos candidatos do conjunto solução (em vermelho) para o caso de uma SFN composta por quatro estações usando antenas isotrópicas que atendem ao critério de desempenho mínimo hipotético de 90% de cobertura da ROI do município de Queimados (em amarelo).	92
Figura 4.6	Exemplo do algoritmo de clusterização sendo aplicado em 200 pontos em uma ROI de 500×500 pixels com 2 (a), 4 (b) e 8 (c) <i>clusters</i> .	94
Figura 4.7	Porcentagem de UEs que alcançam a capacidade alvo de 30 Mbps para 400 UEs e $N = 1, 2, 3, \dots, 14, 15$.	99
Figura 4.8	Razão Normalizada de UEs atendidos por BSs usando clusterização para a capacidade alvo de 30 Mbps, $U=400$ e $N=4, 5, 6, 7$.	100
Figura 4.9	Razão Normalizada de UEs atendidos por BSs usando clusterização para a capacidade alvo de 30 Mbps, $U=400$ e $N=10, 11, 12, 13$.	101
Figura 5.1	Representação da BW, νBW and BW_{min} .	109
Figura 5.2	Utilidade de uma fatia de frequência $Y_{\text{BW}}(t, u)$ versus $\text{SINR}(t, u)$ (em escala linear) para diferentes valores de $\Omega(t, u)$.	110
Figura 5.3	Diagrama de blocos da alocação de recursos baseada em utilidade.	112
Figura 5.4	Exemplo da alocação de RBs por feixe e por usuário. t_{nb} representa o tempo em que o b -ésimo feixe está ativo, definido em 5-19 e 5-17, no qual alocará larguras de banda de frequências para o UE u_b que atende por 5-18.	113
Figura 5.5	Comparativo de UEs que alcançam $C_{\text{target}}=30$ e 10 Mbps, na descida e na subida, respectivamente, para $N = 1, \dots, 30$, no cenário 2.A, empregando 100% do tempo para cada enlace <i>simplex</i> separadamente.	115
Figura 5.6	Comparativo de <i>throughput</i> da RAN para $N = 1, \dots, 30$ na subida e descida no cenário 2.A, empregando 100% do tempo para cada enlace <i>simplex</i> separadamente.	116
Figura 5.7	Comparativo de <i>fairness index</i> na descida e subida, considerando enlaces <i>simplex</i> , Cenário 2.A, considerando $N = 1, \dots, 30$.	117

Figura 5.8	Gráficos de dispersão capacidade na descida \times distância para os quatro algoritmos de alocação; de cima para baixo, temos as dispersões para o algoritmo proposto (baseado em utilidade), o <i>Best CQI</i> , o PF e o RR; e, da esquerda para a direita varia-se a quantidade de BSs da RAN, com 5, 10, 20 e 30 BSs.	117
Figura 5.9	Dispersão da capacidade na descida \times distância para a estratégia de alocação baseada em utilidade para $N = 5$.	118
Figura 5.10	Comparativo de UEs que atingem $C_{\text{target}} = 30$ (DL) e 10 (UL) Mbps, $N = 1, \dots, 30$. De cima para baixo, tem-se os resultados para o Cenário 2.B, o Cenário 2.C e o Cenário 2.D.	119
Figura 5.11	Comparativo de <i>throughput</i> , $N = 1, \dots, 30$. De cima para baixo, tem-se os resultados para o Cenário 2.B, o Cenário 2.C e o Cenário 2.D.	121
Figura 5.12	Comparativo de <i>Fairness Index</i> , $N = 1, \dots, 30$. De cima para baixo, tem-se os resultados para o Cenário 2.B, o Cenário 2.C e o Cenário 2.D.	123
Figura 8.1	Ilustração e comparativo dos sistemas SISO (<i>Single-Input Single-Output</i>), SIMO (<i>Single-Input Multiple-Output</i>), MISO (<i>Multiple-Input Single-Output</i>) e MIMO (<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>).	135
Figura 8.2	Diagrama de um canal MIMO para um sistema com <i>beamforming</i> . Com α sendo o vetor de precodificação e \mathbf{w} o vetor de combinação.	136
Figura 8.3	Desenho esquemático do conjunto transceptor e antena de um sistema MIMO usando AAS.	138

Lista de tabelas

Tabela 2.1	Limiar de Sensibilidade para Banda de Operação/Largura de Banda de Frequências para um Espaçamento de Subportadoras de 15 kHz	32
Tabela 2.2	Limiar de Sensibilidade para Banda de Operação/Largura de Banda de Frequências para um Espaçamento de Subportadoras de 15 kHz	41
Tabela 3.1	Parâmetros de Configuração.	63
Tabela 3.2	Parâmetros de Configuração do Cenário mMTC.	79
Tabela 4.1	Parâmetros de Configuração da RAN	98
Tabela 5.1	Parâmetros de Configuração da RAN eMBB - Cenários 2.A e 2.B.	115

Lista de algoritmos

Algoritmo 1	Algoritmo simplificado (durante um quadro) da simulação de interferência e da análise de capacidade.	58
Algoritmo 2	Algoritmo proposto para alocar posições de estações base em uma SFN.	90
Algoritmo 3	Simulação do desempenho da RAN usando os arranjos de posição obtidos via clusterização	95
Algoritmo 4	Clusterização com K -means	96
Algoritmo 5	Cálculo de Utilidade e Alocação de Recursos	114

Lista de Abreviaturas

3GPP – *3rd Generation Partnership Project*
5G – *5th Generation mobile network*
AAS – *Active Antenna System*
ABG – *alpha-beta-gama*
AWGN – *Additive White Gaussian Noise*
BLER – *Block Error Rate*
BS – *Base Station*
ICP-OFDM – *Cyclic Prefix – Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
CQI – *Channel Quality Indicator*
CSI – *Channel State Information*
D2D – *Device to Device*
DL – *Downlink*
EDF – *Earliest Deadline First*
eMBB – *enhanced Mobile Broadband*
EPC – *Evolved Packet Core*
FDD – *Time-Division Duplexing*
gNodeB – *Next Generation Node B*
GOB – *Grid of Beams*
HetNet – *Heterogeneous Network*
IBGE – *Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística*
IG – *Intervalo de Guarda*
IoT – *Internet of Things*
IP – *Internet Protocol*
ISDB – *Integrated Services Digital Broadcasting*
ITU – *International Telecommunication Union*
KPI – *Key Performance Indicator*
LTE – *Long Term Evolution*
MCS – *Modulation and Coding Scheme*
MIMO – *Multiple-Input Multiple-Output*
MISO – *Multiple-Input Single-Output*
mMTC – *massive Machine Type Communications*
NOMA – *Non-Orthogonal Multiple Access*
NR – *New Radio*
NVS – *Network Virtualization Substrate*
OFDM – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
PF – *Proportional Fair*

PL – *Physical layer*
PNAD – Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios
QoS – *Quality of Service*
RAN – *Radio Access Network*
RB – *Resource Block*
RE – *Resource Element*
RF – Rádio Frequência
ROI – *Region of Interest*
RR – *Round Robin*
RSS – *Received Signal Strength*
Sama – *Simulation and Analysis of Mobile Access*
SFN – *Single Frequency Network*
SIMO – *Single-Input Multiple-Output*
SISO – *Single-Input Single-Output*
SNIR – *Signal to Interference & Noise Ratio*
SSE – *Sum of Squared Errors*
TDD – *Frequency-Division Duplexing*
TS – *Technical Specification*
TTI – *Transmission Time Interval*
UE – *User Equipment*
UFL – *Ultra High Frequency*
UL – *Uplink*
URLLC – *Ultra Reliable Low Latency Communications*
VHF – *Very High Frequency*

1

Introdução

Com a evolução das tecnologias de acesso por rádio, que oferecem múltiplos serviços com requisitos de desempenho distintos a diferentes usuários, é necessário atender a critérios de projeto mais diversificados e exigentes. Assim, o projeto dessas redes se torna cada vez mais complexo, requerendo simulações mais elaboradas. Para o atendimento destes requisitos, independentemente do tipo de rede sem-fio (celular, radiodifusão, *bluetooth*, e outras), a otimização do projeto de rede de acesso por rádio é importante tanto para facilitar o projeto e a simulação das redes, como também para permitir o estudo de outras características e possibilitar a evolução das tecnologias de acesso por rádio. Este trabalho apresenta contribuições para o projeto de redes de radiodifusão e redes celulares. Para a obtenção dos resultados, foram desenvolvidos simuladores de desempenho da camada física de tais redes.

1.1

Redes de Radiodifusão SFN

Uma rede de radiodifusão de frequência única (SFN, *Single Frequency Network*) é formada por um conjunto de transmissores operando numa mesma banda de frequências para cobrir uma determinada região geográfica com o mesmo sinal (3). A Figura 1.1 ilustra a cobertura do município do Rio de Janeiro usando uma SFN composta por sete estações. Os transmissores operam na mesma banda de frequências e em sincronismo de tempo de símbolo, entregando aos usuários o mesmo conteúdo.

A utilização de redes SFN é conveniente para o serviço de radiodifusão de TV digital, pois possibilita o atendimento de grandes regiões utilizando um único canal. A SFN economiza banda nas faixas de frequência de VHF (*Very High Frequency* — Frequência Muito Alta) ou UHF (*Ultra High Frequency* - Frequência Ultra Alta) em comparação com a alternativa que emprega múltiplos transmissores em diferentes bandas para cobrir a mesma área. Outra vantagem ocorre na recepção móvel, com a continuidade do serviço ao longo de grandes trajetos, já que não é necessária a resintonização dos receptores.

A utilização de OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*, Multiplexação Divisão em Frequências Ortogonais) com intervalos de guarda e prefixo cíclico, adotada no padrão ISDB (*Integrated Services Digital Broadcasting*), torna a recepção robusta aos efeitos de multipercursos (4), pois ao transmitir dados usando diversas subportadoras de taxa reduzida com o uso

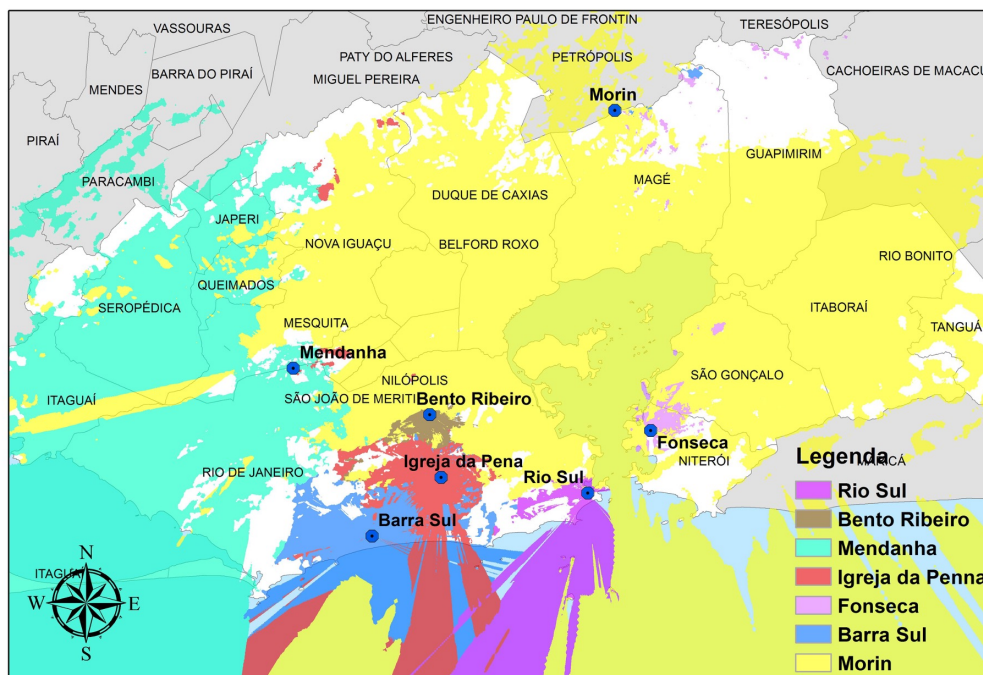


Figura 1.1: Sobreposição de coberturas de estações base de TV Digital para o atendimento desse serviço no município do Rio de Janeiro.

do intervalo de guarda (IG) entre símbolos, permite mitigar efeitos decorrentes da interferência entre símbolos subsequentes (4).

Segundo (5), a otimização de redes SFN que utilizam OFDM pode envolver dois aspectos: 1) a potência de transmissão efetiva (EIRP, *Effective Isotropic Radiated Power*) por estação e 2) o atraso relativo, na recepção, entre sinais provenientes de transmissores distintos. A otimização de redes SFN deve considerar diversos aspectos. Pode-se regular a potência de transmissão e o ganho das antenas para maximizar a área de cobertura, enquanto se mantêm atrasos estáticos ou garantir uma razão sinal ruído mínima (pré-definida) conquanto o problema dos atrasos temporais relativos é mantido inferior a um limite máximo (6, 7). Assim, respeitam-se os limites de projeto de forma a garantir a mitigação da interferência entre símbolos OFDM.

Parte deste trabalho é dedicado a otimizar a cobertura de redes SFN, escolhendo um arranjo de posições para as estações base. Propõe-se uma abordagem heurística que tenta englobar alguns dos principais parâmetros de projeto para tais redes (3).

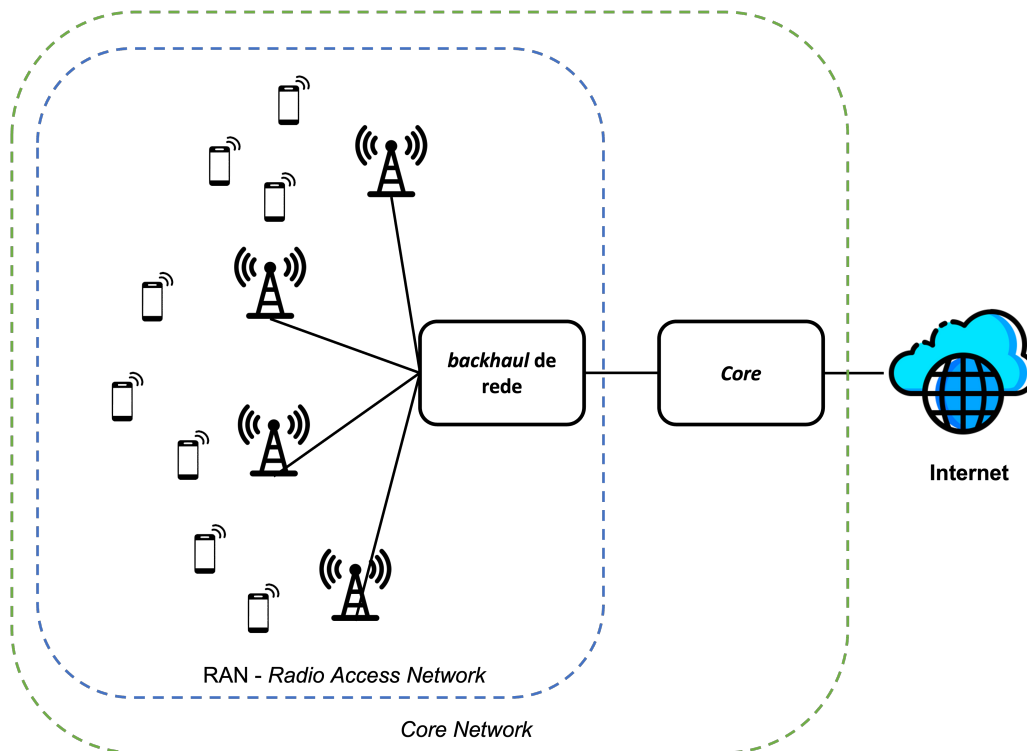


Figura 1.2: Diagrama esquemático dos elementos que compõem a RAN e o *core* de uma rede celular. Pode-se dividir a rede em duas camadas: a rede de acesso por rádio e o núcleo de rede. A primeira conecta os aparelhos com o *core* da rede, enquanto a segunda faz a conexão com a internet.

1.2

Redes celulares 5G

Uma rede celular é formada por dois sistemas principais, a rede de acesso por rádio RAN (*Radio Access Network*) e o núcleo da rede móvel ou *Core* (8). Tal arranjo é ilustrado na Figura 1.2. A RAN refere-se ao conjunto de BSs, estações rádio base, que no 5G, são denominadas gNodeB, ou “*Next Generation*” *Node B*. Elas garantem o bom uso do espectro de rádio (9) e o atendimento aos requisitos de qualidade de serviço QoS (*Quality of Service*). Já o *5G-core* (ou 5G - EPC ou *Evolved Packet Core*) tem diversas funções. Ele deve prover conectividade IP de voz e dados, garantir os requisitos de QoS, garantir a mobilidade e processar os custos pelos serviços. O EPC faz ainda a ligação da rede de acesso com outras redes IP (*Internet Protocol*). Na Figura 1.2, observa-se ainda o *backhaul* de rede, usualmente em fibra-ótica e com topologia em anel (10), que interconecta as BSs com o *core* de rede.

Conforme explicado no Apêndice 8.2, BSs de uma RAN podem usar antenas setoriais para prover a cobertura, como também um sistema de ativo de antenas (AAS). A Figura 1.3 compara visualmente um sistema típico de antenas setoriais com um sistema de antenas com capacidade de formação de

feixes, ou *beamforming*. A indústria já produz antenas com uma quantidade massiva de elementos irradiantes para atender aos chamados sistemas *Massive MIMO* (11).

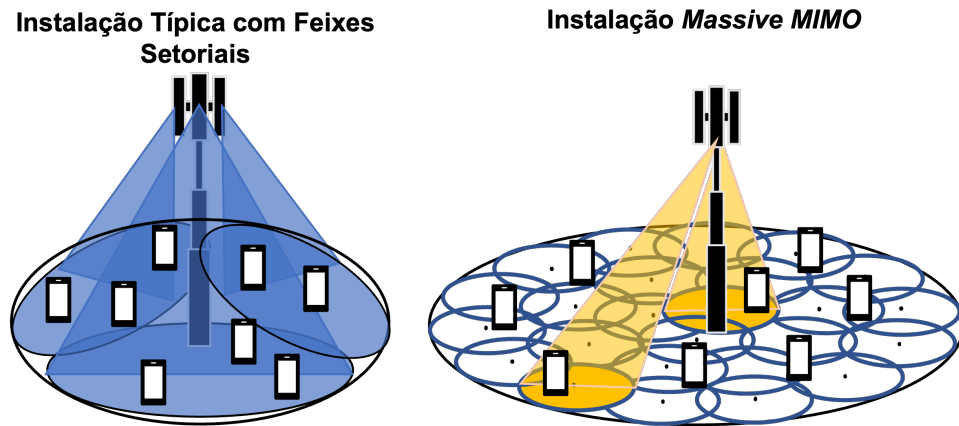


Figura 1.3: Comparativo entre a cobertura obtida por antenas setoriais e por antenas com conformação de feixe.

Uma RAN 5G admite e aloca recursos da rede (tempo e frequência) para os UEs (*User Equipment, Equipamento de Usuário*) (12). Associa-se a cada UE recursos específicos de RF e da rede 5G (12). A associação define o enlace entre a UE e a RAN. As BSs (*Base Stations*), estações rádio base que compõem a RAN, em geral, contêm múltiplos setores e, em cada setor, se associam aos UEs através dos feixes (*beams*), obtidos por meio do arranjo de antenas do setor que pode formar múltiplos feixes. Um diagrama representando esses elementos é apresentado na Figura 1.4.

A alocação de recursos de uma rede de acesso por rádio diz respeito à atribuição dos recursos necessários de potência, intervalos tempo-frequência (*Resource Blocks* ou RB) e feixes dos setores das antenas para atender as demandas do UE (13, 14). A alocação dos recursos disponíveis deve contemplar diversos fatores como o ponto de conexão, a qualidade do enlace, a largura de banda de frequência, sua divisão no tempo e a potência de transmissão. A alocação depende da quantidade de UEs admitidos pela rede e de suas associações aos feixes das diferentes BSs, que produzem diferentes condições de canal (13, 14), devido à variabilidade na distância entre a UE e a BS associada a ela e a interferência inter-celular produzida por outras BSs.

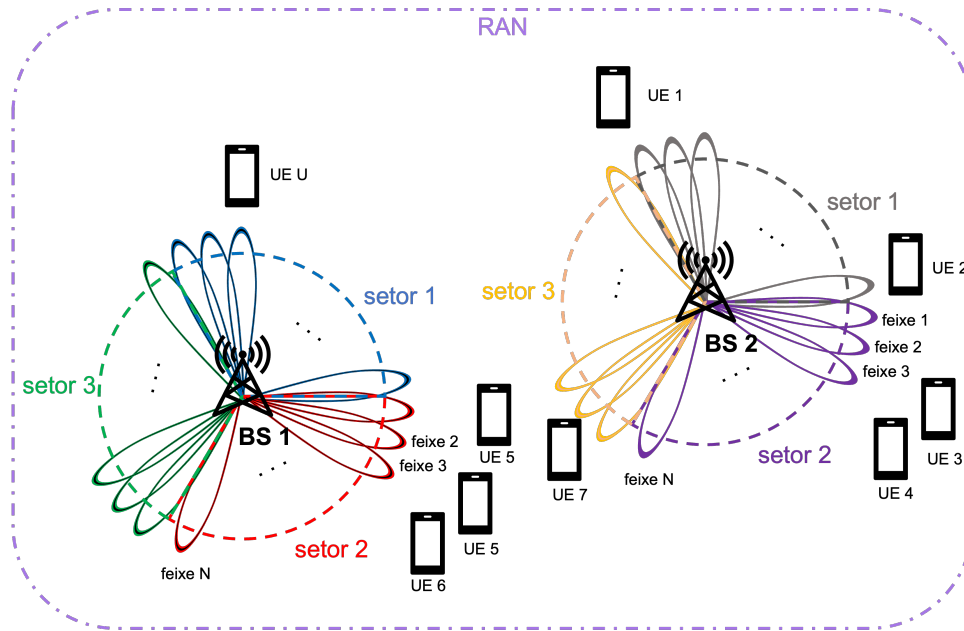


Figura 1.4: Diagrama esquemático dos elementos que compõem uma rede de acesso por rádio (RAN) e seu relacionamento. A BS se conecta aos UEs através dos seus feixes.

1.3 Contribuições

1.3.1 Simulador de Redes de Acesso por Rádio

Para apoiar o projeto da RAN e a avaliação de seu desempenho, é essencial dispor de uma ferramenta capaz de simular diversos cenários e considerar os diferentes requisitos dos casos de uso. Tal ferramenta deve ser capaz de simular a demanda de múltiplos UEs pelos recursos tempo-frequência da rede, considerado o arranjo espacial dos elementos da RAN e as características dos equipamentos que a compõem.

Para redes 5G, a ferramenta deve simular os principais casos de uso: o *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB) (15), proposto para transmissão de vídeo e jogos em tempo-real, que necessita de taxas de dados elevadas; o *Ultra Reliable Low Latency Communications* (URLLC) (16), que considera aplicações para veículos autônomos; e, o *massive Machine Type Communications* (mMTC) (15), desenvolvido para cidades inteligentes e dispositivos IoT (*Internet of Things*), onde se necessita conectar muitos dispositivos. Cada cenário tem demandas distintas e apresenta diferentes requisitos para a rede móvel, portanto, para a RAN da rede. Consequentemente, o simulador deve incluir índices de desempenho distintos capazes de avaliar a rede nessas situações diversas. O simulador deve, em princípio, retornar: atribuições de feixes de

UEs/BSs e perdas de caminho e taxas de dados dos UEs, que são aspectos independentes do escalonador de recursos (*scheduler*), e a capacidade e latência por UE, que, por sua vez, dependem do escalonador.

Para avaliar o desempenho da RAN, neste trabalho, desenvolveu-se um simulador baseado no indicador de estado do canal (*Channel State Information*, CSI) entre UEs e BSs. A partir do CSI (sua estimativa simulada), as associações entre os UEs e os feixes das BSs são obtidas (17), retratando espacialmente os links de rádio da RAN entre UEs e BSs. Neste retrato, ocorre o escalonamento dos recursos tempo-frequência entre os UEs (18). O processo fornece uma fotografia da RAN durante um quadro da camada física. Durante o processo de alocação de recursos, avalia-se o desempenho da rede, uma vez que os índices de qualidade dependem também da estratégia de alocação empregada.

O simulador desenvolvido, denominado Sama¹ (19), engloba as minúcias necessárias para realizar simulações com diferentes configurações sistêmicas e características de equipamentos. O simulador consegue avaliar o CSI, do qual depende a capacidade do enlace, para cada UE (20) em uma Rede de Acesso por Rádio (RAN) 5G com múltiplos UEs espacialmente distribuídos. A ferramenta considera a variabilidade intrínseca do canal sem fio entre UEs e BSs. O Sama é um programa desenvolvido em Python e pode ser usado para executar diferentes simulações de cenários ajustando seus parâmetros de simulação.

1.3.2

Posicionamento de Estações em uma RAN

Em todo o projeto de RAN, a alocação de posições para estações que compõem a rede é um importante aspecto. Com a densificação das estações que compõem essas redes, o posicionamento destas estações se torna cada vez mais importante, uma vez que mitigação do efeito da interferência na recepção depende desse aspecto.

Na parte do trabalho que considera redes para radiodifusão (3), foi desenvolvido um simulador (21) a partir de uma heurística baseada em critérios relevantes de projeto, propõe-se um algoritmo para o posicionamento de estações de uma SFN para atender uma área geográfica. O objetivo da heurística é fornecer posições para estações de uma SFN provendo uma boa cobertura enquanto evita a sobreposição entre as coberturas providas pelas diferentes estações da SFN. Consequentemente, também expandindo o trabalho realizado para redes de radiodifusão em (3), desenvolvemos uma metodologia baseada

¹“Sama” é a palavra em Tupi para corda/cabo; como também é o acrônimo para *Simulation and Analysis of Mobile Access*.

em agrupamentos em *clusters* para alocar posições para BSs a partir das localizações dos UEs na RAN 5G. A metodologia de clusterização é comparada com uma alocação aleatória de posições de BSs para validar a sua aplicabilidade.

1.3.3

Algoritmo de Alocação de Recursos Baseado em Utilidade

Visando garantir uma determinada capacidade (em bits/s) por UE (essencial em um cenário eMBB, por exemplo) propõe-se um escalonador de recursos baseado num critério de utilidade. O indicador de utilidade é computado a partir da demanda do usuário por banda e extrapolado para os feixes e as BSs (e seus setores). A partir do ranqueamento das pontuações obtidas, faz-se a alocação de banda para os UEs e dos intervalos de tempo em que os feixes devem estar ativos. A estratégia de alocação baseada em utilidade prova-se uma alternativa viável frente a outros algoritmos de alocação (ou *schedulers*) usados na indústria, como o *Round-Robin*, *Best CQI* e *Proportional Fair*(22). O desenvolvimento desta estratégia, assim como os comparativos com as demais e seus resultados, foram simulados usando o Sama.

1.4

Estrutura da Tese

Este documento está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2 é apresentado o desenho e a implementação do simulador de redes de acesso por rádio desenvolvido. No Capítulo 3, mostram-se resultados de diversos cenários de redes 5G simulados com o simulador Sama. No Capítulo 4, apresentam-se técnicas para o posicionamento de estações base em redes SFN e em redes celulares. No capítulo 5, apresenta-se o algoritmo de alocação de recursos baseado em utilidade (em função da qualidade do canal entre UE e BS e da demanda do UE perante os outros UEs alocados na mesma BS) e resultados comparativos deste algoritmo frente a algoritmos clássicos. Finalmente, no Capítulo 6, apresentam-se as conclusões e trabalhos futuros.

2

Simulador de Redes de Acesso por Rádio

Neste Capítulo, detalha-se o desenvolvimento do simulador de redes de acesso por rádio (RAN). Descrevem-se os elementos de uma RAN usados no desenvolvimento do simulador, como eles se relacionam e os principais indicadores necessários para avaliar o seu desempenho. Também a interpretação desses elementos e relacionamentos no desenvolvimento do simulador.

2.1

Trabalhos Sobre Simuladores de Camada Física

Há diversos trabalhos sobre desenvolvimento de simuladores relacionados a esta tese, (23), (24) e (25), por exemplo. A seguir, discutimos trabalhos voltados para simulação de camada física.

Entre os simuladores de camada física desenvolvidos pela comunidade acadêmica, talvez o mais conhecido para o 5G seja o *Vienna Simulator* (26). Sendo o sucessor do simulador Vienna LTE-A SL (27), ele realiza simulações de camada física usando o método de Monte Carlo. Consiste em um simulador flexível e modular, implementado em MATLAB e capaz de ser usado e adaptado para diversos casos de uso. Possui como recursos os modelos de canal estocásticos 2D e 3D, e implementa diversos *schedulers* como *Best Quality Indicator* (BCQI) e *Round-Robin*, com suporte às tecnologias de *beamforming*, SISO, MIMO e NOMA. Sua principal deficiência é não possuir nenhuma automação quanto ao posicionamento e configuração das UEs e BSs e depender da configuração explícita dos mesmos pelo usuário. Apesar de ser destinado ao uso acadêmico, é desenvolvido em MATLAB, que, sendo uma ferramenta paga, restringe o seu acesso. Existem ainda outros simuladores derivados do Vienna, como o descrito em (28).

Outro simulador de interesse para este trabalho é o Simu5G (29), sucessor do SimuLTE (30). Diferentemente do Vienna Simulator, este foca na simulação fim-a-fim – considerando a camada de protocolo e entidades de rede. Desenvolvido em C++ (sobre o *framework* OMNeT++ (31)), tem como maior diferencial simular não somente a RAN, mas também o *core*, ou centro, da rede. Para os cálculos da parte da camada física, usa o modelo de canal *Realist Channel Model* (similar a um modelo 3D estocástico) para calcular o SINR e a taxa de erro de bloco (BLER, *Block Error Rate*). No entanto, a sua complexidade limita a escala das simulações, restringindo seu uso a cenários limitados a poucas BSs.

Existem outros simuladores com escopo similar, porém mais limitados, como o 5G-LENA (32), voltado para simulação de redes operando na faixa de ondas milimétricas, ou que não apresentam informações claras sobre a utilização alvo, como o 5G-air-simulator (33). Existem ainda simuladores voltados para aplicações acadêmicas, como o K-SimLink (34), ou simuladores que não estão disponíveis para a comunidade (35).

Trabalhos como (36) exemplificam casos de uso desses simuladores em trabalhos recentes. Nele, são simulados três cenários base: uma rede celular típica (com conexões entre UEs e BSs), um cenário de conexão D2D (*Device to Device*) e um cenário com acesso via drones. Com o uso do simulador, extraíram-se os dados de *throughput* e SINR nesses cenários.

Tendo em vista este cenário de simuladores de camada física, motivava-se o desenvolvimento de um simulador de código aberto, acessível e de fácil configuração que, seja flexível para ser usado em diversos cenários e também escalável para redes com grande quantidade de UEs e BSs.

2.2

Desenvolvimento do Simulador Sama

Uma ferramenta capaz de simular cenários diversos e avaliar requisitos de diferentes casos de uso é essencial para apoiar o projeto e a avaliação de RANs. Diferentes tipos de serviços como *enhanced Mobile Broadband* (eMBB), *Ultra Reliable Low Latency Communications* (URLLC) e *massive Machine Type Communications* (mMTC) (15) apresentam diferentes requisitos para a rede móvel e sua RAN. Consequentemente, um bom simulador deve englobar diversos indicadores de desempenho, ou KPIs (*Key Performance Indicators*), para avaliar a rede em diversas situações.

Para avaliar um serviço sem-fio, a ferramenta deve ser capaz de simular acessos de múltiplos UEs aos recursos de tempo-frequência e parâmetros de RF considerando características dos componentes e as distribuições espaciais dos UEs e dos elementos da rede aérea. Tal ferramenta, pode, por exemplo, permitir considerar a evolução de infraestrutura legada de forma a utilizar as torres e *sites* existentes para atender novos serviços (com novos requisitos) ou suportar novas tecnologias da RAN. Também deve considerar-se a variabilidade do canal entre as BSs e as UEs. Sem considerar esses aspectos, não é possível avaliar os atendimentos a diferentes requisitos de qualidade por UE e para o conjunto delas na área de serviço.

O simulador Sama, desenvolvido neste trabalho, usa como base a informação do estado do canal (CSI, *Channel State Information*), um conjunto de parâmetros relacionados ao estado de canal reportados do UE para a BS, entre

UEs e BSs. A partir das CSIs são criadas as associações entre os feixes das UEs e as BSs (conforme é detalhado na Seção 2.4.5), retratando espacialmente os enlaces de rádio entre UEs e BSs. A alocação de recursos de RF entre UEs é realizada considerando toda a configuração física da RAN fixa durante a duração de um tempo de quadro PL. Nesse intervalo avalia-se o desempenho da rede, uma vez que os índices de qualidade dependem da alocação adotada. O Sama é flexível, já que considera os detalhes necessários para realizar simulações em diferentes configurações sistêmicas e com equipamentos de diferentes características. O simulador Sama avalia o CSI para cada UE (20), computando a capacidade do enlace entre este UE e a BS que o atende em uma RAN 5G. Isso é feito para múltiplos UEs espacialmente distribuídos e considerando a variabilidade intrínseca do canal sem-fio entre UEs e BSs.

Sama é uma aplicação desenvolvida na linguagem de programação Python (37) que pode ser facilmente configurada por um conjunto de parâmetros de entrada. Em casos específicos, pode-se configurar funções que utilizam as variáveis de simulação para implementar novas características ou metodologias.

2.3

Parâmetros Relevantes da Simulação

Para simular uma RAN, deve-se modelar seus principais elementos – UEs e BSs. A RAN é composta de N BSs e cada BS pode ter múltiplos setores com capacidade de conformação de feixe (*beamforming*). Sem perda de generalização, assume-se que o parâmetro N representa o número total de setores das BSs (assume-se cada setor como uma BS) e o n -ésimo setor suporta B_n feixes. Através dos feixes das BSs, a RAN conecta as U UEs situadas dentro de uma ROI (*Region of Interest*) ao núcleo da rede.

Conforme ilustrado na Figura 2.1, o simulador Sama recebe como parâmetros de entrada a ROI, ou região de interesse, a distribuição espacial de UEs e suas características, o arranjo de BSs e suas características, e o modelo de perda de propagação. Suas saídas são a designação dos UEs conectados às diferentes BSs (a tabela de associação gerada durante a simulação), que independe do algoritmo de alocação de recursos, e a capacidade por UE e uma aproximação do atraso que a rede de acesso por rádio acrescenta à latência, que dependem do algoritmo de alocação escolhido. A operação é estocástica, já que se modelam as posições dos UEs como uma distribuição de probabilidades espacial e os indicadores são obtidos a partir de múltiplas iterações (rodadas) do simulador.

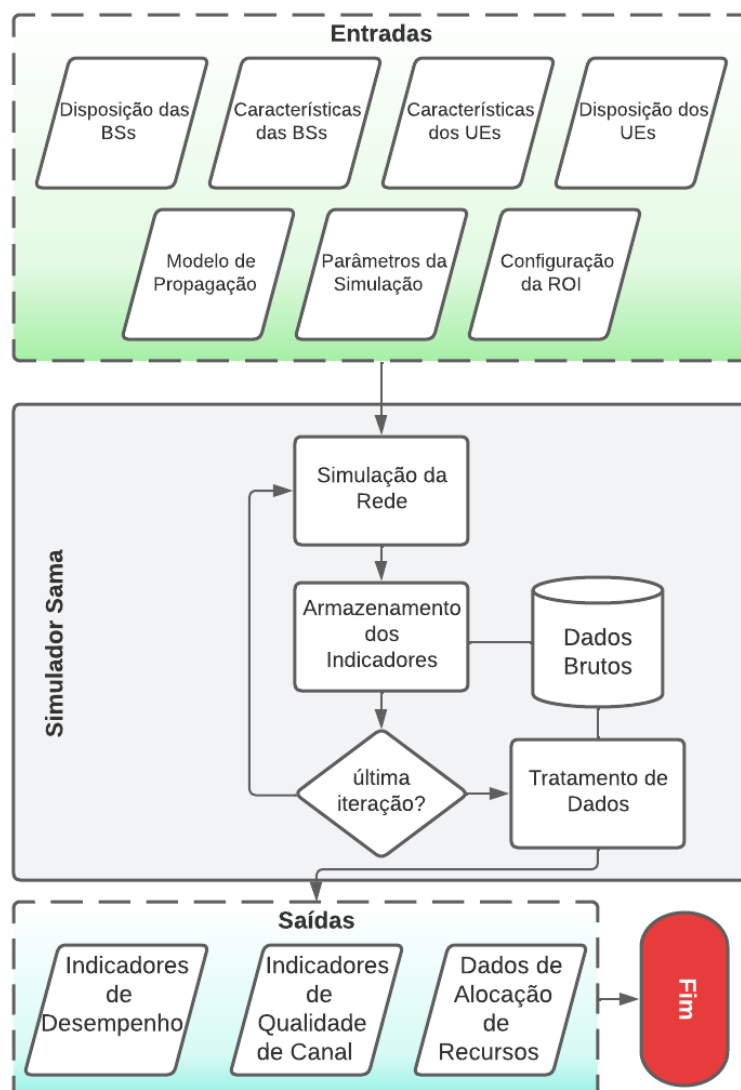


Figura 2.1: Representação em escala macro da simulação provida pelo Sama com suas entradas e saídas. O simulador recebe o arranjo de BSs e suas características, o arranjo de UEs e suas características e a configuração da ROI (terreno e formato). Então, o Sama itera entre múltiplas amostras da distribuição de UEs (se for o caso). Após concluídas as rodadas de simulação, os dados obtidos são organizados e a saída pode ser compartimentalizada em três categorias: alocação de recursos, indicadores de canal e indicadores de capacidade.

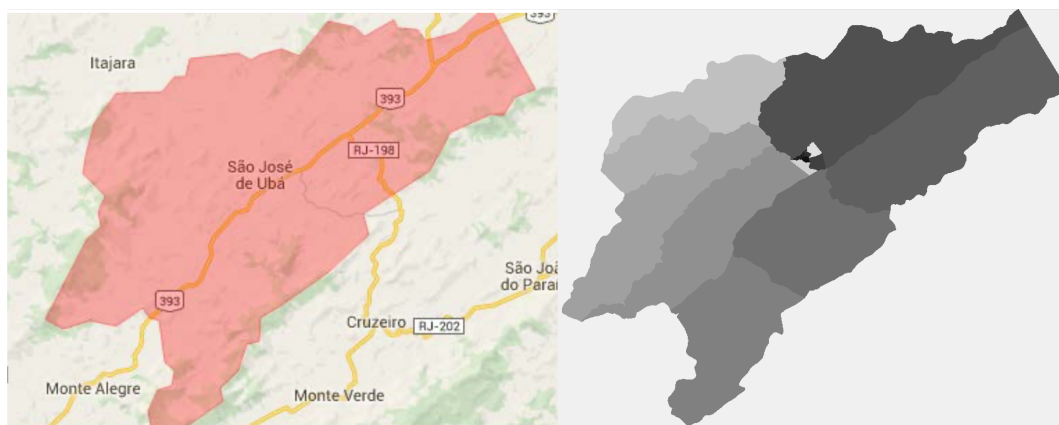


Figura 2.2: Recorte de São José de Ubá retirado de um serviço de imagem de satélite (esquerda) e o recorte da ROI em setores censitários da mesma região (direita).

2.4

Modelagem do sistema celular

Discute-se nessa seção as entidades do sistema, como se relacionam e as premissas que o Sama emprega em suas simulações.

2.4.1

Região de Interesse

A ROI é a região geográfica em que estão os UEs que a RAN deve atender. Esta pode representar um recorte de uma região geográfica, como um município, um estado, etc. A ROI delimita a região de cobertura da RAN. Nela, a distribuição espacial de UEs na ROI necessita ser modelada. Uma abordagem possível é modelar a distribuição espacial de UEs através de amostras de dados sócio-econômicos relevantes da população na região (3). A Figura 2.2 exemplifica uma ROI obtida a partir do recorte de setores censitários de dados do IBGE (2).

2.4.2

Equipamento de Usuário (UE)

Os UEs consomem a maior parte dos recursos de banda da RAN, sendo o restante destinado à comunicação e coordenação da rede. Consequentemente, é importante definir uma representação detalhada e flexível de suas características.

A RAN deve atender U UEs distribuídos na ROI, que podem ter perfis de sensibilidade, potência de transmissão, características e prioridades (ou casos-de-uso) diferentes. Por exemplo, os UEs do serviço eMBB usam um transceptor com maior potência de transmissão do que os UEs do mMTC. Para um

serviço URLLC, a latência (quanto menor, melhor) da RAN é o parâmetro mais relevante a ser considerado, em contraste ao eMBB, em que atingir uma maior taxa de dados é o principal objetivo.

O UE é modelado como um equipamento com antenas omnidirecionais, com ganho e potência de transmissão definidos como dados de entrada do simulador. A sua sensibilidade é considerada fixa, e corresponde ao pior caso da especificação TS 38.101-1 do 3GPP (38), sendo de -100 dBm para uma largura de banda de frequências de 5 MHz, conforme mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Limiar de Sensibilidade para Banda de Operação/Largura de Banda de Frequências para um Espaçamento de Subportadoras de 15 kHz

Banda de Operação	5 MHz(dBm)	10 MHz(dBm)	15 MHz(dBm)	20 MHz(dBm)	25 MHz(dBm)
n1	-100.0	-96.8	-95.0	-93.8	-92.7
n2	-98.0	-94.8	-93.0	-91.8	-90.8
n3	-97.0	-93.8	-92.0	-90.8	-89.7
n5	-98.0	-94.8	-93.0	-86.8	-84.8
n7	-98.0	-94.8	-93.0	-91.8	-90.0
n8	-97.0	-93.8	-91.4	-85.8	
n12	-97.0	-93.8	-84.0		
n13	-97.0	-93.8			
n14	-97.0	-93.8			
n18	-100.0	-96.8	-95.0		
n20	-100.0	-93.8	-91.0	-89.8	
n24	-100.0	-96.8			

2.4.3

Estação Rádio Base (BS)

As BSs proveem os enlaces de rádio para as UEs. Nas redes móveis sem-fio, uma BS 5G pode ter diferentes setores, limitados pelos ângulos de abertura, compondo uma cobertura multi-setorial. Conforme a tecnologia evolui, passa-se a usar técnicas mais complexas e equipamentos mais sofisticados e eficientes no uso de recursos para atender os critérios de qualidade para os diferentes casos de uso ou aplicações.

Como o posicionamento do conjunto de BSs e o desenho da ROI impactam o desempenho da rede sem-fio, a associação entre os UEs e uma BS depende do percurso entre eles e dos feixes gerados pelas antenas das BSs. Redes modernas empregam AAS (*Active Antenna Systems*), arranjos de elementos irradiantes muito densos (com muitos elementos), descritos no Apêndice 8.2,

melhorando a eficiência espectral através do uso técnicas como MIMO (11) e conformação de feixes entre outras. Uma representação de uma rede móvel sem-fio real considera as BSs com áreas de cobertura divididas em setores que empregam antenas com capacidade de conformação de feixes (*beamforming*).

Uma BS 5G pode empregar multiplexação espacial através da formação de feixes e escolha da potência de transmissão empregada nos feixes, como descrito na Seção 2.4.3.2, para melhorar a qualidade dos enlaces com os UEs.

2.4.3.1

Diagramas de Antenas Setoriais

O simulador Sama utiliza a recomendação ITU-R F.1336-5 (39) para modelar os diagramas padrão das aberturas de antenas setoriais sem formação de feixes ativos. O diagrama de radiação é dado por

$$G(\phi, \theta) = G_0 + G_{hr}(x_h) + R \cdot G_{vr}(x_v), \quad (2-1)$$

onde G_0 é o ganho máximo da antena, $G_{hr}(x_h)$ é o ganho relativo de referência em dB no plano de azimuth na direção normalizada de $(x_h, 0)$, sendo x_h definido por

$$x_h = \frac{|\phi|}{\phi_3}, \quad (2-2)$$

onde ϕ é o apontamento da antena no plano horizontal (azimute) e ϕ_3 é a abertura, ou ângulo de meia potência da antena no plano horizontal. R é a taxa de compressão de ganho horizontal quando o ângulo de azimuth (plano horizontal) muda de 0° para ϕ , definida por

$$R = \frac{G_{hr}(x_h) - G_{hr}(180^\circ/\phi)}{G_{hr} - G(180^\circ/\phi_3)}. \quad (2-3)$$

$G_{vr}(x_v)$ sendo o ganho relativo de referência da antena no plano de elevação (a direção normal a $(x_h, 0)$), em dB, sendo x_v definido por

$$x_v = \frac{|\theta|}{\theta_3}, \quad (2-4)$$

onde θ é o ângulo de apontamento relativo no plano vertical, ou plano de elevação, e θ_3 é o ângulo de abertura da antena neste plano.

O ganho relativo de referência no plano horizontal para $G_{hr}(x_h) \geq G_{180}$,

com G_{180} sendo o ganho mínimo relativo, é dado por

$$G_{hr}(x_h) = \begin{cases} -12x_h^2, & \text{para } x_h \leq 0,5 \\ -12x_h^{(2-k_h)} - \lambda_{kh}, & \text{para } x_h > 0,5 \end{cases}, \quad (2-5)$$

com $\lambda_{kh} = 3(1 - 0,5^{-k_h})$ e $0 \leq k_v \leq 1$. O parâmetro k_h vale 0,7 para antenas típicas e 0,8 para antenas com a supressão de lóbulos laterais aprimorada (39) (ou antenas IMT).

O ganho relativo de referência no plano de elevação é dado por

$$G_{vr}(x_v) = \begin{cases} -12x_v^2, & \text{para } x_v < x_k \\ -12 + 10 \log(x_v^1, 5 + k_v), & \text{para } x_k \leq x_v < 4 \\ -\lambda_{kv} - C \log(x_v), & \text{para } 4 \leq x_v < 90^\circ/\theta_3 \\ G_{180}, & \text{para } x_v \geq 90^\circ/\theta_3 \end{cases}, \quad (2-6)$$

onde k_v é o fator de ajuste de perda de energia ($0 \leq k_v \leq 1$), $x_k = \sqrt{1 - 0.36k_v}$ e $\lambda_{kv} = 12 - C \log(4) - 10 \log(4^{-1,5} + k_v)$. O fator de atenuação de inclinação é definido por

$$C = \frac{10 \log \left(\frac{\left(\frac{180^\circ}{3} \right) (4^{-1,5} + k_v)}{1 + 8k_p} \right)}{\frac{22,5^\circ}{\theta_3}}. \quad (2-7)$$

O ganho mínimo G_{180} é definido por

$$G_{180} = -12 + 10 \log(1 + 8k_p) - 15 \log \left(\frac{180^\circ}{\theta_3} \right), \quad (2-8)$$

onde k_p é o parâmetro que realiza o ganho mínimo relativo para diagramas com pico de lóbulo lateral, que usualmente tem o valor de 0,7 (39).

A Figura 2.3 mostra um exemplo de diagrama horizontal como combinação de diagramas setoriais, com $\sigma_1 = 60^\circ$, $\sigma_2 = 180^\circ$ e $\sigma_3 = 300^\circ$. A Figura 2.4 apresenta um exemplo de diagrama de elevação para $\theta = 10^\circ$. Os diagramas foram gerados de acordo com a ITU-R F.1336-5 (39).

A Figura 2.5 apresenta um mapeamento da razão sinal-ruído mais interferência (SINR, *Signal-to-interference-plus-Noise Ratio*) ao usar 4 BSs com os diagramas setoriais apresentados nas Figuras 2.3 e 2.4. Nela, pode-se observar a divisão entre os setores no mapa de calor.

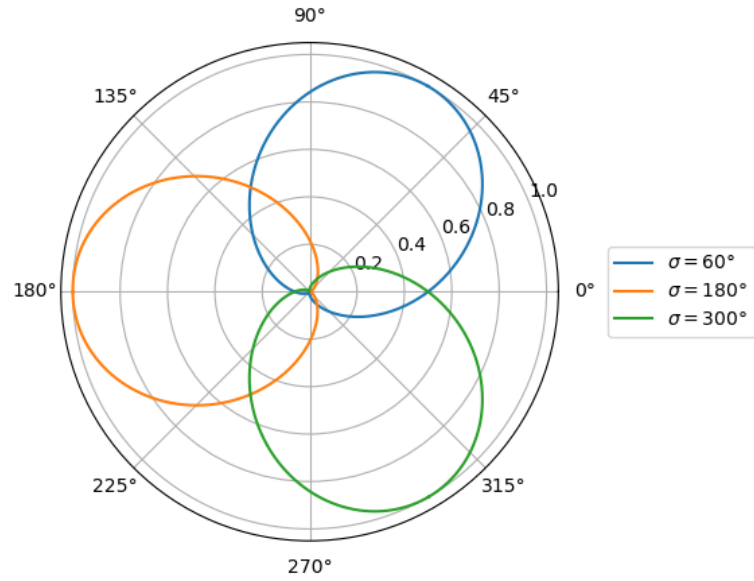


Figura 2.3: Diagramas de radiação no plano de azimuth derivados da ITU-R F.1336-5 para $\sigma_1 = 60^\circ$, $\sigma_2 = 180^\circ$ e $\sigma_3 = 300^\circ$.

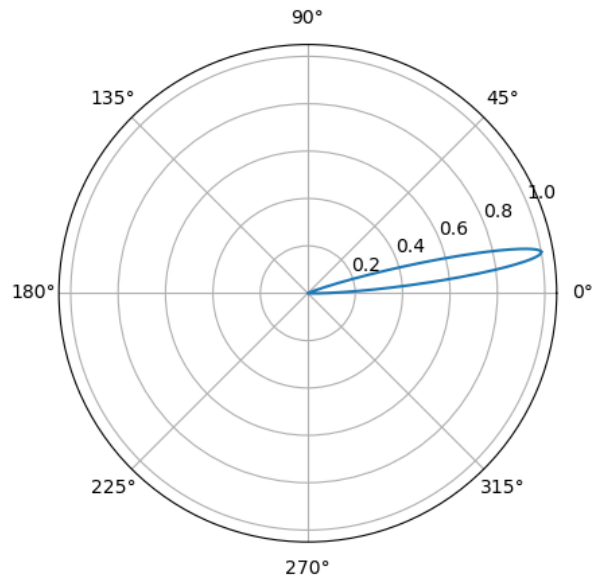


Figura 2.4: Diagrama de radiação no plano de elevação derivado da ITU-R F.1336-5 para $\theta = 10^\circ$.

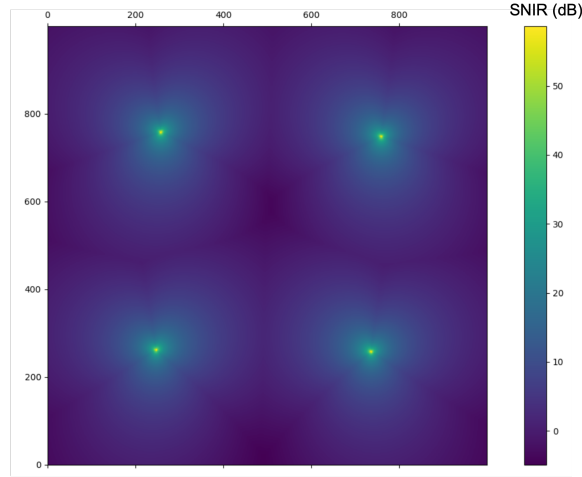


Figura 2.5: Mapa de SINR gerado a partir do uso de 4 BSs alocadas equidistantemente em uma grade de 1000×1000 pixels de 30m^2 com diagramas setoriais das Figuras 2.3 e 2.4.

2.4.3.2

Antenas com conformação de feixe - *Beamforming*

Antenas com conformação de feixe (*beamforming*) usam um arranjo de elementos irradiantes para produzir um diagrama de radiação estreito (com pequeno ângulo de abertura ou de meia potência). O diagrama de radiação é obtido pelo arranjo físico dos elementos irradiantes e pelo ajuste dos coeficientes que determinam as fases dos alimentadores de tais elementos (40, 41). Um modelo esquemático de tal configuração é ilustrado na Figura 2.6.

Simula-se uma antena com tecnologia *beamforming* usando o procedimento descrito na recomendação 3GPP TR 37.840 (40) para produzir os feixes gerados por um arranjo de $H \times V$ (horizontal \times vertical) elementos dispostos no plano zy , perpendicular ao eixo x (41), como na Figura 2.6. O ganho do feixe na direção (θ, ϕ) (ângulo de elevação, ângulo de azimute) é

$$G(\theta, \phi) = G_{\text{Max}} - \min \{ -|A_H(\phi) + A_V(\theta)|, A_m \}, \quad (2-9)$$

onde $A_H(\phi)$ e $A_V(\theta)$ são as atenuações horizontal e vertical, respectivamente, G_{Max} é o máximo ganho direcional de um único elemento irradiante e A_m é a relação frente-costa. Os fatores de atenuação $A_H(\phi)$ e $A_V(\theta)$ dependem dos ângulos de abertura vertical e horizontal (ângulo de meia-potência vertical e

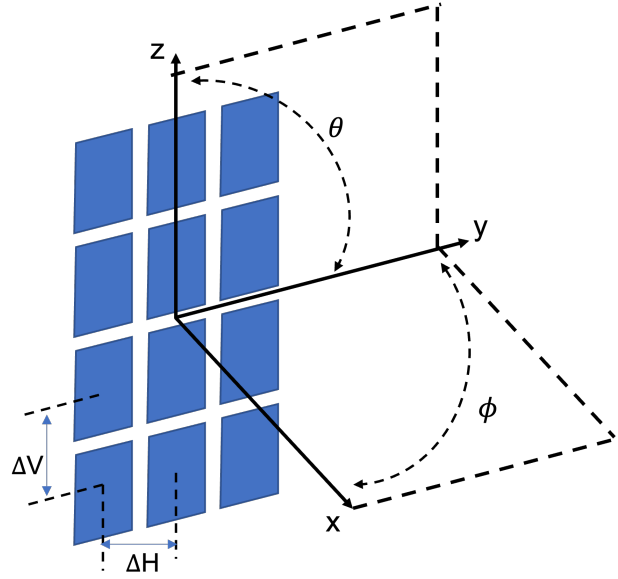


Figura 2.6: Exemplo de um arranjo de beamforming de uma antena cujos elementos estão dispostos ao longo do eixo z e espaçados de $\Delta H \times \Delta V$.

horizontal), ϕ_{3dB} e θ_{3dB} , e são dados por

$$A_H(\phi) = -\min \left\{ 12 \left(\frac{\phi}{\phi_{3dB}} \right)^2, A_m \right\} \quad (2-10)$$

$$A_V(\theta) = -\min \left\{ 12 \left(\frac{\theta - 90}{\theta_{3dB}} \right)^2, SLA_V \right\}, \quad (2-11)$$

onde SLA_V é o limite de supressão do lóbulo lateral.

O diagrama de radiação do b -ésimo feixe $G_b(\theta, \phi)$ é resultado da contribuição de $H \times V$ elementos do arranjo. Com $v_{h,v}$ e $w_{b,h,v}$, sendo o vetor de superposição e vetor de pesos do arranjo, respectivamente, para $h = 1 \dots H$, $v = 1 \dots V$ e b índices de feixe. O diagrama de radiação do arranjo resultante para o b -ésimo feixe (41, 40) é

$$G_b(\theta, \phi) = G(\theta, \phi) + 10 \log_{10} \left(\sum_{h=1}^H \sum_{v=1}^V w_{b,h,v} v_{h,v} \right). \quad (2-12)$$

Os elementos das matrizes são

$$w_{b,h,v} = \frac{1}{\sqrt{HV}} e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} [(h-1)\Delta V \sin(\theta_b) - (v-1)\Delta H \cos(\theta_b) \sin(\phi_b)]} \quad (2-13)$$

$$v_{h,v} = e^{-j 2\pi \lambda [(h-1)\Delta V \cos(\theta) + (v-1)\Delta H \sin(\theta) \sin(\phi)]}, \quad (2-14)$$

respectivamente, onde ΔH e ΔV são os espaçamentos horizontal e vertical, λ é o comprimento de onda e θ_b e ϕ_b são os ângulos de elevação e de azimute

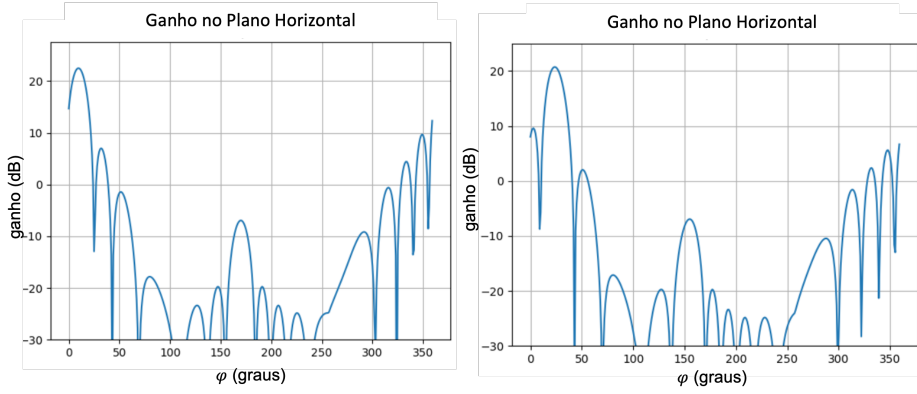


Figura 2.7: Diagramas no plano vertical para uma antena de arranjo 8×8 com $\phi_b = 10^\circ$ e $\phi_b = 20^\circ$, à esquerda e à direita, respectivamente.

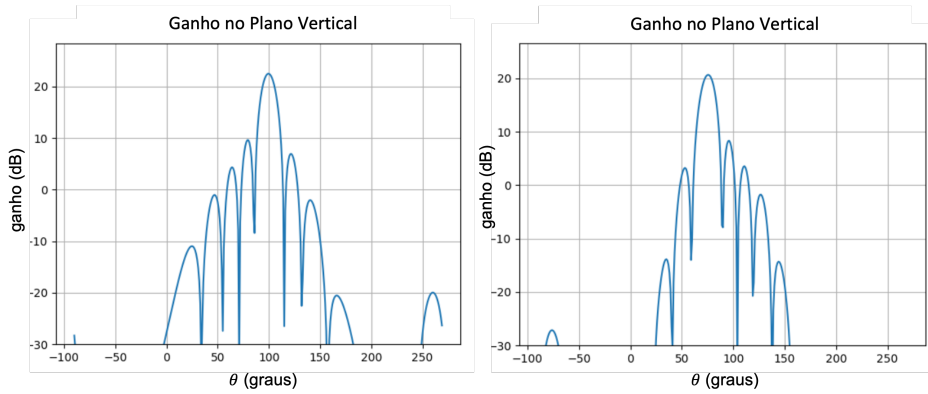


Figura 2.8: Diagramas no plano vertical para uma antena de arranjo 8×8 com $\theta_b = 10^\circ$ e $\theta_b = -30^\circ$, à esquerda e à direita, respectivamente.

para o qual o b -ésimo feixe aponta, respectivamente. O par (θ_b, ϕ_b) contém os ângulos de *tilt* e *scan* do feixe (41, 40). Um exemplo de $G(\theta, \phi)$ resultante é ilustrado na Figura 2.7 para ϕ_b fixo e na Figura 2.8 para de θ_b fixo.

2.4.3.3

Grade de feixes - *Grid of Beams* (GOB)

Uma GOB lista as orientações (θ_b, ϕ_b) que definem os apontamentos dos feixes de um setor de uma BS (42). Na Figura 2.9, apresenta-se uma visualização conceitual de uma GOB. Como pode ser observado nas Figuras 2.7 e 2.8, como os ganhos dos diagramas de radiação dos feixes variam dependendo de (θ_b, ϕ_b) (e para ângulos distantes do centro físico do arranjo, o ganho diminui), a GOB resulta da combinação dos diagramas de radiação dos diferentes feixes (43). Um bom projeto de RAN é aquele em que todo UE presente na ROI se encontra no ângulo de meia potência de algum feixe. Por isso, desenha-se a GOB de forma que os feixes se sobreponham e formem uma cobertura contígua dentro de um setor. No Sama, a GOB é gerada e os feixes

são escolhidos para formarem regiões complementares, segmentando o alcance de azimuth de um setor para cada abertura de feixe. Pode-se também usar uma configuração customizada de feixes fora da GOB.

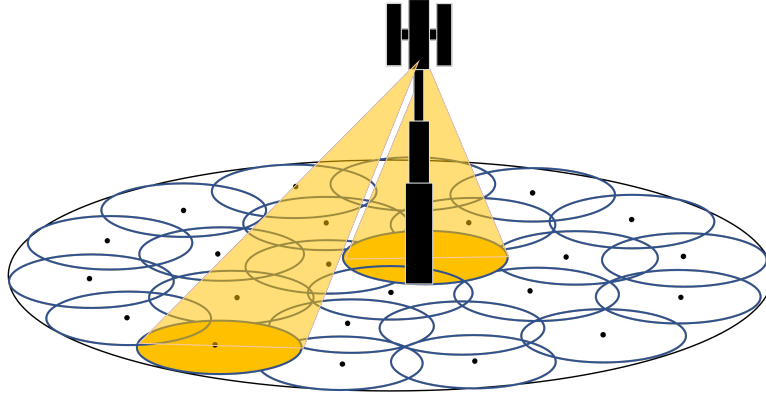


Figura 2.9: Ilustração de uma GOB para uma BS. As circunferências em azul representam todas as possíveis configurações de feixes que complementam a região de cobertura da BS. As circunferências preenchidas em amarelo representam os feixes ativos num instante de tempo.

O uso da GOB provê uma estratégia de baixa complexidade para simulação do apontamento de feixes visando associar os UEs aos feixes de BSs que possam atendê-los (42). Ao analisar a potência recebida e o CSI na matriz de canal, pode-se associar o feixe a um UE a ser servido. Somente feixes que servem a algum UE se mantêm ativos na RAN.

2.4.4

Informação de Estado do Canal - *Channel State Information (CSI)*

Estimar o ganho de canal e, consequentemente, o seu CSI, é fundamental para simular uma RAN e estimar a capacidade dos canais propiciados pela RAN. O CSI é obtido através de sinais de referência (CSI-RS, *Channel State Information Reference Signals*) e, tal sondagem, permite à BS alocar os recursos empregados, a fim de atingir maior capacidade. Na simulação foi assumido um canal com desvanecimento plano, admitindo que a largura de faixa de cada subportadora é menor do que a banda de coerência do canal. Considera-se ainda que a potência do sinal de sondagem é igual para todas as BSs. Assim, o CSI do b -ésimo feixe da n -ésima BS no u -ésimo UE, em dB, é dado por

$$\text{CSI}(u, n, b) = P_{\text{Tx}}(n) + G(u, n, b) - \text{PL}(n, u), \quad (2-15)$$

a potência do sinal de sondagem recebido no u -ésimo UE após ser transmitido pelo b -ésimo feixe do n -ésimo setor, onde $P_{\text{Tx}}(n)$ é a potência de transmissão do n -ésimo setor, $G(u, n, b)$ é o ganho do b -ésimo feixe do n -ésimo setor em direção para o u -ésimo UE e $\text{PL}(n, u)$ é a perda de propagação correspondente

(PL, *Path Loss*). Uma ilustração da simulação da medida do CSI é apresentada na Figura 2.10.

Para simplificar o problema, a escolha da MCS (*Modulation and Coding Scheme*) e a codificação de CQI (*Channel Quality Indicator*) não são tratadas atualmente pelo Sama. Esta simplificação corresponde à aproximação denominada *perfect CSI* (44). Esta escolha não afeta as comparações feitas nesta tese e a análise proposta a partir da Equação (2-15) e da Equação (2-30). No caso, um UE reporta o SINR medido (se for o caso, dos múltiplos feixes da BS) à BS com a qual está alocado.

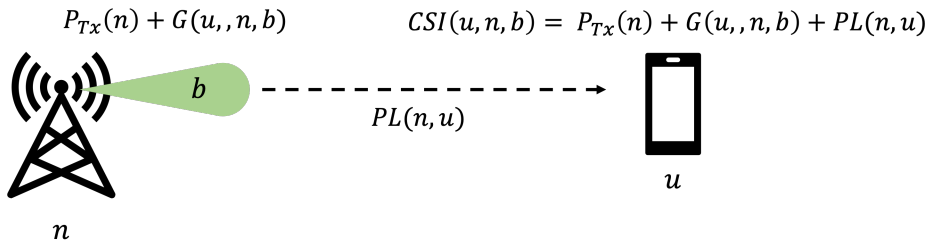


Figura 2.10: Diagrama esquemático da obtenção do CSI de uma UE u atendida por um feixe b de uma BS n .

2.4.4.1

Modelo de Perda de Propagação

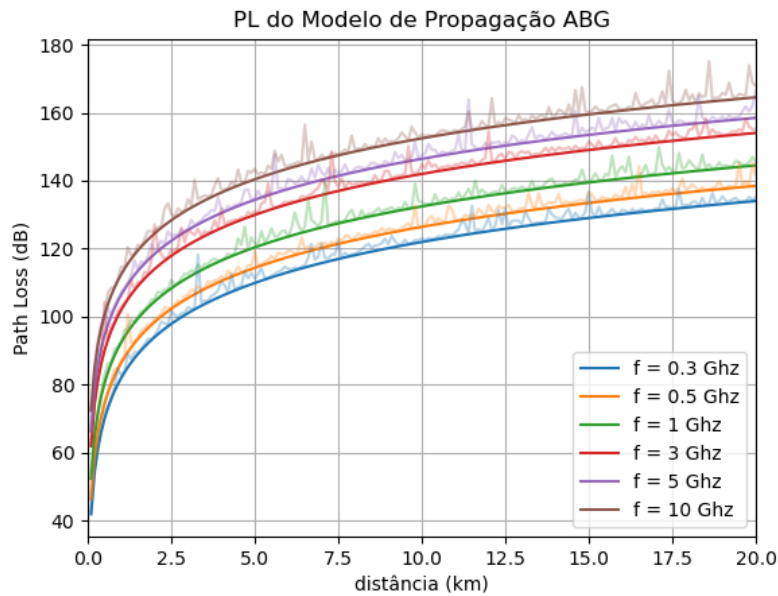
Modela-se a perda de propagação, ou *Path Loss* (PL), usando o modelo alpha-beta-gama (ABG) (45). O ABG é um modelo empírico que estima a perda de propagação em larga escala (46) usando três coeficientes (45). A perda de propagação PL_{ABG} é dada por

$$PL_{ABG}(f, d) = 10\alpha \log_{10}(d) + \beta + 10\gamma \log_{10}(f) + \mathcal{X}_{\sigma}^{ABG} [\text{dB}], \text{ com } d > 1 \text{ m}, \quad (2-16)$$

onde α e γ expressam as dependências do PL com a distância d (considerada-se a distância 3D entre o transmissor e receptor) entre o transmissor (BS) e receptor (UE) e a frequência de operação f , respectivamente, β é uma constante e $\mathcal{X}_{\sigma}^{ABG}$ é uma variável aleatória que representa a variação de larga escala causada pelo efeito de sombreamento, usualmente modelada usando uma densidade log-normal (47). Os limites de operação do modelo são apresentados na tabela 2.2. Os coeficientes α , β e γ são obtidos a partir do ajuste de dados de medições. A Figura 2.11 mostra curvas do PL com a distância obtidas com o ABG.

Tabela 2.2: Limiar de Sensibilidade para Banda de Operação/Largura de Banda de Frequências para um Espaçamento de Subportadoras de 15 kHz

Cenário	Meio	Faixa de Frequências (GHz)	Faixa de distâncias (m)
Urbano Macro-celular	LOS	2-73,5	58-930
	NLOS	2-73,5	45-1429
Urbano Micro-celular	LOS	2-73,5	5-88
	NLOS	2-73,5	8-235

Figura 2.11: Curvas de PL calculadas com o modelo de propagação alpha-beta-gama (ABG), com valores médios e variação de larga escala. O modelo foi calculado com $\alpha = 4$, $\beta = 92.45$, $\gamma = 2$ e $\sigma = 1$, para d em km e f em GHz.

2.4.5

Associação UE-BS

Existem diversos algoritmos de associação entre UE-BS que têm diferentes objetivos, como eficiência energética, eficiência espectral, QoS, *fairness*, dentre outros, como também para diversos tipos de rede: HetNets, ondas milimétricas, MIMO massivo (17). No Sama, optou-se o por implementar o algoritmo max-RSS (*Received Signal Strength*) pela sua simplicidade. Futuramente, outros algoritmos podem ser incorporados ao simulador.

Considera-se que a BS transmite um sinal-piloto no *downlink* como sinal de referência (18). A UE mede a potência deste sinal-piloto para obter o CSI. Quanto maior o valor do CSI, melhor a condição do canal. Não é considerada a incerteza nas medidas feitas pela UE. Entretanto, pode-se considerar que ela está incluída no efeito aleatório do somreamento do modelo

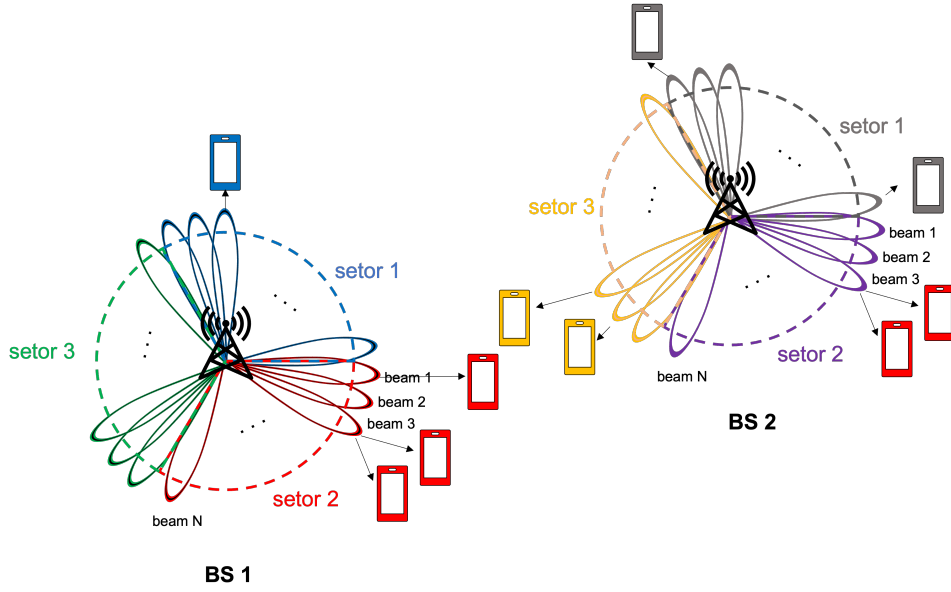


Figura 2.12: Ilustração do processo de associação entre UEs e feixes de BSs. As duas BSs apresentam conjuntos de feixes com os mesmos ângulos de elevação.

de propagação (48).

A UE é responsável por informar à BS que deseja acessar a rede (49). Em uma rede 5G, pode-se assumir que UE e BS possuem a informação de CSI (ou de CQI, caso se considere a codificação empregada). Associa-se o u -ésimo UE a um feixe b_u num setor de uma BS n_u quando

$$(n_u, b_u) = \operatorname{argmax}_{(n,b) \in \{1 \dots N\} \times \{1, B_n\}} \text{CSI}(u, n, b), \quad (2-17)$$

onde N é o número de BSs na RAN (ou de setores de BSs, no caso de se aglutinar as referências a ambos no mesmo índice). Ou seja, associa-se o u -ésimo UE ao feixe da BS que lhe oferece o melhor canal, o de maior CSI. A Figura 2.12 ilustra a associação entre UEs e BS.

Outras técnicas de associação, como particionamento de espectro, *biased* ou controle de potência (17), podem ser modeladas e adicionadas ao simulador.

Limiar de sensibilidade O limiar de sensibilidade de potência do UE segue a especificação do 3GPP ETSI TS 138 101-1 (38). Se o CSI entre um UE e todos os feixes de BSs da RAN estiver abaixo do limiar de sensibilidade, o UE não será conectado à RAN.

2.4.5.1

Distribuição de UEs

A cada rodada de simulação, o Sama considera que U UEs estão ativos e demandam recursos da RAN. A distribuição de UEs e, consequentemente,

dos UEs ativos na RAN, pode ser definida de diversas maneiras. Pode-se, por exemplo, modelar probabilisticamente e sortear as posições dos UEs a partir de uma densidade de probabilidades (PDF) espacialmente uniforme na ROI ou usando uma PDF composta por um conjunto de PDFs parametrizáveis do tipo Gaussiana. A Figura 2.13 ilustra esses dois exemplos de distribuições de UEs sorteadas a partir de uma distribuição uniforme (na esquerda) ou de um conjunto de quatro Gaussianas (na direita).

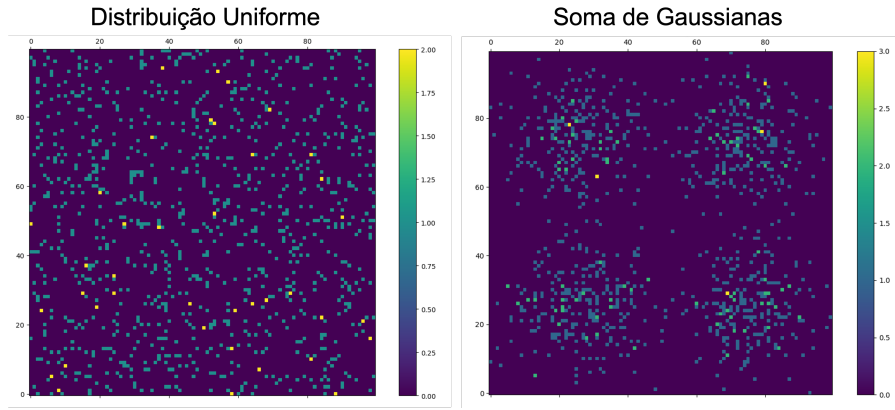


Figura 2.13: Comparativo entre a distribuição de 1000 UEs em uma ROI de 100×100 pixels. Na esquerda, usa-se a distribuição uniforme para sortear as posições e, na direita, usa-se a soma de quatro gaussianas.

Amostrando a demanda dos UEs Assume-se que a distribuição espacial dos UEs $S(x, y)$ pode ser decomposta em I parcelas, onde cada parcela é uma distribuição bivariada, isto é,

$$S(x, y) = \text{CT} \frac{\sum_{i=1}^I S_i(x, y)}{\int \int_{\mathcal{R}} \sum_{i=1}^I S_i(x, y) dx dy}, \quad (2-18)$$

portanto, $\int \int_{\mathcal{R}} S(x, y) dx dy = \text{CT}$. Ou seja, a densidade de UEs em $(x, y) \in \mathcal{R}$ pode ser descrita como

$$S(x, y) = \text{CT} \sum_{i=1}^I a_i G(\Gamma_i) \quad (2-19)$$

onde o coeficiente a_i é a amplitude ou peso e Γ_i contém os parâmetros que definem a i -ésima parcela (um componente da distribuição).

Para amostrar a distribuição espacial de UEs, sorteiam-se U amostras a partir de $S(x, y)$. Observa-se que, decompondo $S(x, y)$ como na Equação (2-19), a_i é a fração de UEs que cada parcela modelada. Então, amostra-se $s_u = (x_u, y_u)_{u=1 \dots U}$ sorteadando $a_i U$ amostras de cada parcela $G(\Gamma_i)$.

Modelo Gaussiano Bivariado Assumindo que as parcelas na Equação (2-19) são Gaussianas bivariadas, a densidade $S(x, y)$ para $(x, y) \in \mathcal{R}$ pode ser descrita como

$$S(x, y) = \text{CT} \sum_{i=1}^I a_i G(\bar{x}_i, \bar{y}_i, \rho_i, \sigma_{x,i}, \sigma_{y,i}), \quad (2-20)$$

onde cada $G(\bar{x}_i, \bar{y}_i, \sigma_{x,i}, \sigma_{y,i})$ é uma gaussiana com centro em (\bar{x}_i, \bar{y}_i) , espalhamento (desvio padrão) $\sigma_{x,i}$ e $\sigma_{y,i}$, e correlação $0 \leq \rho_i \leq 1$ entre x e y , i.e.,

$$G(\bar{x}, \bar{y}, \rho, \sigma_x, \sigma_y) = \frac{1}{2\pi\sigma_x\sigma_y\sqrt{1-\rho^2}} e^{\left(-\frac{z}{2(1-\rho^2)}\right)}, \quad (2-21)$$

$$\text{onde } z = \frac{(x - \bar{x})^2}{\sigma_x^2} + \frac{2\rho(y - \bar{y})(x - \bar{x})}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y - \bar{y})^2}{\sigma_y^2}. \quad (2-22)$$

Distribuição Arbitrária de UEs Outra característica do Sama é a capacidade de utilizar uma distribuição arbitrária de UEs. Neste caso, a ROI é dividida em pixels e o Sama lê um arquivo de entrada com a probabilidade relativa de cada pixel conter um UE. Seja $\text{pr}(x, y)$ a probabilidade de existir um UE no pixel de posição (x, y) , a função de densidade acumulada correspondente é

$$\text{Pr}(x, y) = \sum_{x' \leq x} \sum_{y' \leq y} \text{pr}(x', y'). \quad (2-23)$$

Assim, sorteia-se uma variável aleatória a partir de uma distribuição uniforme entre $[0, 1)$, procura-se por $\text{Pr}(x, y)$ de valor mais próximo ao dela e posiciona-se uma UE em (x, y) . Itera-se U vezes para obter as posições para U UEs. Nota-se que esta formulação pode ser usada em uma ROI com formato arbitrário a partir do ordenamento dos pixels da ROI. Um exemplo de aplicação desta metodologia é apresentado na Figura 2.14.

2.4.5.2

Arranjo de BSs

Em cada rodada da simulação, o Sama considera que a RAN é composta por N BSs. Para avaliar um arranjo legado de BSs, é possível ler as suas posições a partir de um arquivo. Outra opção é alocar as posições das BSs aleatoriamente usando uma distribuição uniforme. Não obstante, para obter o melhor desempenho de uma RAN, a influência do arranjo de BS deve ser mitigada. Para isso, conforme explicado na Seção 4.3.2, pode-se usar o agrupamento para posicionar as BSs nos centroides que minimizam a distância euclidiana média entre as BSs e as UEs a elas conectadas (50). A Figura 2.14.(d) apresenta o arranjo de BSs resultante do processo de clusterização

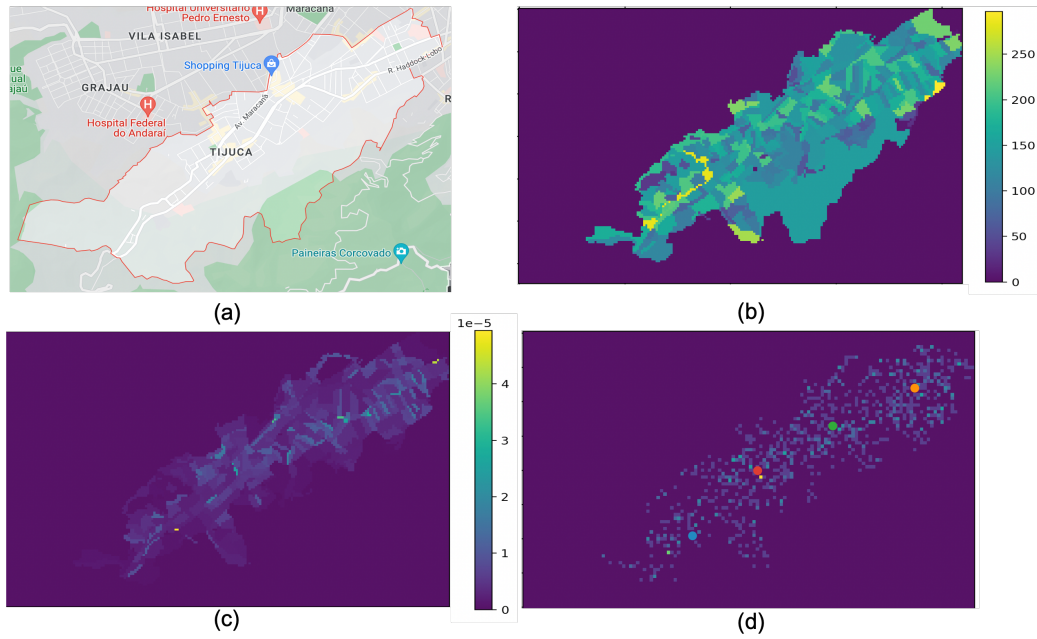


Figura 2.14: Um exemplo de distribuição de UEs e do arranjo de BSs resultantes do algoritmo de clusterização, detalhado na Seção 4.3, aplicado ao bairro da Tijuca na cidade do Rio de Janeiro. (a) Definição da ROI a partir de um serviço de mapas. (b) Número estimado de residências com acesso à conexão banda larga sem-fio usando dados do Censo e PNAD (1, 2). (c) Probabilidade derivada de (b) de um pixel conter um UE. (d) 800 UEs sorteados a partir da densidade em (c) e a posição de 4 BSs (círculos maiores e coloridos) resultante do algoritmo de clusterização.

para um conjunto de 800 UEs construído a partir de dados públicos de perfis de renda (1, 2).

2.5

Estrutura de Recursos Tempo-Frequência

A estrutura na qual se organizam os recursos de uma rede 5G NR (5G *New Radio*) pode ser representada usando uma grade tempo-frequência, como mostra a Figura 2.15. Esta grade tem como eixos o tempo e a frequência e seu menor elemento é chamado de recurso elementar (*Resource Element*), ou RE. O RE é a menor unidade de divisão no tempo-frequência, correspondente à ocupação espectral de uma subportadora CP-OFDM (*Cyclic Prefix – Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) durante a duração temporal de um símbolo OFDM. Qualquer alocação de recursos é composta de vários REs.

A Figura 2.15 também apresenta o Bloco de Recursos (*Resource Block*), ou RB, definido como o conjunto de REs, com o formato utilizado no LTE (12 subportadoras \times 7 símbolos OFDM). No 5G-NR, usa-se o formato de 12 subportadoras \times 1 até 14 símbolos OFDM (ou intervalos de tempo, a duração do símbolo OFDM).

O NR permite ainda diferentes espaçamentos entre as portadoras OFDM. Enquanto o LTE utiliza um espaçamento fixo de subportadoras de 15 kHz, o NR permite espaçamentos em múltiplos de 15 kHz, até 480 kHz, com a máxima banda de frequências usada variando de 50 até 400 MHz. A escolha depende da faixa de frequências utilizada na RAN. Para acomodar os diferentes tamanhos de RBs do NR, o simulador Sama pode ser configurado com qualquer tamanho de subportadora (ou conjunto de subportadoras) e tamanho do símbolo OFDM, independentemente do algoritmo de alocação de recursos escolhido.

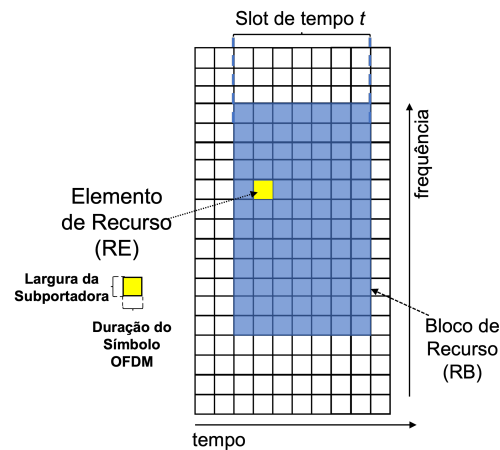


Figura 2.15: Representação típica de um Bloco de Recursos (*Resource Block*, RB). O LTE RB é o conjunto de 12 subportadoras \times 7 símbolos OFDM que resulta em 84 Elementos de Recurso (*Resource Elements*, RE), a menor fração do RB.

2.6

Algoritmos de Alocação de Recursos

Um algoritmo de alocação de recursos (*scheduler*) distribui os recursos compartilhados para os UEs a cada Intervalo de Tempo de Transmissão (TTI, *Transmission Time Interval*). Uma BS pode receber, periodicamente, indicadores de qualidade do canal (CQI, *Channel Quality Indicator*) dos UEs para auxiliar na alocação. Os três algoritmos de alocação de recursos mais utilizados são *Round-Robin* (RR), *Best Channel Quality Indicator* (BCQI) e *Proportional Fair* (PF) (51, 52, 18). Cada um deles visa distribuir os RBs aos UEs atendidos por uma BS. Os princípios de funcionamento desses algoritmos são apresentados a seguir. O simulador Sama implementa os três, cujos desempenhos serão comparados na Seção 3.1 e, na Seção 5.5, serão comparados com a proposta de alocação de recursos introduzida na Seção 5.1.

2.6.1

Round-Robin (RR)

O algoritmo de alocação de recursos RR designa recursos para todos os UEs recursivamente, em uma fila criada de forma aleatória, sem considerar as condições do canal. Esse processo de alocação é ilustrado na Figura 2.16. É bastante igualitário do ponto de vista dos UEs, já que a alocação de recursos não depende deles, e é amplamente utilizado pela sua simplicidade (22). No entanto, como ignora o estado do canal e sua qualidade, esta forma de gerenciamento de recursos prejudica o desempenho global do sistema em termos de capacidade (22).

Neste trabalho, considera-se o RR orientado aos feixes alocando os RBs de acordo com o tamanho da fila de UEs em cada feixe (a quantidade de UEs a serem atendidos por um feixe), priorizando os feixes com filas mais longas (53).

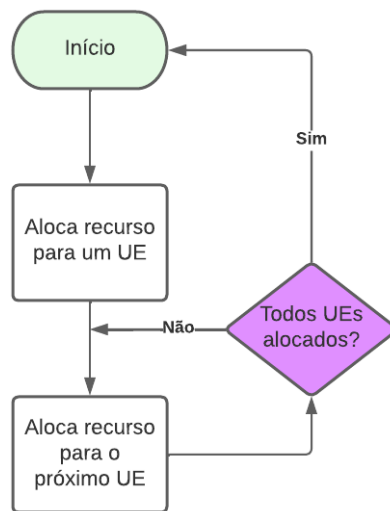


Figura 2.16: Fluxograma do algoritmo de alocação de recursos *Round-Robin*.

2.6.2

Best Channel Quality Indicator (BCQI)

O algoritmo BCQI aloca RBs priorizando os UEs com os melhores enlaces (ou melhores CQI) a cada TTI. A sondagem é geralmente feita no enlace de descida. A gNodeB transmite um sinal de referência para o UE, que mede o nível de potência do sinal de sondagem e retorna um valor de CQI. As BSs recebem as informações de CQI de cada UE e o algoritmo garante recursos para os UEs com melhores CQIs, de modo que estes terão taxas de transferências de dados mais altas. A Figura 2.17 ilustra esse algoritmo. Ele tem baixa equidade na distribuição de recursos, ou baixa *fairness* (22), já que UEs com os piores CQI podem nunca receber recursos (18). Outra característica importante desta estratégia de alocação é que, devido à baixa *fairness* entre UEs, ele pode

apresentar alta latência para UEs com baixo CQI (geralmente por estarem localizados em bordas de células) ou nem mesmo atendê-los.

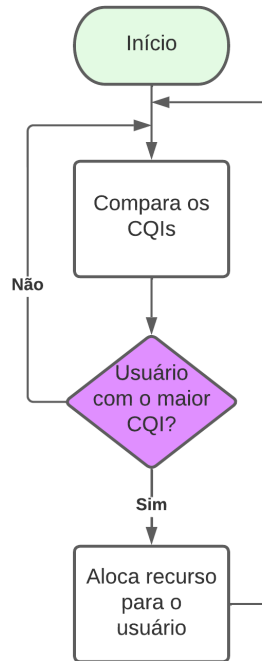


Figura 2.17: Fluxograma do algoritmo de alocação de recursos *BCQI*.

2.6.3

Proportional Fair (PF)

O PF é um algoritmo de alocação amplamente usado na indústria (18). Ele combina as estratégias de alocação do RR e do BCQI, conseguindo um compromisso entre uma maior equidade na alocação de recursos entre UEs e uma alta taxa média de transmissão de dados. O algoritmo PF designa recursos para o UE com o melhor CQI (no caso de empate, sorteia um entre os empatados) e, no próximo TTI, aloca recursos ciclicamente entre os demais. No TTI seguinte, usa novamente o critério do BCQI, repetindo o processo ciclicamente (54). A Figura 2.18 ilustra esse algoritmo.

2.6.4

Tabelas de Ativação e Controle de Potência

O tempo de simulação é dividido em *slots*, definidos como a menor fração de tempo da simulação total T . Assume-se que em cada *slot* de tempo t , somente um feixe estará ativo por setor. O feixe ativo pode atender a diversos UEs simultaneamente durante um *slot* de tempo usando múltiplas subportadoras.

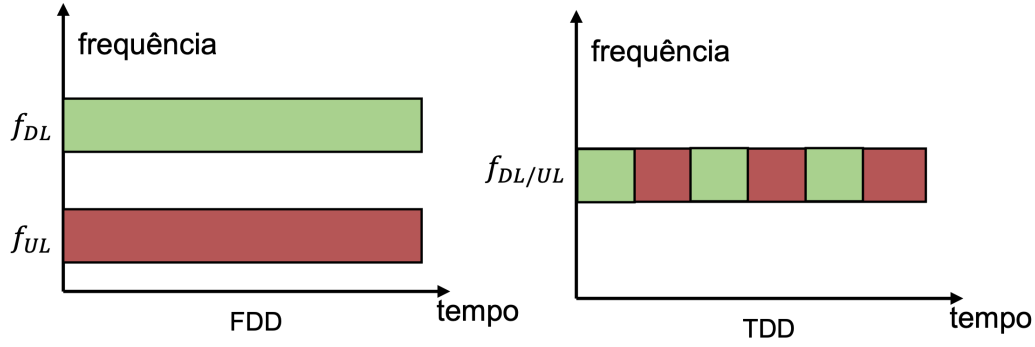


Figura 2.19: Comparativo entre as tecnologias FDD e TDD na alocação de recursos para obter duplexação.

banda. Assim, a densidade de potência

$$P_{Tx}(t, f, u, n, b) = \frac{P_{\max}}{BW}, \quad (2-25)$$

onde BW é a largura de banda do sistema.

2.7

Duplexação

A duplexação é o processo através do qual um sistema fornece conexões simultâneas em duas direções. É normalmente realizada de duas maneiras: duplexação por divisão de frequência (*Frequency-Division Duplexing*, FDD) e duplexação por divisão de tempo (*Time-Division Duplexing*, TDD) (55). As duas formas estão ilustradas na Figura 2.19. A FDD utiliza diferentes faixas de frequência para os enlaces de descida, da BS para o UE (*downlink*), e de subida, do UE para a BS (*uplink*). O TDD utiliza uma mesma largura de banda nos dois sentidos, transmitindo alternadamente em cada direção durante pequenos intervalos de tempo, de forma transparente para os usuários. Dependendo do caso de uso, uma estratégia pode ser mais vantajosa que a outra (56).

Para a simulação da TDD, o Sama usa a razão *full-duplex* (55, 19)

$$r_{\text{duplex}} = t_{\text{up}} / (t_{\text{up}} + t_{\text{down}}) \quad (2-26)$$

para alocar os recursos frequenciais em intervalos de tempo distintos para subida e descida.

A fim de permitir uma maior flexibilidade na simulação, o Sama admite que os algoritmos de alocação de *downlink* e *uplink* sejam independentes, bem como os utilizados em BSs distintas.

2.8

Medidas de Desempenho da Rede

É importante que o simulador consiga prover indicadores para avaliar o desempenho da alocação em função do tipo de aplicação (eMBB, URLLC ou mMTC). Tanto para o cenário de uso da RAN para o serviço eMBB, como para o mMTC, o indicador mais importante para avaliar o desempenho da RAN é a taxa de dados de cada UE. Essa taxa depende da largura de banda de frequências empregada, o tamanho e quantidade de *slots* de tempo alocados e a SINR durante a recepção do UE.

Avalia-se o desempenho considerando cada intervalo (*slot*) de tempo t , com os quais computa-se o resultado para o tempo total de simulação T . Nas simulações, sorteiam-se as posições dos UEs, assumindo-os fixos durante o T (os UEs não se movimentam durante o intervalo de tempo T). Consequentemente, a associação entre UEs e as BSs, os feixes que atendem os UEs e o CSI, não variam durante tal intervalo.

2.8.1

Indicadores de Desempenho por UE

2.8.1.1

SINR - Razão Sinal-Ruído Mais Interferência

A razão sinal-ruído mais interferência (SINR) é a razão entre a potência recebida no UE a partir do feixe que o atende e a soma das contribuições das potências dos sinais interferentes de qualquer outro feixe ativo durante o *slot* de tempo t mais a contribuição da potência de ruído. Durante o *slot* de tempo t , um UE operando na subportadora f , localizado em $p_u = (x_u, y_u)$, associado com o setor n_u e o feixe b_u , opera sob uma SINR dada por

$$\text{SINR}_{\text{DL}}(t, f, u) = \frac{P_{\text{Rx}}^{\text{DL}}(u, n_u, b_u)}{\sum_{(n,b) \neq (n_u, b_u)} \zeta(t, f, u, n, b) P_{\text{Rx}}^{\text{DL}}(u, n, b) + P_{\text{N}} \text{BW}(t, f, u)}. \quad (2-27)$$

onde $P_{\text{Rx}}^{\text{DL}}(u, n_u, b_u)$ é a potência recebida em p_u (posição do u -ésimo UE) vinda do feixe b_u do setor n_u . Acima, P_{N} é a densidade espectral do ruído, e $\text{BW}(t, f, u)$ é a largura de banda de frequências durante o *slot* de tempo t para o UE u . Logo, $\text{BW}(t, u)$ depende da alocação de recursos. Finalmente, $\zeta(t, f, u, n, b)$ indica se o b -ésimo feixe que atende o u -ésimo setor está ativo em t . A interferência origina-se de outros feixes (excluindo os que estão no mesmo setor da BS) e na mesma BSs (dado que se assume apenas um feixe

ativo por setor, conforme descrito na Seção 2.6.4). Assume-se que não existe coordenação entre as BSs.

A densidade espectral de ruído é obtida através de

$$P_N = k_B T, \quad (2-28)$$

onde k_B é a constante de Boltzmann (em Joules por Kelvin) e T é a temperatura absoluta em Kelvin.

Similarmente, no enlace de subida, o SINR no feixe b_u no setor n_u no qual o u -ésimo UE envia dados é

$$\text{SINR}_{\text{UL}}(t, f, n_u, b_u) = \frac{P_{\text{Rx}}^{\text{UL}}(u, n_u, b_u)}{\sum_{u' \neq u} \zeta(t, f, u', n, b) P_{\text{Rx}}^{\text{UL}}(u', n_u, b_u) + P_N \text{BW}(t, f, u)}. \quad (2-29)$$

Esta expressão considera a potência recebida $P_{\text{Rx}}^{\text{UL}}(u, n_u, b_u)$ no feixe b_u no setor n_u advinda do UE u . Observa-se que $P_{\text{Rx}}^{\text{UL}}(u', n_u, b_u)$ considera outros UEs que não u . A interferência no feixe origina-se de outras UEs presentes na RAN.

2.8.1.2

Capacidade

A partir da Lei de Shannon obtém-se a capacidade máxima para cada UE durante o *slot* de tempo t via (57)

$$C_{\text{time slot}}(t, u) = \text{BW}(t, u) \log_2 (1 + \text{SINR}(t, u)) \times \Delta_T, \quad (2-30)$$

onde Δ_T é a razão entre um *slot* de tempo e um segundo.

A taxa para o u -ésimo UE até o t -ésimo *slot* de tempo é obtida através do somatório da Equação (2-30) nos *slots* de tempo ativos até t (inclusive). Se $\mathcal{T}(t, u)$ lista os *slots* de tempo em que um feixe atende um UE u até o *slot* de tempo t , a capacidade total do UE u durante o intervalo de tempo é

$$C(t, u) = \sum_{\tau \in \mathcal{T}(t, u)} C_{\text{time slot}}(\tau, u), \quad (2-31)$$

$$C(u) = C(T, u) = \sum_{\tau \in \mathcal{T}(T, u)} C_{\text{time slot}}(\tau, u), \quad (2-32)$$

onde se usa $C(u)$ para $C(T, u)$, i.e., para a capacidade do UE no intervalo total de simulação. A partir disso, se pode obter as capacidades máxima, média e mínima, por exemplo, dentre todos os UEs conectados à RAN.

2.8.1.3

Deficit de Capacidade

Se a RAN precisar ser projetada para prover uma capacidade alvo mínima C_{target} para um ou múltiplos UEs, o déficit de capacidade para o u -ésimo UE até o slot de tempo t é dado por

$$\text{CD}(t, u) = C_{\text{target}} - C(t, u) \quad (2-33)$$

$$\text{CD}(u) = \text{CD}(T, u) = C_{\text{target}} - C(T, u), \quad (2-34)$$

onde usa-se $\text{CD}(u)$ para $\text{CD}(T, u)$, i.e., para a capacidade do UE no intervalo de tempo, após o último slot de tempo.

2.8.1.4

Latência

Em um cenário URLCC, um indicador de qualidade importante é a latência. Ela é o atraso entre o começo de uma transferência de dados e a instrução para sua transferência. Assim, podemos definir uma aproximação da componente de atraso que a rede de acesso de rádio acrescenta à latência total como a variação temporal relativa entre acessos sucessivos ao canal. Para o uplink, tem-se

$$L(t, u) = \min_{\tau \forall f} (\zeta(t, f, n_u, b_u, u) = 1 \mid \zeta(t - \tau, f, n_u, b_u, u) = 1). \quad (2-35)$$

Em outras palavras, define-se a latência como a distância entre dois instantes ativos de um UE. Consideradas estas limitações, é um indicador útil para efeito de comparação relativa do desempenho de diferentes algoritmos de alocação de recursos. Para a formulação dos indicadores, define-se a primeira (o tempo até ocorrer a primeira troca de mensagens entre UE e BS), a mínima, média e a máxima latências para cada UE individualmente (valores primeiro, mínimo, médio e máximo de $L(t, u)$), e a distribuição das medidas de latência para o conjunto de UEs atendidos (onde também obtém-se a latência média).

2.8.2

Indicadores Agregados de Desempenho da RAN

A partir da SINR, da capacidade e da latência, que expressam o desempenho dos UE individualmente, definem-se os indicadores agregados de desempenho da RAN.

2.8.2.1

Throughput da RAN

O *throughput* da RAN é a taxa de dados total da comunicação entre os UEs e a RAN (de todos os seus feixes e setores). É a soma das capacidades de todos os UEs

$$C_{\text{RAN}} = \sum_{u=1}^U C(u). \quad (2-36)$$

No Sama, o *throughput* pode ser computado com diferentes granularidades, como, por exemplo, por setores, permitindo analisar diferentes componentes da RAN.

2.8.2.2

Deficit de Capacidade Médio

O deficit de capacidade médio dos UEs conectados à RAN é dado por

$$\overline{\text{CD}} = \frac{\sum_{u=1}^U \text{CD}(u)}{U} = \frac{\sum_{u=1}^U C_{\text{target}}(u) - C(u)}{U} = \frac{\sum_{u=1}^U C_{\text{target}}(u) - C_{\text{RAN}}}{U}. \quad (2-37)$$

2.8.2.3

Eficiência Espectral

A eficiência espectral avalia a utilização do espectro. Para um UE, a eficiência espectral é a taxa de dados dividida pela largura de banda empregada

$$S_u = \sum_{t=1}^T \frac{C_{\text{timeslot}}(t, u)}{\text{BW}(t, u)}. \quad (2-38)$$

Para toda a RAN, calcula-se a média das eficiências espectrais dos UEs

$$S = \sum_{u=1}^U \sum_{t=1}^T \frac{C_{\text{timeslot}}(t, u)}{U \text{BW}(t, u)}. \quad (2-39)$$

2.8.2.4

Índice de Equidade (*Fairness Index*)

O índice de equidade é o grau com o qual a rede distribui os recursos disponíveis, afetando diretamente a distribuição da capacidade entre os UEs. É calculado através do índice de Jain (58). Para a capacidade, o *fairness index*

é

$$F_C = \frac{\left(\sum_{u=1}^U C(u)\right)^2}{U \sum_{u=1}^U C(u)^2}. \quad (2-40)$$

Representa a fração dos UEs que são tratados justamente (F). Mostra o quão justa é a distribuição da capacidade da rede com os UEs, conectados à RAN.

2.8.3

Critério de Parada

No Sama, pode-se definir o critério de parada de duas maneiras: fixando um número máximo de iterações ou usando o teste U de Mann-Whitney (59). No segundo caso, define-se um tamanho de lote e testa-se se a distribuição conjunta de um indicador formada pelos lotes gerados até a iteração atual e até a iteração anterior pertencem a uma mesma distribuição. Quando é verificada a homogeneidade da solução (não existe diferença significativa na distribuição do indicador escolhido), pode-se parar a simulação. Como padrão, o Sama usa um valor p , a probabilidade das amostras comparadas serem pertencentes a estatísticas diferentes, igual a 0,05 no teste de hipótese do indicador (que é configurável). Este processo é ilustrado na Figura 2.20.

2.8.3.1

Teste de Mann Whitney

O teste de Mann-Whitney é um teste não-paramétrico que testa a hipótese se dois grupos advêm de uma mesma população ou se têm as mesmas medianas (59). Este teste não assume nenhuma distribuição para calcular as estatísticas e os valores p e pode ser usado em grupos pequenos (≤ 20 amostras) ou grandes (> 20 amostras) .

Assumem-se três hipóteses na realização do teste: as observações dos dois grupos devem ser selecionadas aleatoriamente, as observações são independentes entre si e devem ser contínuas ou ordinais. Sejam dois grupos de observações X e Y , de cada um sorteiam-se m e n amostras sorteadas, respectivamente, e calcula-se

$$U_X = mn + \frac{m(m+1)}{2} - R_X \quad (2-41)$$

$$U_Y = mn + \frac{n(n+1)}{2} - R_Y \quad (2-42)$$

$$U = \min(U_x, U_y), \quad (2-43)$$

$$z = \frac{U - \mu_U}{\sigma_U} \quad (2-44)$$

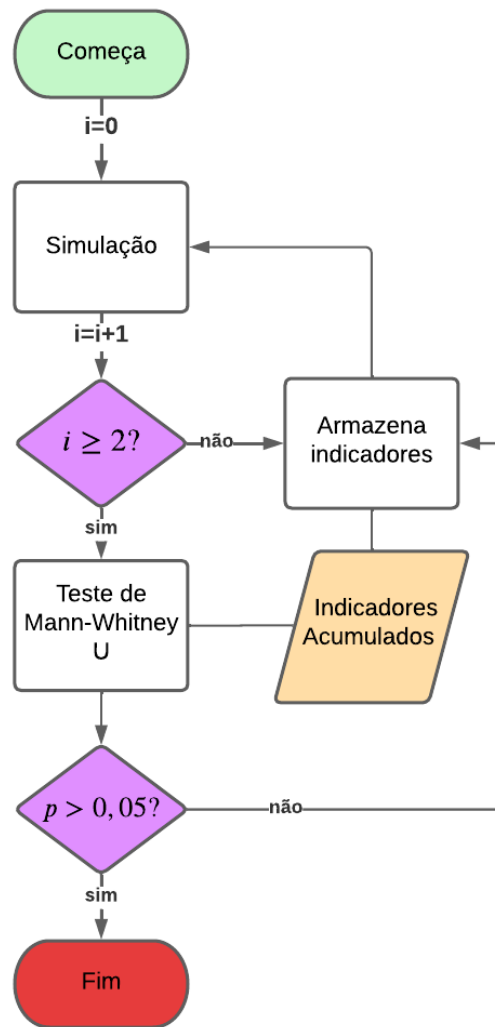


Figura 2.20: Fluxograma da avaliação da distribuição dos indicadores no Sama via teste U de Mann Whitney.

onde U é a estatística de Mann-Whitney, R_X e R_Y são as somas das classificações atribuídas a cada distribuição (59), μ_U e σ_U são a média e o desvio padrão de U , respectivamente. Pode-se obter o valor p , a probabilidade de significância, a partir da estatística z , o valor crítico, e vice-versa. Se $U \leq$ valor crítico, a hipótese é rejeitada.

2.9

Desenvolvimento do Simulador

O simulador Sama (19) é programado em sua maior parte na linguagem de programação Python e de maneira modular, permitindo a alteração e a adição de componentes. Foi projetado para ser configurado editando um arquivo no formato .yaml (yaml) (60).

As entidades descritas neste capítulo são emuladas em classes orientadas a objetos. As associações entre classes e os seus métodos são apresentadas

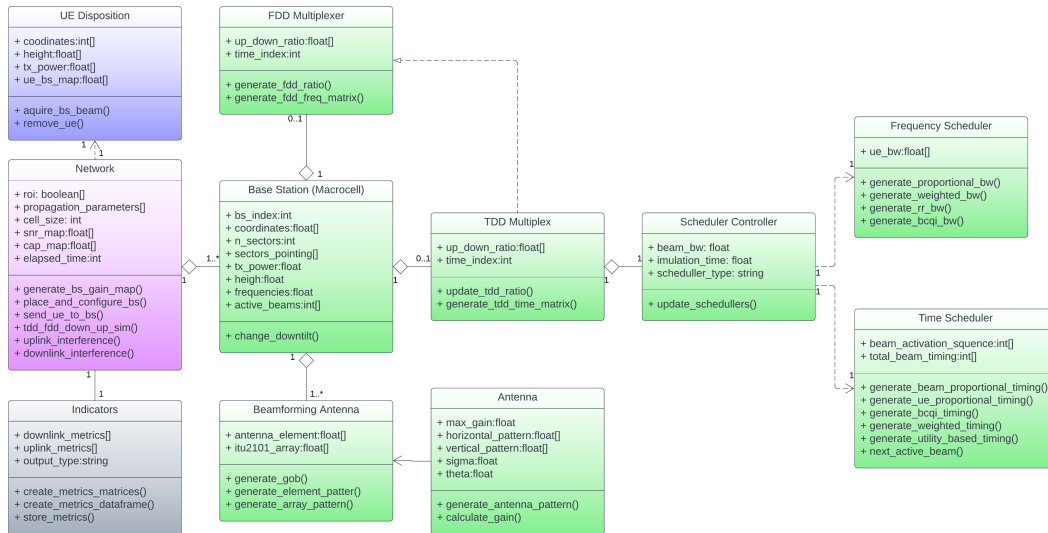


Figura 2.21: Diagrama de classes do simulador Sama. Em cada classe, as variáveis são apresentadas na parte superior e as suas funções, na parte inferior. A classe relacionada às UEs está colorida em azul, as relacionadas às BSs estão coloridas em verde e está colorida em rosa a classe relacionada à rede. A classe responsável pelos indicadores está colorida em cinza.

na Figura 2.21. Esta organização de classes do Sama foi feita para torná-lo escalável para redes maiores, com grande quantidade de UEs e BSs, sem maior impacto nos requisitos de memória e sistema. A simulação de redes grandes permite avaliar cenários mais realistas como também outros aspectos do projeto de redes celulares, como o posicionamento das BSs perante uma distribuição espacial de demanda.

A classe *Network* é responsável por instanciar os objetos das classes que representam os UE e as BS, executar os cálculos de interferência, chamar o módulo de indicadores, que os computa e armazena, dentre outras funcionalidades. A classe *UE_Disposition* representa um conjunto de UEs (com diferentes características) e a sua principal função é informar as suas condições (matriz de canal e demanda – capacidade alvo) para a RAN, como também verificar se o CSI de cada UE está acima do limiar de sensibilidade. A simplicidade dos UEs, se comparada com a BS, em conjunto com a habilidade de processar os seus parâmetros de maneira vetorial (61), de forma mais eficiente, é a principal razão do objeto representar o conjunto de UEs em vez de cada UE individualmente, economizando memória e tempo de execução sem impactar a avaliação do desempenho da RAN. A classe *BS* é responsável pela geração dos feixes, alocação de recursos, duplexação no tempo-frequência e organização das tabelas de ativação dos feixes e UEs.

Na Figura 2.22, vemos uma ilustração do processo de simulação de uma RAN no Sama, descrevendo a execução realizada pela instância da classe

Network que chama instâncias das classes *BS* e *UE_Disposition*. Mais detalhes sobre a organização destas classes são descritas, a seguir, na Seção 2.9.2. A execução do simulador pode ser dividida em três passos: definição da rede, simulação das interferências e armazenamento dos indicadores. O Algoritmo 1 descreve uma abstração de alto nível da sequência de processamento dos dois primeiros estágios (definição da rede e cálculo de interferências). Em seguida, descreve-se o processo em maiores detalhes.

Algoritmo 1: Algoritmo simplificado (durante um quadro) da simulação de interferência e da análise de capacidade.

Require: arquivo de parâmetros

```

1:  $[p_{\text{UEs}}, p_{\text{BS}}, p_{\text{RAN}}] \leftarrow \text{Leia}(\text{parâmetros})$ 
2:  $\{\text{UE}\} \leftarrow \text{Cria UE}(p_{\text{UEs}})$ 
3:  $\{(\text{BS}, \{\text{Setores}\})\} \leftarrow \text{Cria BS}(p_{\text{BS}})$ 
4:  $\{\text{Feixes}\} \leftarrow G_b(\theta, \phi)$  usando (2-9)
5: Rede  $\leftarrow \text{Cria Rede}(\{\text{UE}\}, \{(\text{BS}, \{\text{Setores}\})\}, \{\text{Feixes}\}, p_{\text{RAN}})$  {Posições
   das UEs estão em  $\{(x_u, y_u)\}$  e as posições das BSs estão em  $\{(x_n, y_n)\}$ }
6: for (BS, UE)  $\in$  RAN do
7:   Computa  $PL(\text{BS}, \text{UE})$  usando (2-16)
8:   for  $\text{feixe} \in \{\text{Feixes}\}$  do
9:     Computa  $\text{CSI}(\text{BS}, \text{feixe}, \text{UE})$  usando (2-15)
10:   end for
11: end for
12: Associa UE–(BS, feixe) usando (2-17)
13: while  $1 \leq t \leq T$  do
14:   for Setor  $\in$  RAN do
15:     Aplica Alg. alocação de recursos no setor
16:   end for
17:   for UE alocado durante o slot de tempo  $t$  do
18:     Computa  $\text{SINR}_{\text{DL}}$  com 2-27
19:     Computa  $\text{SINR}_{\text{UL}}$  com 2-29
20:     Computa indicadores individuais por UE (Seção 2.8.1)
21:   end for
22:   Computa indicadores agregados (Seção 2.8.2)
23:    $t++$ 
24: end while
25: Computa latência com (2-35)

```

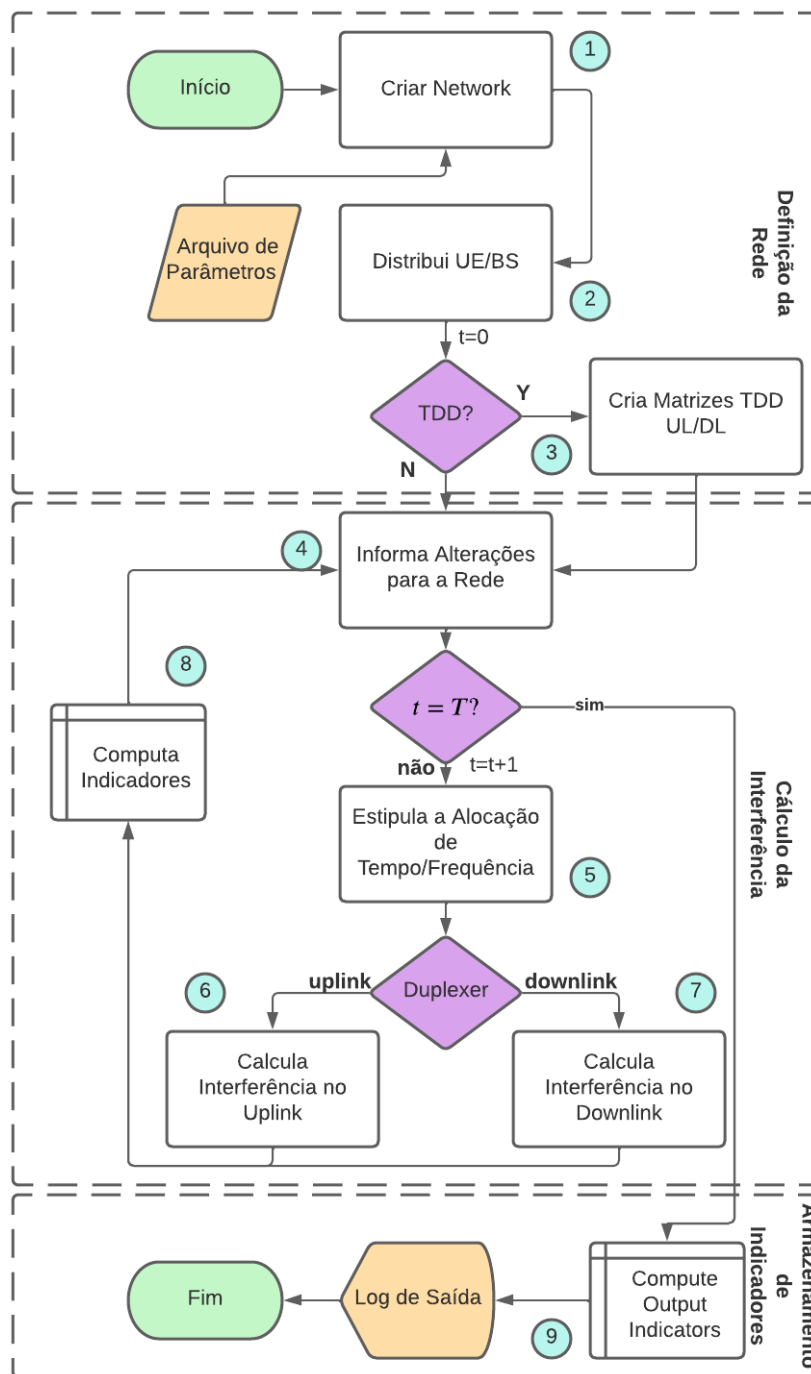


Figura 2.22: Fluxograma do processo de simulação. O simulador avalia a RAN calculando a interferência e obtendo os indicadores de desempenho. Esse divide-se em três estágios: a criação da rede, onde os parâmetros das UEs, BSs e RAN são usados para instanciar as representações digitais dos elementos; o cálculo de interferência, em que os algoritmos de alocação e duplexação são executados para os UEs e BSs e obtêm-se os resultados de interferência e os indicadores de desempenho por UE; e, por último, o armazenamento de indicadores, quando os indicadores agregados são obtidos e armazenados juntamente com outros dados produzidos pelo Sama.

2.9.1

Definição da RAN

A criação de uma rede consiste em instanciar uma entidade *Network* usando a configuração presente no arquivo de parâmetros para execução da simulação. Dentre esses parâmetros, encontramos parâmetros de configuração da RAN, das BSs e das UEs. Em seguida, instancia-se o objeto *UE_Arrangement* que gera as posições das UEs a partir da especificação presente no arquivo de parâmetros, como também as posições das BSs, ao instanciar os objetos do tipo *BS*.

Uma vez que todas as instâncias são criadas, o Sama executa alguns cálculos prévios à simulação da interferência. Cria-se uma matriz com as estimativas de CSI para todos os UEs dentro do ângulo de meia potência de cada feixe usando a Equação (2-15). Desenha-se a GOB conforme a definição da Seção 2.4.3.3. Uma UE é associada a um feixe usando a Equação (2-17) e preparam-se as matrizes de associação usadas na fase de alocação de recursos.

Caso seja usada TDD, um controlador de duplexação cria matrizes de ativação de descida e subida, conforme descrito na Seção 2.7, antes do simulador avançar para o cálculo de interferências.

2.9.2

Cálculo de Interferências

O cálculo de interferências começa quando os algoritmos de alocação definem as tabelas de ativação (conforme descrito na Seção 2.6.4), composta pelos processos 4 e 5 na Figura 2.22. Durante um *slot* de tempo t , a SINR é estimada usando as Equações (2-27) e (2-29) e a capacidade com a Equação (2-34). O processo é iterado até o *slot* de tempo T .

No caso de TDD, assume-se que os tempos de descida e de subida são controlados e sincronizados por todas as BSs dentro da ROI (os instantes em que todas as BSs da RAN transmitem e recebem dados são sincronizados). No caso de FDD, as portadoras usadas para uma UE transmitir (e para uma BS receber) diferem das usadas para a BS transmitir (e para a UE receber).

O cálculo de interferências difere entre os enlaces de subida e de descida (processos 6 e 7 na Figura 2.22, respectivamente). Na descida, a interferência advém de outras BSs e, na subida, ela advém de outros UEs ativos no mesmo *slot* de tempo. Em ambos os casos, o Sama considera a interferência intercelular. Para cada subportadora, usa-se a Equação (2-30) para o cálculo da capacidade.

O processo 4 na Figura 2.22 é responsável por informar as mudanças no relacionamento entre UEs e BSs, como UEs ativos no *slot* de tempo t ,

feixes ativos e alterações na demanda dos UEs para atualizar os algoritmos de alocação. Para isso, diversos indicadores (Seção 2.8) em função de t são obtidos e armazenados em memória no formato indicador \times índice da UE \times *slot* de tempo (no processo 8 na Figura 2.22). Quando t alcança a duração T , o simulador passa para a etapa de armazenamento dos indicadores em um arquivo.

2.9.3

Armazenamento de Indicadores

No processo 9 na Figura 2.22, os indicadores são organizados em matrizes com o formato indicador \times índice da UE. Os principais indicadores são a capacidade por UE, largura de banda de frequências por UE, deficit de capacidade por UE, tabela de ativação por UE, tabela da associação entre UEs e BSs e latência da UE. (conforme descrito na Seção 2.8). A associação entre UEs e BSs é preservada numa tabela de associação no formato $UE_u \times BS_B \times beam_b \times CSI$. No mesmo processo, os dados brutos são organizados e sumarizados por UE, BS ou feixe, uma vez que a totalidade dos dados brutos gera arquivos muito grandes. Os dados são salvos em disco.

3

Casos de Uso do Sama para Avaliação de RANs 5G

Para demonstrar a potencialidade do simulador desenvolvido, estabeleceu-se um conjunto de cenários e comparações. Serão apresentadas três simulações usando uma ROI retangular, comparando o atendimento nos cenários eMBB, URLLC e mMTC variando-se diversos parâmetros do simulador, além de simulações da RAN envolvendo um mapa de demanda obtido a partir de dados do IBGE (1, 2).

Foram executadas simulações em 5 cenários: A) comparativo de algoritmos de alocação em configuração *simplex* em cenário eMBB, B) comparativo de *duplex* usando TDD com $r_{\text{duplex}} = 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5, 0,6$ e $0,7$ em cenário eMBB, C) comparativo de algoritmos de alocação no mapa de demanda de São José de Ubá em cenário eMBB, D) comparativo de algoritmos de alocação em cenário URLLC e D) comparativo de algoritmos de alocação em cenário mMTC.

3.1

Comparativo de Algoritmos de Alocação – Cenário A

Para a comparação dos algoritmos de alocação de recursos RR, BCQI e PF, descritos na Seção 2.6, considera-se uma ROI de 1000×1000 pixels de $30 \times 30 \text{ m}^2$, onde 1000 UEs são colocados aleatoriamente assumido uma distribuição uniforme 2D. Alocou-se a posição das BSs usando o método de clusterização descrito na Seção 2.4.5.2 para $N=1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$, usando os parâmetros de configuração da Tabela 3.1.

A Figura 3.1 mostra a distribuição do CSI de todos os UEs para diferentes valores de N . Pode-se observar que o CSI entre UE-BS aumenta com N , isto é, a distribuição é deslocada para a direita conforme N aumenta. Isto acontece porque a distância entre as UEs e BSs diminui conforme se aumenta N , como pode ser observado na Figura 3.2. Assim, espera-se que a capacidade também cresça com N , devido à melhora no canal entre UE e BS com a diminuição da distância entre eles (levando a um menor PL médio e, consequentemente, uma maior capacidade), apesar de a interferência e a estratégia de alocação de recursos também afetarem a capacidade.

A Figura 3.2 mostra ainda o efeito do sombreamento na perda de propagação PL, já que alguns UEs não se associam com as BSs mais próximas. Isto é, um UE pode se associar a uma BS mais distante quando o efeito de

sombreamento \mathcal{X}_σ^{ABG} é mais pronunciado do que o PL médio entre o UE e a BS mais próxima.

Tabela 3.1: Parâmetros de Configuração.

Parâmetros da RAN	
Frequência central	3,5 GHz
Largura de banda	100 MHz (reutilizado em cada setor)
Número de BSs na RAN	Variável
Meta de Serviço da RAN	
C_{target} (Mbps)	[30, 10] [descida, subida]
Parâmetros da BS	
Altura da BS	30 m
Número de setores por BS	3
Apontamentos dos setores (ϕ, θ)	$\phi=(60^\circ, 180^\circ, 300^\circ), \theta=(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$
Modelagem e Parâmetros dos Setores	
Potência de transmissão por setor	100 W
Arranjo da antena setorial	8 x 8 (espaçamento de $0,5\lambda$)
Ganho do arranjo de antena setorial	Conforme a Seção 2.4.3.2
Ganho do elemento do arranjo	5 dBi
Número de feixes	20 por antena
Modelagem e Parâmetros dos UEs	
Altura do UE	1,5 m
Potência de transmissão do UE	400 mW
Diagrama da antena do UE	omnidirecional
Ganho da antena do UE	0 dBi
Parâmetros de Simulação	
Variância do modelo de <i>Path-Loss</i>	6 dB
Duração do <i>slot</i> de tempo	1 ms
Duração da iteração T	1000 <i>slots</i> de tempo
Critério de Parada	
Teste de Mann-Whitney U em	$C(u)$
Tamanho do lote	20 iterações
p -valor	0.05

Avaliou-se o desempenho da RAN para diferentes algoritmos de alocação de recursos discutidos na Seção 2.6, considerando o enlace de descida em um cenário eMBB ($C_{\text{target}}=30$ Mbps). A Figura 3.3 (a) compara as porcentagens de UEs que alcançam C_{target} e a Figura 3.3 (b) apresenta o comparativo do *throughput* acumulado da RAN. Observa-se que, apesar de o *throughput* ser bastante próximo entre todos os algoritmos de alocação, o algoritmo do BCQI

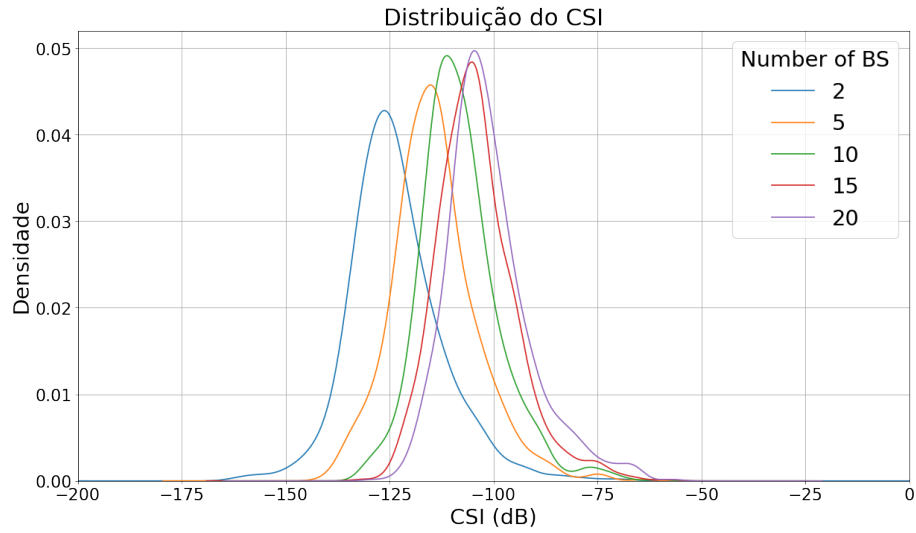


Figura 3.1: Distribuição do CSI entre UE e BS para diferentes quantidades de BS que compõem a RAN.

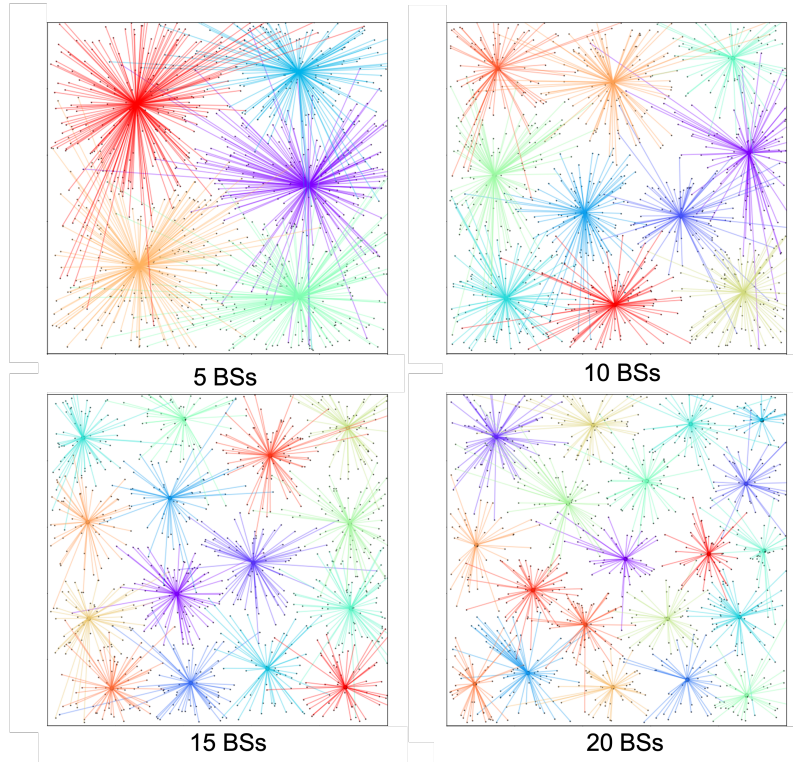


Figura 3.2: Mapa de associação UE-BS para $N=5, 10, 15, 20$ obtido em uma das simulações do comparativo de algoritmos de alocação de recursos.

tem, para valores pequenos de N , resultados superiores aos demais no que diz respeito ao percentual de UEs que alcançam C_{target} . O RR apresenta resultados inferiores até $N=16$, onde ultrapassa o PF, em $N=18$, ultrapassa o BCQI. O PF se coloca como um meio-termo entre ambos (o que é esperado).

Também se pode observar na Figura 3.3 que o RR apresenta os melhores resultados conforme N aumenta. Isso se dá pela sua estratégia de fila, que

aloca os recursos de RF (no caso, dentro dos feixes) conforme o tamanho da fila de UEs que aguardam o atendimento da BS (53). Esta estratégia evita o desperdício de recursos que pode acontecer com o BCQI e o PF, já que podem ocorrer feixes com poucos UEs associados que a princípio necessitariam uma largura de banda menor que a máxima do sistema, ou ainda pode ser o caso de, devido à dificuldade de se estimar precisamente o SINR (depende dos feixes e UEs ativos, ou seja, o simulador não é capaz de prever o SINR em um instante de tempo $t + \tau$ a partir do SINR medido no instante de tempo t), alocar erroneamente a largura de banda necessária para um UE.

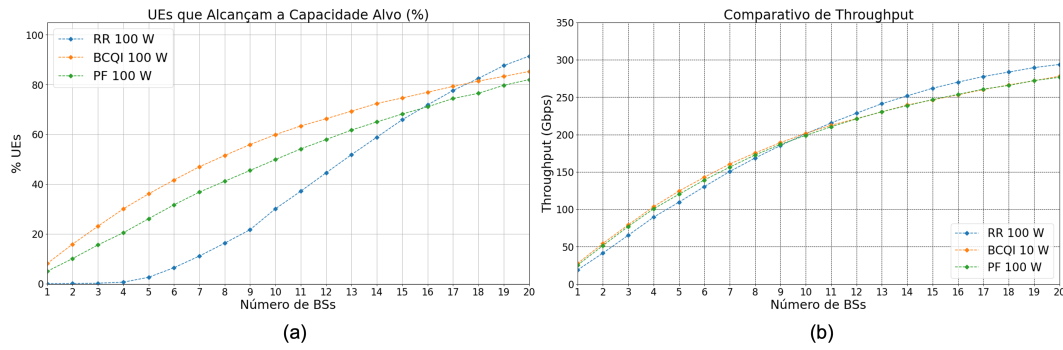


Figura 3.3: Comparativo de UEs que atingem $C_{\text{target}}=30$ Mbps (a) e do *Throughput* da RAN (b) para $N=1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ entre os algoritmos de alocação de recursos.

Complementarmente, a Figura 3.4 mostra a quantidade de UEs que alcançam C_{target} no período de 1s, que é consistente com os resultados mostrados da Figura 3.3; os algoritmos *Best CQI* e *Proportional Fair* atingem melhores resultados em menor tempo, mesmo em cenários com menos BSs.

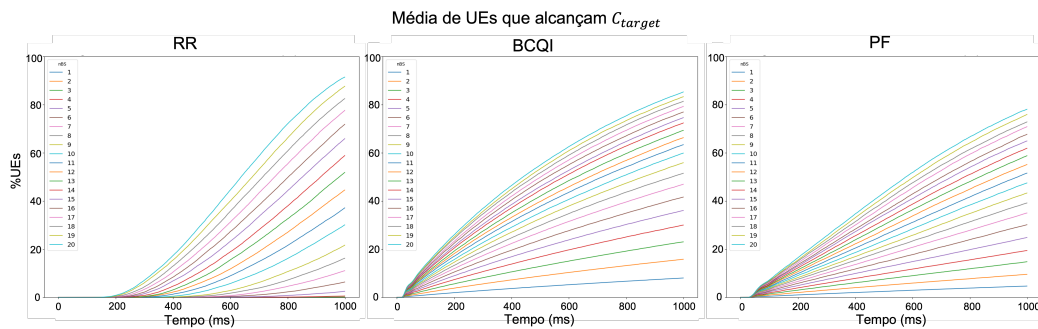


Figura 3.4: UEs que atingem $C_{\text{target}} = 30$ Mbps ao longo do período de simulação de 1s e $N=1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ no comparativo dos algoritmos de alocação de recursos.

A Figura 3.5 compara o *fairness index* e o SINR. Nesses gráficos, pode-se observar que o algoritmo RR apresenta o mais alto *fairness index*, com o BCQI apresentando valores inferiores e o PF provê um meio-termo, resultado

esperado. Isso se dá pelo algoritmo RR tratar igualmente todos os UEs na sua estratégia de fila, enquanto os algoritmos PF e o BCQI beneficiam os UEs com melhor CQI, resultando no tratamento desigual mostrado na figura. Também se observa que a diferença tende a diminuir conforme N aumenta e o *fairness index* também. Já quanto à SINR, o algoritmo BCQI obtém resultados superiores aos demais, que diminuem com o aumento de N . O desempenho superior pode ser atribuído à priorização os UEs com melhor CSI, evitando atender os UEs com menor CSI que, conseqüentemente, têm menores valores de SINR.

A Figura 3.6 corrobora a análise de desempenho dos algoritmos de alocação de recursos. Nela, se observa uma dispersão maior nas capacidades por UE para os algoritmos RR e PF, enquanto que para o BCQI os resultados se acumulam em torno de C_{target} ou em zero. Os resultados em torno de zero representam os UEs que não foram atendidos. Na mesma figura, também se observa que a capacidade excede C_{target} de maneira mais acentuada para menores distâncias, e no BCQI este efeito não é notado pela sua alocação de recursos que é feita a partir do SINR estimado do canal.

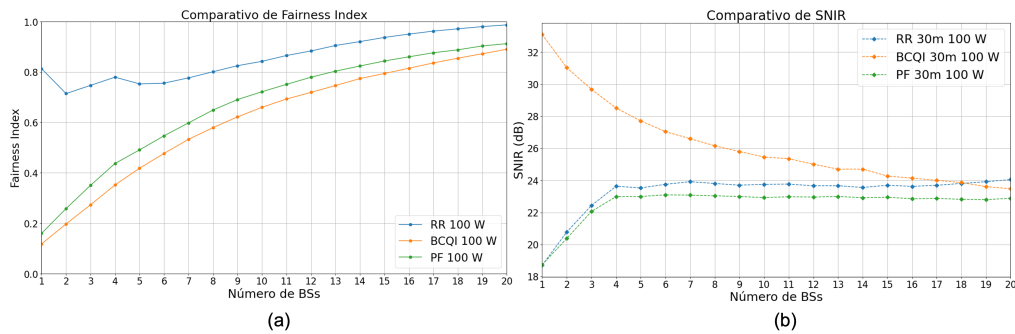


Figura 3.5: Comparativo de *fairness index* (a) e do SINR (b) para $N=1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ entre algoritmos de alocação de recursos.

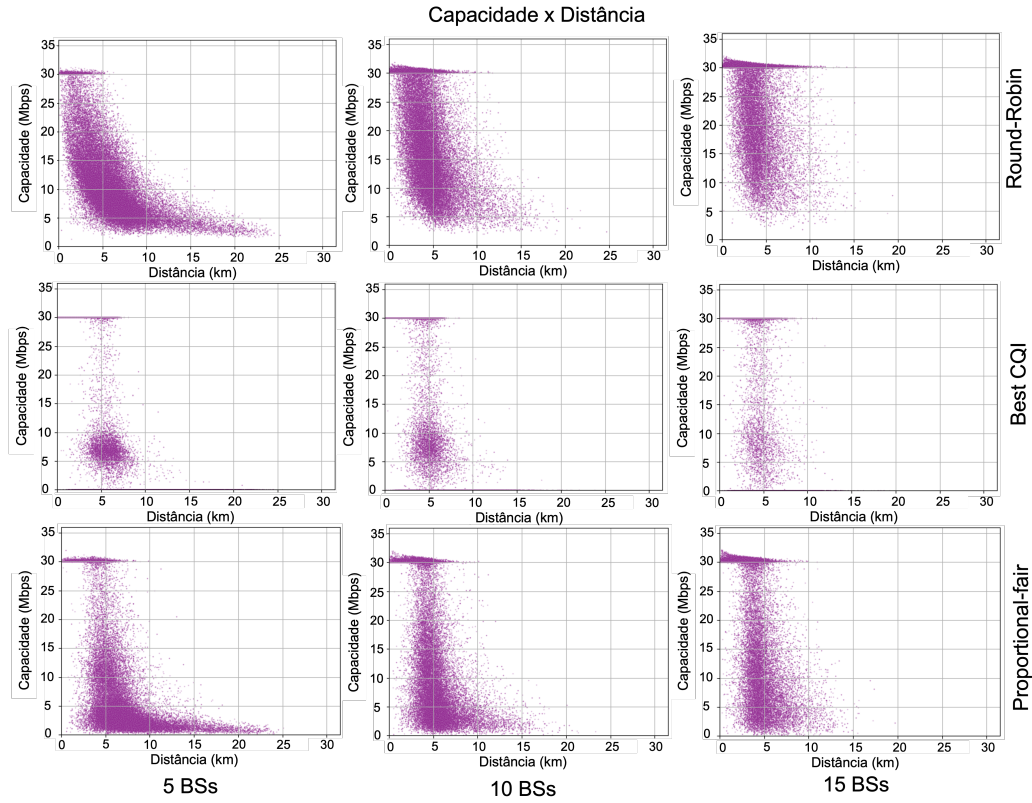


Figura 3.6: Dispersão da capacidade \times distância para os três algoritmos de alocação, *Round-Robin*, *Proportional Fair* e *Best CQI*, usando 5, 10 e 15 BSs.

Na Figura 3.7, são comparados o SINR médio e a quantidade de UEs que alcançam C_{target} , no mesmo cenário, os algoritmos de alocação para diferentes valores de potência máxima de transmissão. Observa-se que o algoritmo BCQI apresenta resultados superiores de SINR para $N < 15$, o que também se reflete nos resultados do comparativo de UEs que alcançam C_{target} . Já o RR obtém SINR próximo ao do algoritmo PF, mas resultados inferiores aos dos outros dois quando se compara o percentual de UEs que alcançam C_{target} para $N < 15$. Isso se deve a sua estratégia da distribuição igualitária de recursos entre todos os UEs, independentemente da qualidade do canal. O algoritmo PF combina as duas estratégias anteriores e obtém resultados intermediários. Em todos os casos, o aumento de potência acarreta ganhos no SINR, mas apenas um pequeno percentual adicional dos UEs alcançam C_{target} . Isto se dá, na maioria dos casos, pela diferença entre a grandeza do ganho de feixe e a perda de propagação em comparação à variação da potência de transmissão no cálculo do enlace. Para $N > 15$, observa-se que a estratégia de alocação não altera significativamente o SINR médio.

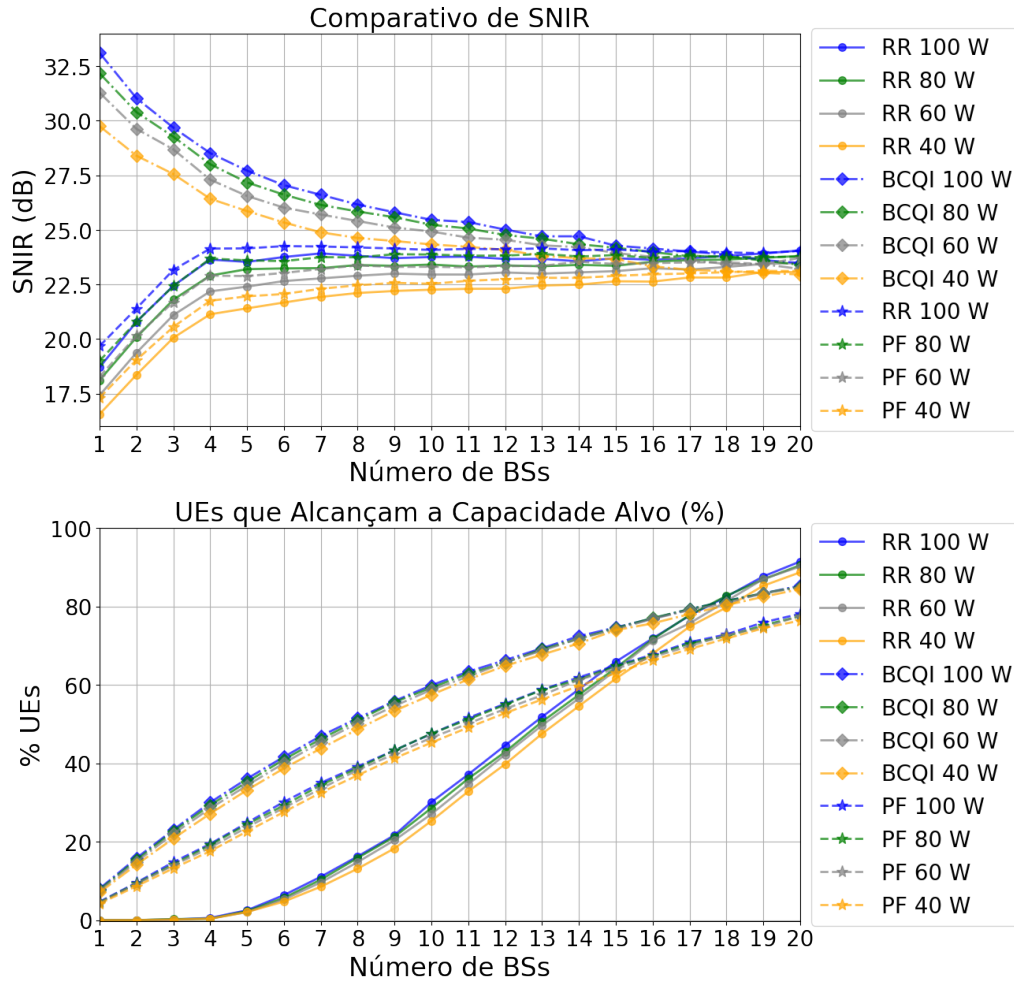


Figura 3.7: Comparativo de (a) SINR e (b) quantidade de UEs que alcançam $C_{\text{target}}=30$ Mbps entre os algoritmos de alocação de recursos.

Nas Figuras 3.8 e 3.9, que mostram a alocação de recursos de frequência e tempo nos UEs e feixes em formato de distribuição, respectivamente. Verifica-se que os histogramas do algoritmo BCQI mostram que uma fração maior dos UEs não ficam ativos e/ou não recebem recursos (os feixes com os quais se associaram não ficam ativos ou nunca recebem recursos para oferecer aos UEs associados), comparativamente aos algoritmos RR e PF que apresentam maior dispersão em torno do valor médio. Este, por sua vez, depende da razão UE/BS – quanto mais BSs, maior é o valor médio dos recursos tempo-frequenciais alocados para os UEs. Esses comportamentos se refletem na distribuição da capacidade por UE apresentada nos gráficos da Figura 3.10.

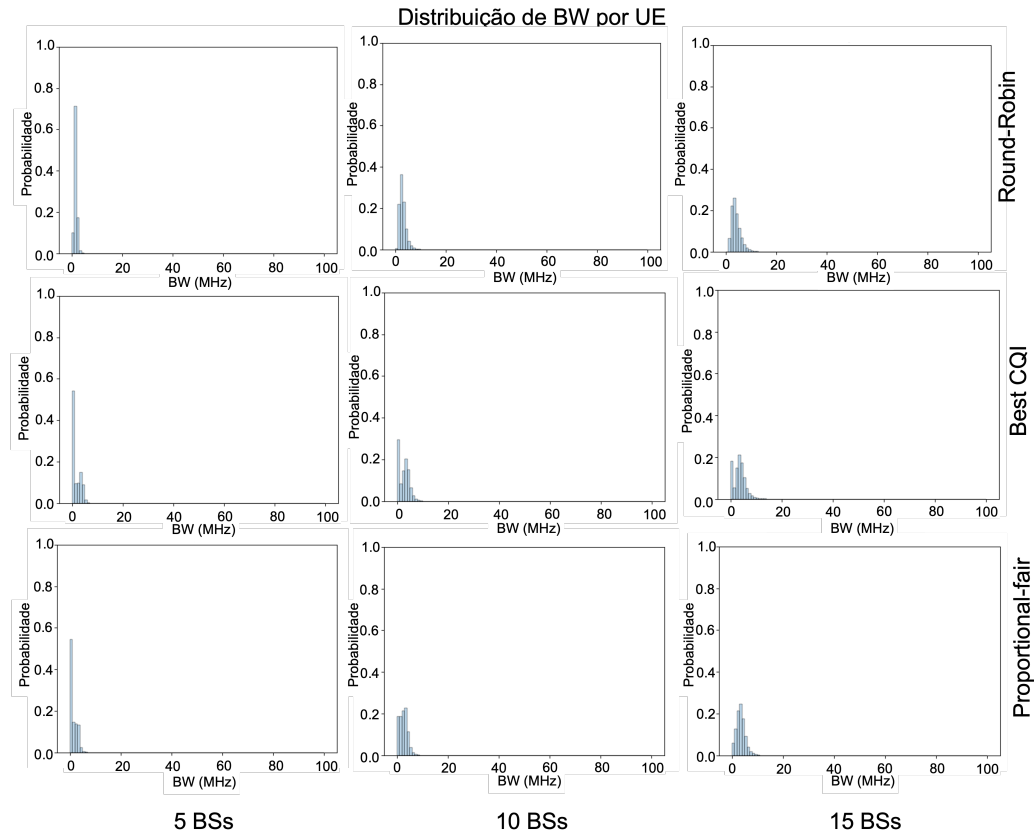


Figura 3.8: Gráficos de distribuição de banda de frequências alocada por UE \times distância para os três algoritmos de alocação, *Round-Robin*, *Proportional Fair* e *Best CQI*, com 5, 10 e 15 BSs, considerando $C_{\text{target}} = 30$ Mbps.

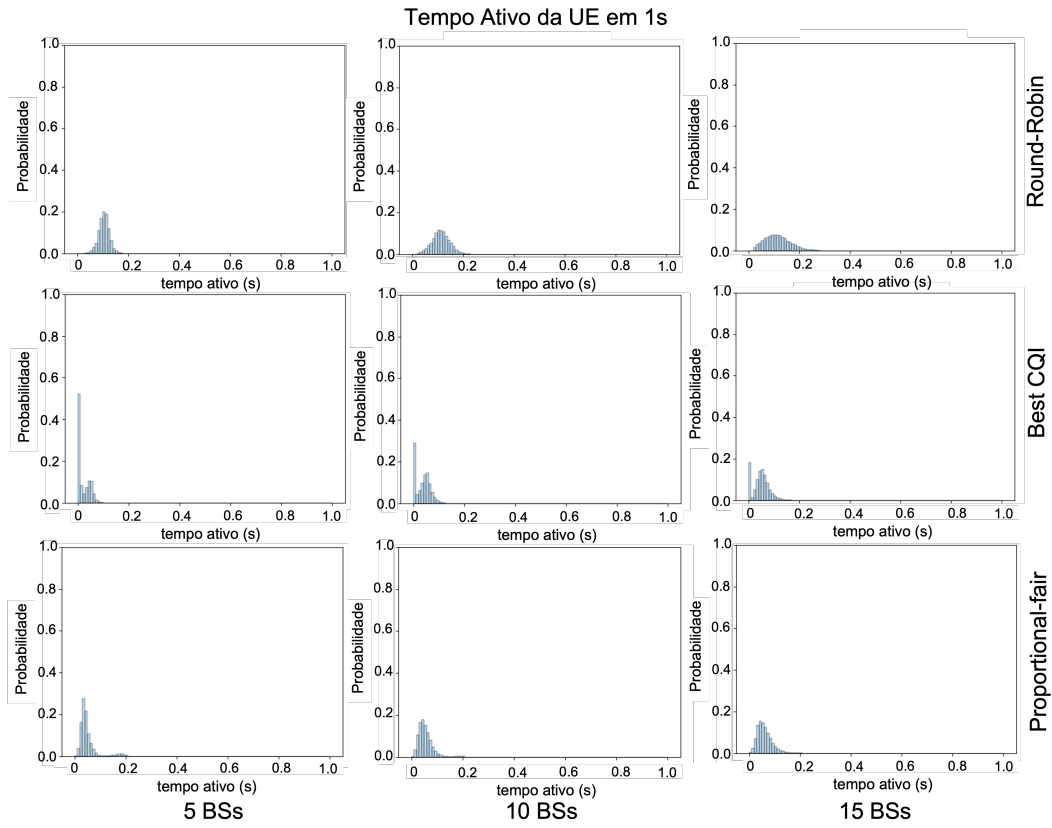


Figura 3.9: Gráficos de distribuição de tempo ativo na simulação por UE× distância para os três algoritmos de alocação, *Round-Robin*, *Proportional Fair* e *Best CQI*, com 5, 10 e 15 BSs, considerando $C_{\text{target}} = 30$ Mbps.

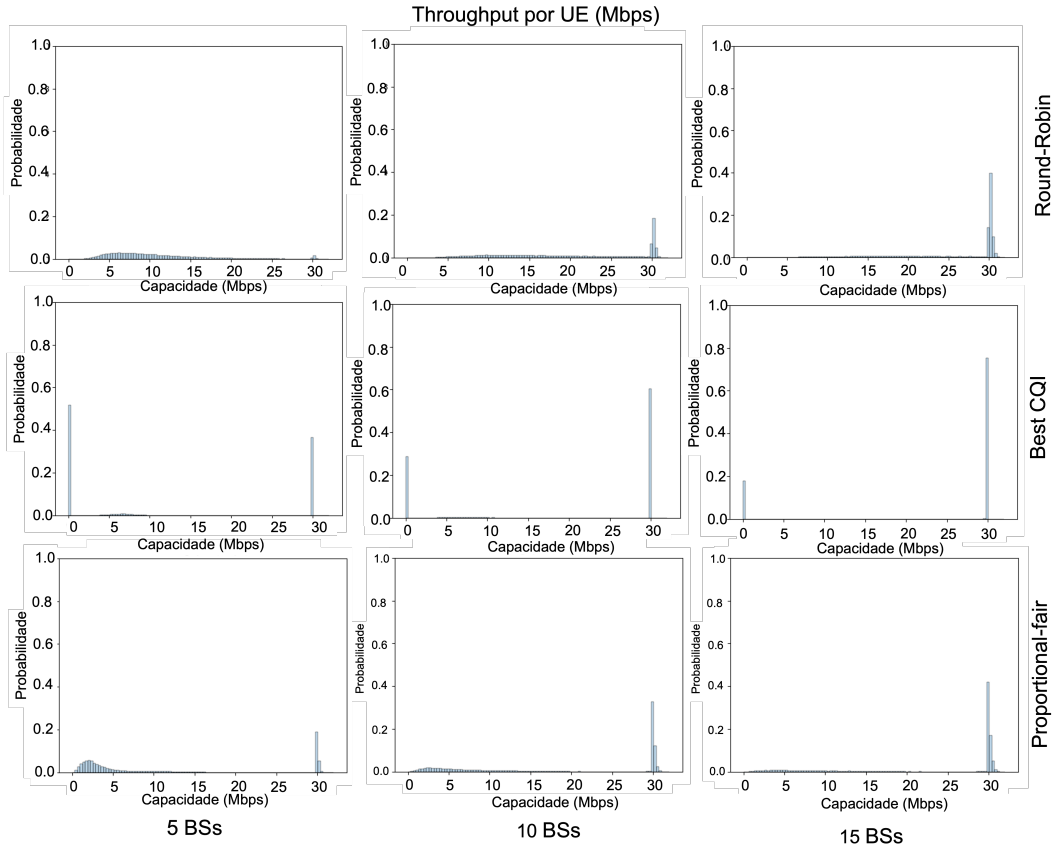


Figura 3.10: Gráficos de distribuição da capacidade (Mbps) alocada por UE× distância para os três algoritmos de alocação, *Round-Robin*, *Proportional Fair* e *Best CQI*, com 5, 10 e 15 BSs, considerando $C_{\text{target}} = 30$ Mbps.

3.2

Efeitos da Duplexação por Divisão do Tempo – Cenário B

Considerando a mesma ROI da Seção 3.1, foi analisado o desempenho da RAN com o uso de TDD com o fator de compartilhamento $r_{\text{duplex}} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$. Se, por exemplo, $r_{\text{duplex}} = 0.3$, os enlaces de descida tem 70% do tempo total e os de subida os 30% restantes. Os resultados apresentados na Figura 3.11 mostram que, conforme o fator de compartilhamento de tempo diminui, menos UEs alcançam C_{target} na subida e mais UEs alcançam C_{target} na descida. Quando $r_{\text{duplex}} = 0.5$, porcentagens semelhantes de UEs alcançam C_{target} na descida e na subida.

Os resultados apresentados na Figura 3.12 corroboram os anteriores, dado que, quando r_{duplex} diminui, o *throughput* total da RAN (no gráfico inferior Figura 3.12) também o faz. Como, também reduz o número de UEs que alcançam C_{target} (no gráfico inferior da Figura 3.11) e acentua-se o efeito do SINR na subida, no gráfico superior Figura 3.12, devido à grande quantidade de UEs transmitindo simultaneamente com antenas omnidirecionais e baixa

potência de transmissão.

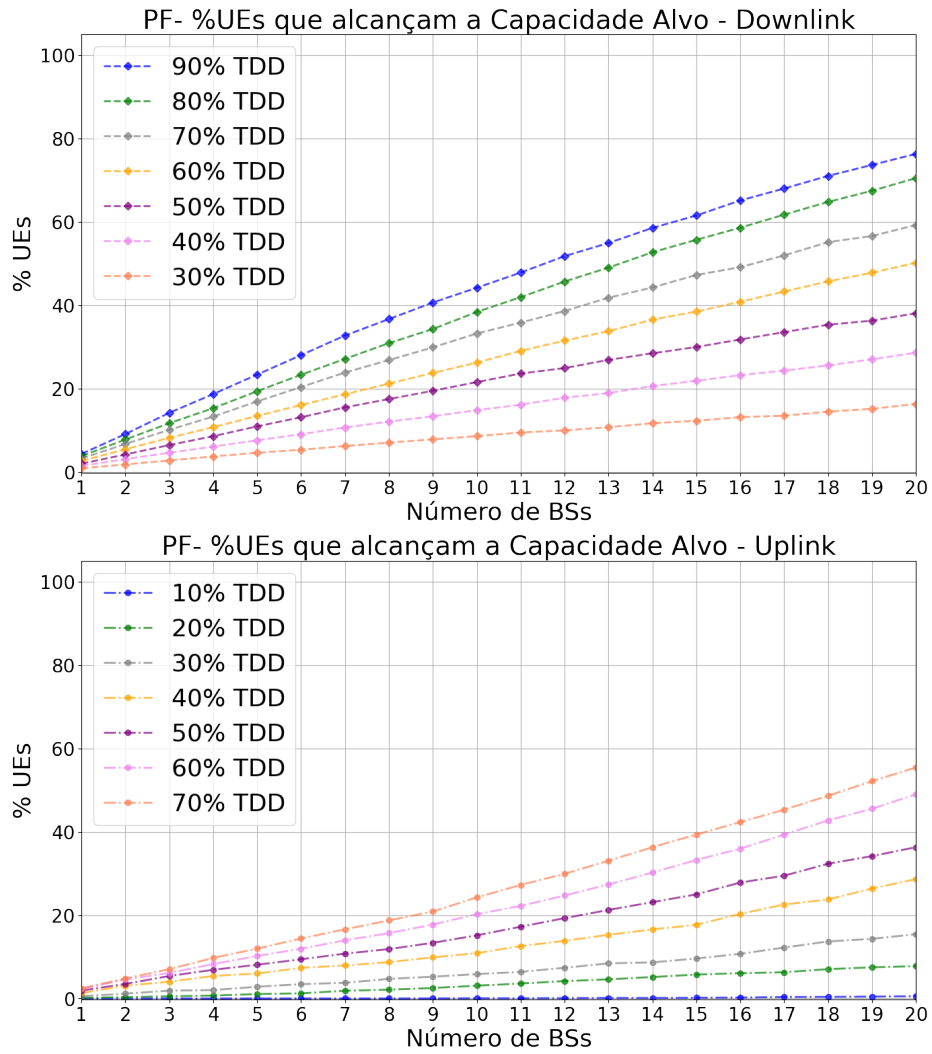


Figura 3.11: Comparativo de UEs que atingem $C_{\text{target}}=[30, 10]$ Mbps para $N=1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ e $r_{\text{duplex}} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ em TDD para descida e subida para diversas razões de TDD r_{duplex} .

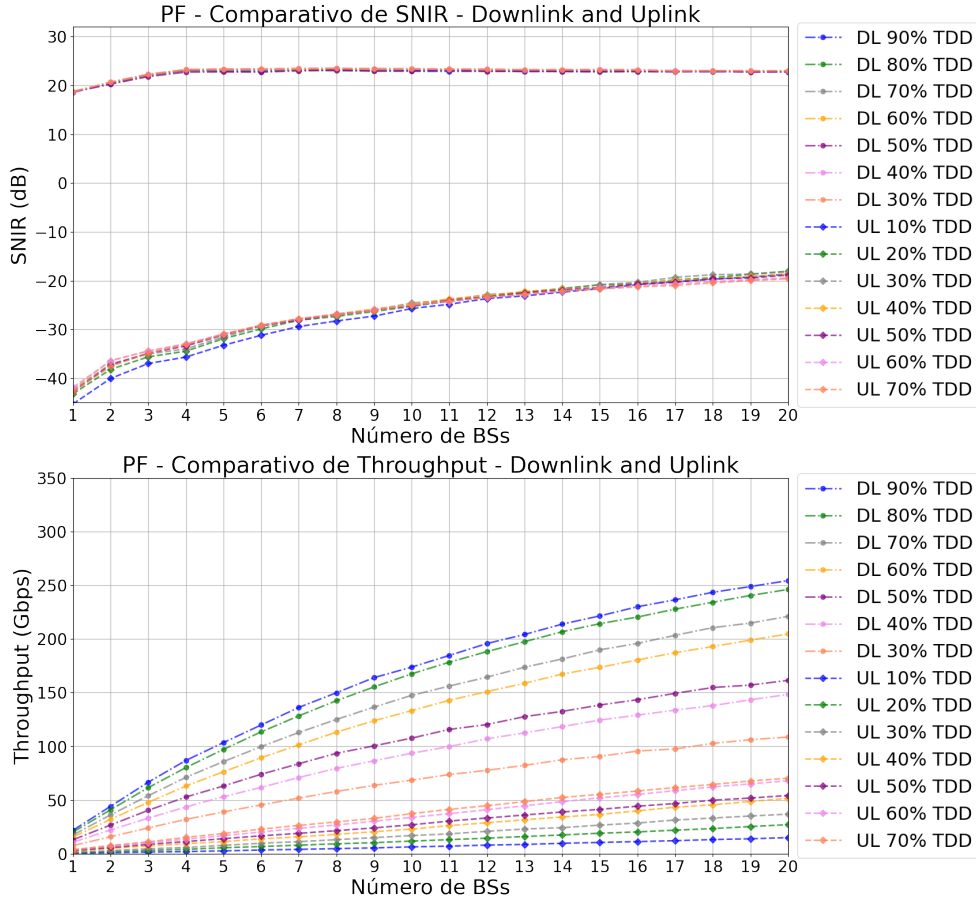


Figura 3.12: Comparativo SINR (acima) e throughput para $N=1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ e $r_{\text{duplex}} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ em TDD para *downlink* e *uplink* para diversas razões de TDD r_{duplex} .

3.3

Projeto de RAN para Atender um Município – Cenário C

Para avaliar o desempenho de uma RAN em um cenário mais realista onde a distribuição de UEs (e, conseqüentemente, a distribuição de demanda) apresenta-se de acordo com dados extraídos de pesquisas de amostragem (1, 2), faz-se um cenário eMBB em que BSs são alocadas no município de São José de Ubá. Desta forma, pode-se avaliar como o algoritmo de alocação de recursos, conjuntamente com a alocação de BSs usando clusterização, se comporta em um cenário no qual a distribuição de é não-uniforme.

Configurou-se o algoritmo de alocação PF, comumente usado comercialmente (54). A partir dos resultados do cenário B (Seção 3.2), escolhe-se a razão de duplexação $r_{\text{duplex}} = 0.4$ (40% do tempo para subida e 60% do tempo para descida), pois se obteve um bom atendimento da demanda dos UEs nessa configuração para $C_{\text{target}}=[30,10]$ Mbps (30 Mbps na descida e 10 Mbps na subida). Escolheu-se para a simulação a região de São José de Ubá, região

majoritariamente rural localizada no estado do Rio de Janeiro, propícia para se adotar o cenário eMBB. Os dados de densidade de UEs foram extraídos a partir de (1, 2) e gerou-se um mapa de resolução de aproximadamente $30 \times 30 \text{ m}^2$. Nele, amostraram-se 750 posições de UEs (aproximadamente 1/10 da população do município, considerando a hipotética fração da população assinante de algum dos provedores de acesso em cenário eMBB e usando a frequência central da simulação de 3,5 GHz), e simulou-se $N=1, 2, 3, 4, \dots, 23, 24, 25$, com o restante da configuração igual à mostrada na Tabela 3.1.

A Figura 3.14 ilustra a associação entre UEs e BSs segundo a formulação apresentada na Seção 2.4.5. Assim, como observado na Figura 3.2, nem sempre um UE estará associado à BS mais próxima. Na Figura 3.13 são apresentadas as curvas de atendimento de demanda, demonstrando que se pode, usando o Sama, definir um critério de projeto de, por exemplo, 70% de UEs satisfeitas com C_{target} e que esta demanda será atendida com $N \geq 23$.

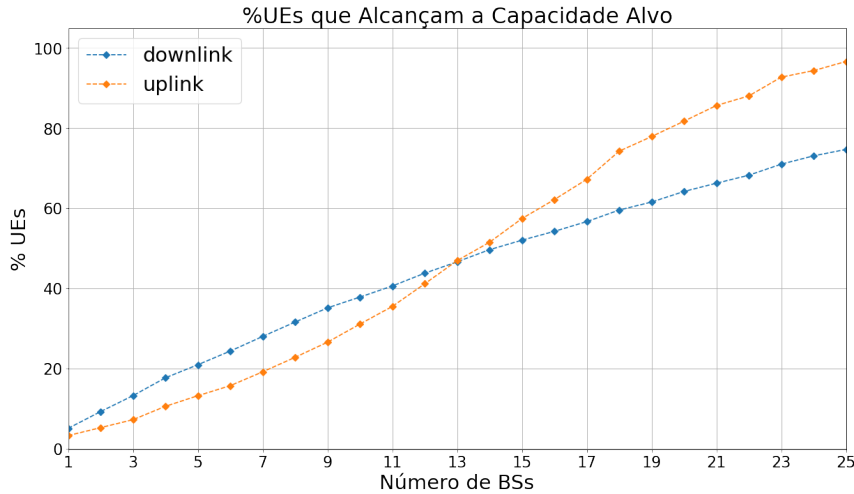


Figura 3.13: Comparativo de UEs que atingem $C_{\text{target}}=[30, 10]$ Mbps para $N = 1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ e $r_{\text{duplex}} = 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7$ em TDD para os enlaces de descida e subida, no município de São José de Ubá, localizado no Estado do Rio de Janeiro.

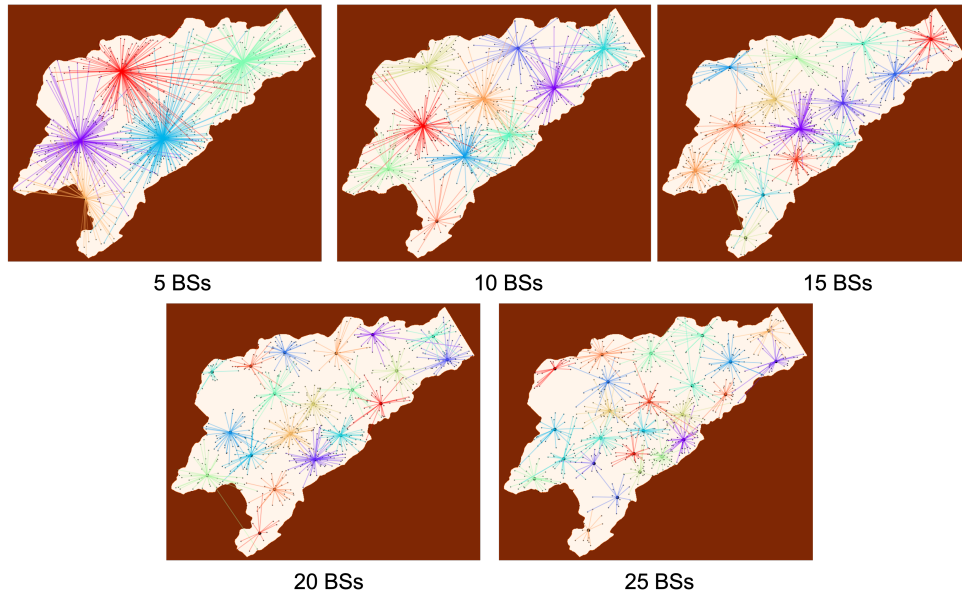


Figura 3.14: Mapa de Associação UE-BS para $N=5, 10, 15, 20, 25$ obtido em uma das simulações do cenário C, no município de São José de Ubá, localizado no Estado do Rio de Janeiro.

3.4

Desempenho de Serviço URLLC – Cenário D

Pensando na análise e projeto de RANs para serviços URLLC, em que se visa garantir conexão de baixa latência para aplicações de comunicação críticas, avaliamos a habilidade do Sama em comparar a latência usando os diferentes algoritmos de alocação de recursos. Usa-se a configuração da Tabela 3.1, porém, para caracterizar a garantia de comunicação e a baixa latência, não se estabelece um C_{target} . Ou seja, todos os UEs estão aptos a se conectarem à RAN durante todo t em T .

A Figura 3.15 apresenta uma visão consolidada dos resultados, que indicam uma grande diferença entre o algoritmo BCQI e os demais, dado que o BCQI atende os UEs com a melhor condição de canal, ele deixa os UEs restantes sem atendimento. Isto se reflete nas curvas sobrepostas das latências máxima e média do BCQI na Figura 3.15. Os algoritmos RR e PF apresentam baixos valores de latência, sendo, os do RR, os menores.

A Figura 3.16 mostra as distribuições de latência para os algoritmos RR e PF. Neste gráfico não foram incluídos os resultados do BCQI, que, como visto anteriormente, ele apresenta resultados muito inferiores aos demais. Vê-se que a distribuição de latência para o RR está mais concentrada em torno valores menores, em concordância com os gráficos da Figura 3.15. Além disso, pode-se observar que a variabilidade da latência diminui quando o número de BSs aumenta. Entretanto, uma avaliação confiável do serviço URLLC deve

considerar UEs em movimento em diferentes velocidades, o que é discutido no Capítulo 6. Esta análise pode ser incluída no Sama ao classificar os UEs em faixas de velocidade de movimento e ajustar o modelo de propagação usando tal classificação.

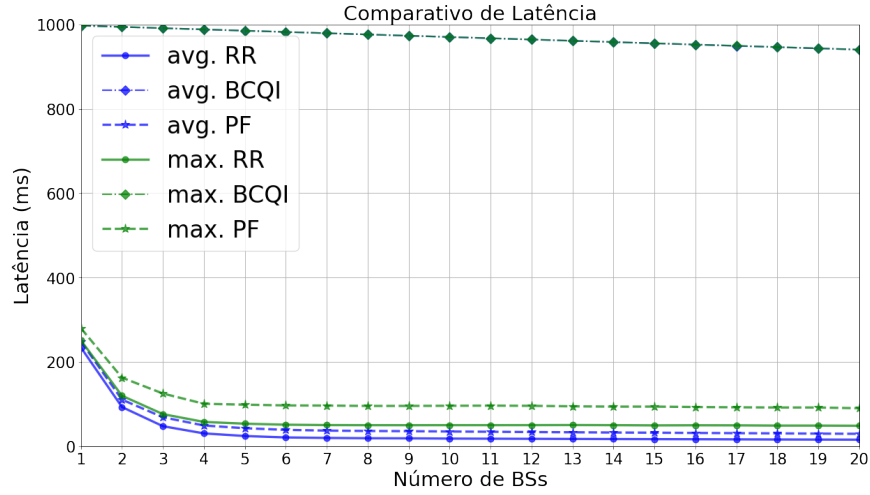


Figura 3.15: Comparativo de latência entre algoritmos de alocação para $N=1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ no URLLC. As curvas do algoritmo BCQI estão sobrepostas.

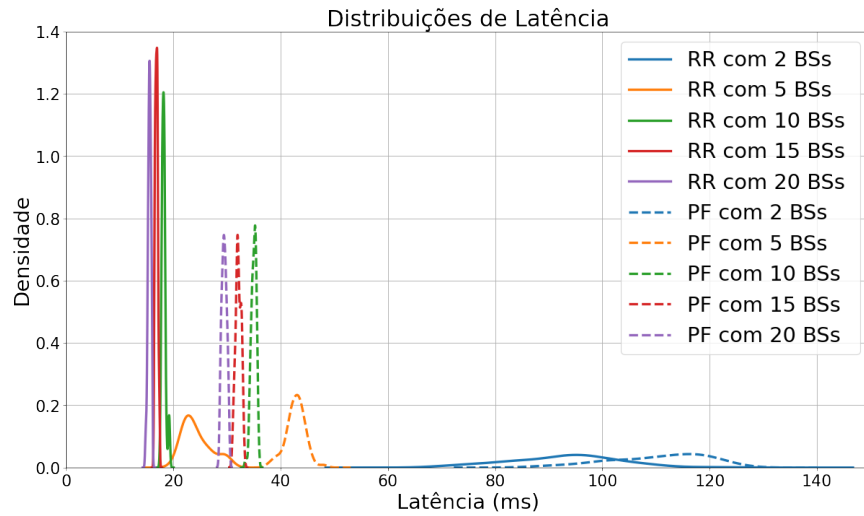


Figura 3.16: Comparativo da distribuição de latência entre os algoritmos de alocação PF e RR conforme se varia o número de BSs N no cenário URLLC.

As Figuras 3.17 e 3.18 mostram o *throughput* da RAN e o *fairness index*, respectivamente, para os diferentes algoritmos de alocação de recursos. Os resultados e as análises concordam com os já discutidos em outros cenários, por exemplo, nas Figuras 3.3 e 3.5, e as explicações são similares as anteriormente oferecidas.

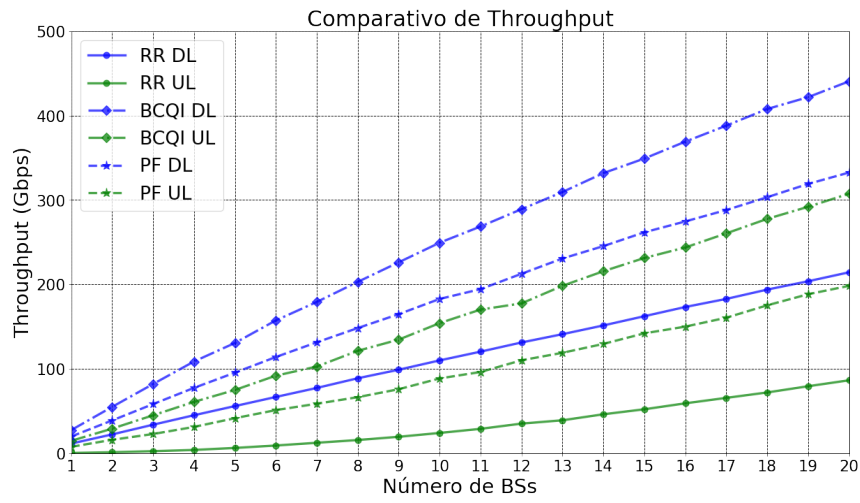


Figura 3.17: Comparativo de *throughput* para $N = 1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ no cenário URLLC.

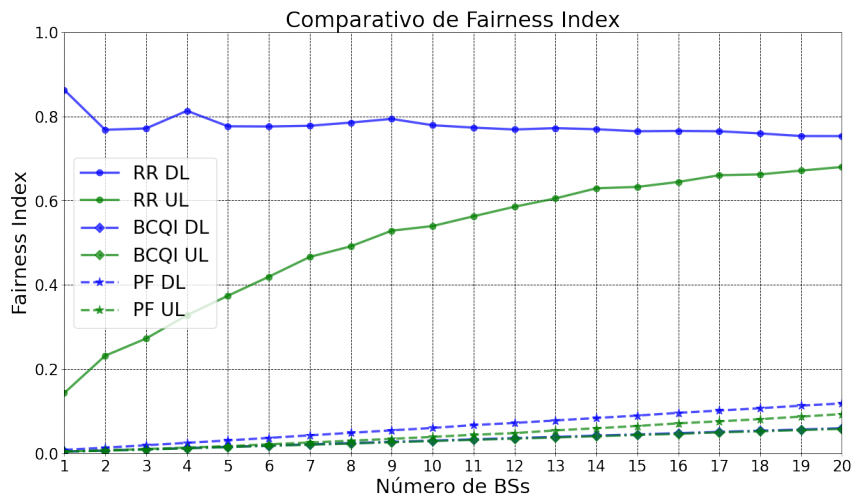


Figura 3.18: Comparativo de *fairness index* para $N = 1, 2, 3, 4, \dots, 18, 19, 20$ no cenário URLLC.

3.5

Desempenho do Serviço mMTC – Cenário E

Uma rede mMTC deve atender a uma grande quantidade de UEs com baixas taxas de dados e atividade. Neste caso, mesmo com uma latência considerável e baixa capacidade demandada, a conectividade é o indicador de desempenho mais importante.

O Sama foi usado para avaliar este indicador de desempenho da RAN aumentando progressivamente a quantidade de UEs ($U = 500, 1000, 1500, \dots, 9500, 10000$) para uma quantidade fixa de BSs ($N = 10$). A Tabela 3.2 apresenta a configuração usada neste cenário de simulação. Arbitrou-se $C_{\text{target}} = 10$ kbps, uma baixa potência de transmissão nas BSs, de 10 W, e uma potência de transmissão dos UEs de 200 mW. Pode-se observar a grande quantidade de UEs através do mapa de associação entre UEs e BSs da Figura 3.19.

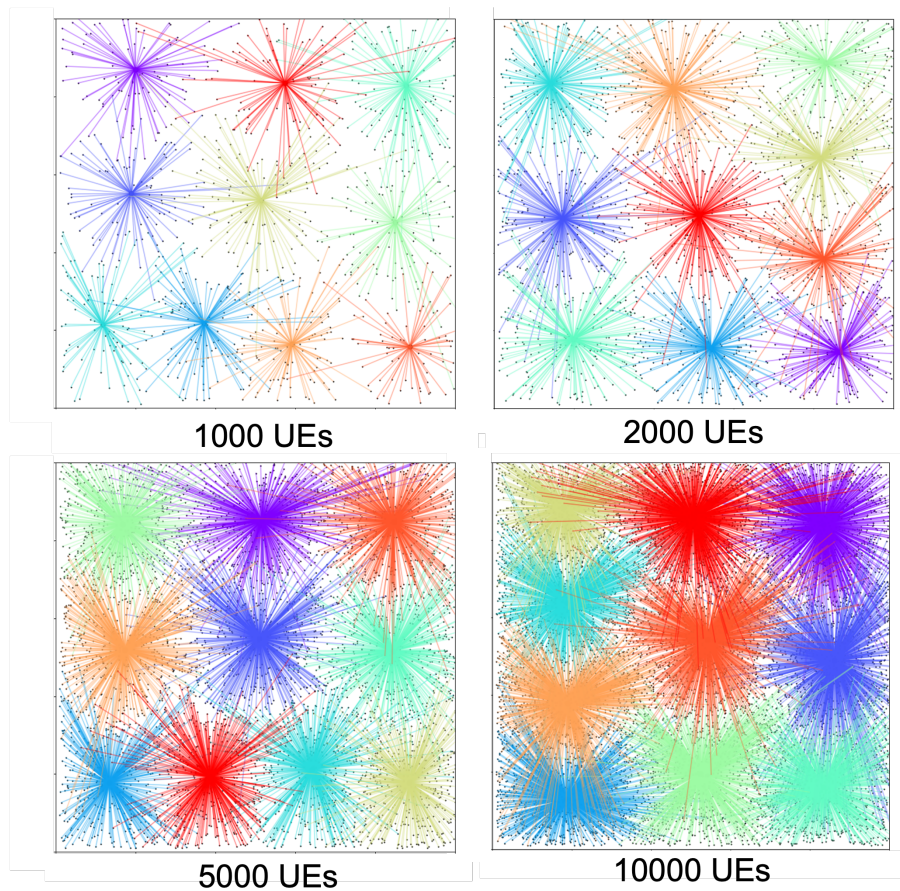


Figura 3.19: Mapa de associação UE-BS para $U=1000, 2000, 5000, 10000$ obtido em uma das simulações do cenário E (mMTC).

Tabela 3.2: Parâmetros de Configuração do Cenário mMTC.

Parâmetros da RAN	
Frequência central	3,5 GHz
Largura de banda	100 MHz (reutilizado em cada setor)
Número de BSs na RAN	10
Número de UEs na RAN	variável
Meta de Serviço da RAN	
C_{target} (kbps)	[100, 100] [descida, subida]
Parâmetros da BS	
Altura da BS	30 m
Número de setores por BS	3
Apontamentos dos setores (ϕ, θ)	$\phi=(60^\circ, 180^\circ, 300^\circ)$, $\theta=(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$
Modelagem e Parâmetros dos Setores	
Potência de transmissão por setor	10 W
Arranjo da antena setorial	8 x 8 (espaçamento de $0,5\lambda$)
Ganho do arranjo de antena setorial	Conforme a Seção 2.4.3.2
Ganho do elemento do arranjo	5 dBi
Número de feixes	20 por antena
Modelagem e Parâmetros dos UEs	
Altura do UE	1,5 m
Potência de transmissão do UE	200 mW
Diagrama da antena do UE	omnidirecional
Ganho da antena do UE	0 dBi
Parâmetros de Simulação	
Variância do modelo de <i>Path-Loss</i>	6 dB
Duração do <i>slot</i> de tempo	1 ms
Duração da iteração T	1000 <i>slots</i> de tempo
Critério de Parada	
Teste de Mann-Whitney U em	$C(u)$
Tamanho do lote	20 iterações
p -valor	0.05

A Figura 3.20 compara a habilidade da RAN em prover os UEs com a capacidade mínima. Os três algoritmos BCQI, PF e RR conseguem alocar os recursos atingindo a capacidade alvo para aproximadamente 100% dos UEs no enlace de descida. Entretanto, no enlace de subida a capacidade alcançada é consideravelmente afetada, um comportamento similar ao observado na Figura 3.7. A Figura 3.20 também mostra que, inicialmente, o algoritmo de alocação RR fornece a capacidade mínima para uma maior quantidade de UEs e é superior aos demais. Mas, conforme a quantidade de usuários aumenta, o RR também falha em atender a todos os UEs.

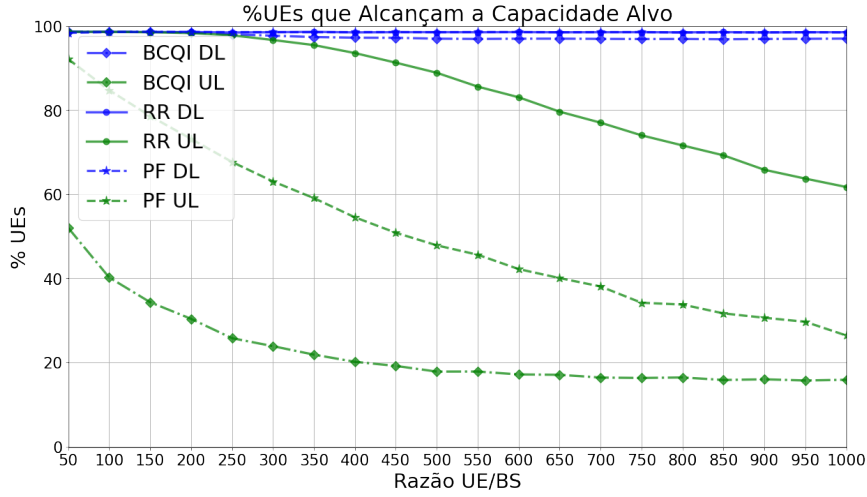


Figura 3.20: Comparativo de UEs que atingem $C_{\text{target}}=[100, 100]$ kbps para $U=500, 1000, 1500, \dots, 9500, 10000$, em *downlink* e *uplink*, no cenário E.

A Figura 3.21 mostra o *throughput* total da RAN no cenário mMTC. Todas as curvas mostram um comportamento semelhante. Mesmo com a diminuição do número de UEs que alcançam C_{target} , o *throughput* da RAN aumenta quase que linearmente com o número de UEs U , já que o número de UEs próximos às BSs, e portanto com melhores condições de canal, tende a aumentar proporcionalmente a U , aumentando a capacidade total alcançada. Já na subida, a melhora é sublinear, com os ganhos diminuindo em função de U , o que é explicado pelo aumento da interferência.

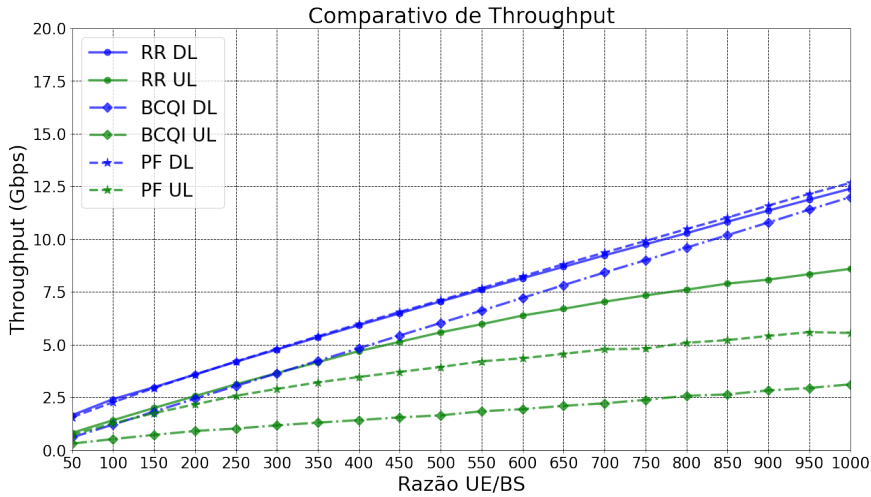


Figura 3.21: Comparativo de *throughput* para $U=500, 1000, 1500, \dots, 9500, 10000$, em *downlink* e *uplink*, no cenário E (mMTC).

A Figura 3.22 compara os *fairness index* dos algoritmos de alocação de recursos. Ela apresenta resultados diferentes para subida e descida. Na descida, onde a totalidade dos UEs consegue alcançar C_{target} , o aumento do número de UEs faz com que a equidade na distribuição dos recursos seja sempre alta

(próxima a 1). Na descida, as curvas apresentam comportamento similar ao da Figura 3.5, o algoritmo RR apresenta os melhores resultados, o BCQI, os piores e o PF apresenta-se como um meio-termo entre as duas estratégias.

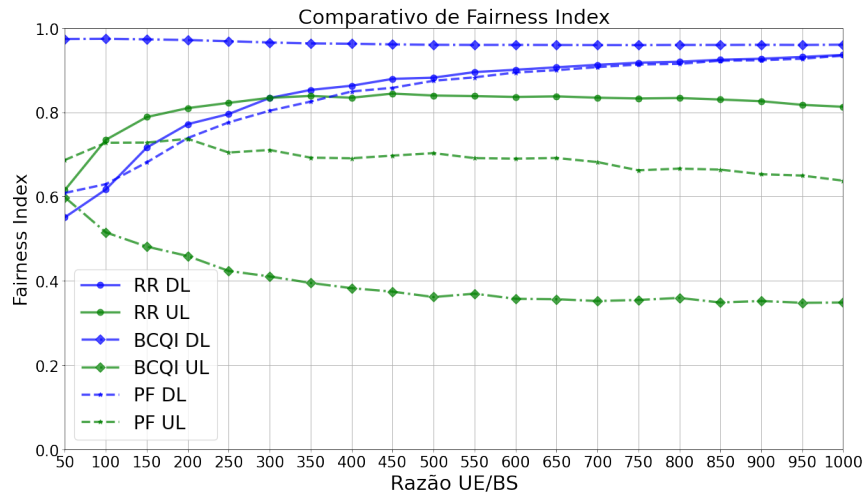


Figura 3.22: Comparativo de *fairness index* para $U=500, 1000, 1500, \dots, 9500, 10000$, em *downlink* e *uplink*, no cenário E (mMTC).

4

Arranjos e Posicionamento de Estações para Redes de Acesso por Rádio

Para implantar uma rede de acesso por rádio grande e complexa e garantir que a quantidade certa de recursos seja utilizada, projeto manual, provavelmente, é inadequado. Técnicas de otimização podem auxiliar de várias maneiras a resolver os problemas pertinentes ao projeto de redes de acesso por rádio (62). Consequentemente, o desenvolvimento de métodos, ferramentas e algoritmos pode beneficiar a engenharia de redes de acesso por rádio.

Neste capítulo, são apresentadas metodologias de projeto para dois tipos de redes distintas. Primeiramente, um algoritmo heurístico é proposto para o projeto de SFNs (o arranjo estações base) para radiodifusão. Posteriormente, considera-se o problema de posicionamento de estações base para redes celulares. Observa-se que o segundo método é aplicado no restante deste trabalho.

4.1

Formulação Geral

Dada a ROI (*Region of Interest* – Região de Interesse), o problema é dispor um arranjo de estações base maximizando e/ou minimizando critérios de projeto da rede de rádio. Nos diferentes casos, mudam-se os critérios de desempenho do arranjo, as características das estações e o espectro. Adota-se como balizador

$$Q(x, y) \rightarrow \text{adequação ao critério } \Omega \text{ ao se posicionar uma BS em } (x, y). \quad (4-1)$$

Partindo de mapas 2D vazios $Q(x, y)=0$ em (x, y) , no k -ésimo lote, avalia-se o atendimento ao critério de projeto do arranjo de estações base $\mathbf{p}_k = \{p_{n,k}\} = \{(x_{n,k}, y_{n,k})\}$, $n = 1 \dots N$, onde N é a quantidade de BSs da RAN. O atendimento é verificado, e seu desempenho é avaliado por

$$Q(x, y) = \begin{cases} f(M(x, y)), & M(x, y) \text{ atende } \Omega \\ 0, & \text{c.c.} \end{cases}, \quad (4-2)$$

com $M(x, y)$ sendo a métrica de desempenho usada para avaliar o critério de projeto para o arranjo \mathbf{p}_k e $f(\cdot)$ uma função avaliadora usada para comparar o desempenho obtido nos k lotes. Para descrever completamente $Q(x, y)$ são necessárias inúmeras iterações. Por isso, adotam-se as metodologias descritas

nesse capítulo para diminuir o número de iterações necessárias para se obter bons resultados no processo iterativo.

4.2

Arranjo de BSs para SFNs

Redes de radiodifusão, em especial as SFNs (*Single Frequency Networks*), que empregam múltiplos transmissores (estações base) operando no mesmo canal para a entrega de um mesmo fluxo de bits, representam um desafio de projeto. O desafio consiste em conjugar a maximização da cobertura na ROI enquanto minimiza-se a interferência inter-simbólica decorrente dos múltiplos sinais incidentes advindos de diferentes transmissores num mesmo ponto da ROI. Para isso, propomos um algoritmo para a otimização de arranjos de estações para SFNs. O algoritmo emprega heurísticas. Para testar o desempenho da proposta foi desenvolvido um simulador especificamente para estudar o problema, o simulador HeuCov (21).

4.2.1

Definição do Problema

Seja \mathcal{R} uma região geográfica de área $A_{\mathcal{R}}$ m^2 dividida em $X \times Y$ células de área $A_{\mathcal{R}}/(XY)$ m^2 . Cada célula ou pixel é indexado por (x, y) , $x = 0 \dots X - 1$ e $y = 0 \dots Y - 1$, com dados de elevação, isto é, a superfície de relevo, dados por $h(x, y)$ m . Define-se a ROI como o grupo de células ou pixels em \mathcal{R} no qual a cobertura da SFN é necessária, isto é, deve ocorrer.

O projeto de um arranjo de estações para a SFN deve encontrar um tal arranjo capaz de prover um campo elétrico recebido maior do que um valor base E_{\min} . Seja $n \in \{1, 2, \dots, N\}$ o índice das estações, (x_n, y_n) a posição da n -ésima estação e $E_n(x, y)$ o campo elétrico recebido da n -ésima estação na célula (x, y) . Se

$$\max_{n \in \{1, \dots, N\}} E_n(x, y) \geq E_{\min}, \quad (4-3)$$

então a célula (x, y) é considerada coberta pela SFN.

Entretanto, em qualquer ponto da ROI, recebem-se os sinais provenientes de diversas estações da SFN. No entanto, a recepção é possível se a Equação (4-3) for verdadeira e os símbolos dos diferentes transmissores chegarem dentro do intervalo de guarda do símbolo OFDM (6). Partindo da Equação (4-3), pode-se considerar coberta uma célula $(x, y) \in \mathcal{R}$, definindo

$$\text{Coverage}_n(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{if } E_n(x, y) \geq E_{\min} \\ 0, & \text{c.c.} \end{cases}. \quad (4-4)$$

Essa definição mapeia a cobertura gerada por uma estação base n e a sobreposição das coberturas dada por

$$\mathcal{R}_{\text{cover}}^N(x, y) = \sum_{n=1}^N \text{Coverage}_n(x, y). \quad (4-5)$$

Isto é, se $\mathcal{R}_{\text{cover}}^N(x, y)$ é igual a zero, a condição estabelecida na Equação (4-4) não é satisfeita em (x, y) para todas as estações, então (x, y) não é considerada coberta. Se $\mathcal{R}_{\text{cover}}^N(x, y) > 1$, (x, y) é coberta por uma ou múltiplas estações base.

O objetivo do algoritmo heurístico desenvolvido é, usando conhecimento prévio típico de projetos de SFN como altitude, cobertura e sobreposição de cobertura, reduzir o Espaço de Busca (ou Espaço de Solução) para que se obtenha uma boa cobertura conjunta da ROI usando as diversas estações que compõem a rede e, concomitantemente, evitar a formação de regiões passíveis de interferência comprometedora originada de outras estações (com diferenças entre os tempos de chegada maiores que um símbolo) (6), melhorando o SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*, Razão Sinal-Ruído mais Interferência). Neste caso, definimos $\Omega = \text{CF}_{\min}^N$ (a mínima fração coberta da ROI para N estações base) e

$$M(x_n, y_n) = \text{CF}_N = \frac{\sum_{(x,y) \in \text{ROI}} \Gamma(\mathcal{R}_{\text{cover}}^N(x, y))}{R}, \quad (4-6)$$

com $\Gamma(x)$ igual a 1 se $x \geq 1$ e zero em caso-contrário. Assim, deseja-se maximizar a cobertura combinada do arranjo de N estações base, com o critério de avaliação de desempenho

$$Q(x_n, y_n) = \begin{cases} \text{CF}_N, & \text{se } \text{CF}_N \geq \text{CF}_{\min}^N \\ 0, & \text{c.c.} \end{cases} \quad (4-7)$$

Assume-se que todas as estações que compõem a SFN usam a mesma potência de transmissão e um diagrama de radiação omnidirecional.

4.2.2

Algoritmo Proposto

A otimização heurística proposta avalia a aptidão de pontos candidatos para o deslocamento de uma estação n da SFN, combinando diversas superfícies representantes de diversos parâmetros relevantes para o projeto de um arranjo de estações base de uma SFN. As superfícies são calculadas a cada rodada de simulação t (3). Cada estação é deslocada para o ponto melhor avaliado, isto

é, faz-se

$$\{(x_n^*(t), y_n^*(t))\}_{n=1\dots N} = \arg \max_{x,y \in \mathcal{R}} \text{Cand}_{n,t}(x, y). \quad (4-8)$$

Na Equação (4-8), a superfície de avaliação de aptidão resultante dos pontos candidatos para o deslocamento da n -ésima estação localizada em (x, y) durante a t -ésima iteração, é dada por

$$\begin{aligned} \text{Cand}_{n,t}(x, y) = \text{CF}_n(x, y) \times \left[\kappa \text{NH}(x, y) + \alpha \text{OutR}(x, y) + \gamma \text{NC}_{n,t}(x, y) \right] + \\ + A_{n,t}(x, y), \quad (x, y) \in \text{SR}_{n,t} \subset \mathcal{R}, \end{aligned} \quad (4-9)$$

onde κ , α , γ , são parâmetros ajustáveis para a convergência da solução (os pesos de cada superfície) e $\text{SR}_{n,t}$ é a região de busca para a n -ésima estação na iteração t . A região de busca e as superfícies na Equação (4-9) são definidas heurísticamente e detalhadas nas seções subsequentes.

4.2.3 Heurísticas

Uma heurística é uma abordagem para resolver um problema que considera a experiência pessoal ou o conhecimento prévio, examinando um número limitado de escolhas alternativas para tomar uma decisão. Assim, uma heurística ajuda na tomada de decisão diminuindo o universo de soluções possíveis (63).

4.2.3.1 Altura Normalizada

Na Equação (4-9), $\text{NH}(i, j)$ (*Normalized Height*) é a altura normalizada do relevo da ROI. A NH é considerada na avaliação de posições candidatas para as estações, pois, a princípio, quanto mais alta é a localização de uma estação, maior tende a ser a sua cobertura. Assim, a função de $\text{NH}(i, j)$ é fazer com que posições candidatas com maior altitude tenham maiores chances de serem testadas. Define-se

$$\text{NH}(x, y) = \left(\frac{\log_{10} h(x, y)}{\max_{x,y} \log_{10} h(x, y)} \right), \quad \forall (x, y) \in [0, X - 1] \times [0, Y - 1]. \quad (4-10)$$

Usa-se a função logarítmica para diminuir a faixa dinâmica.

4.2.3.2

Fração de Cobertura

A superfície $CF_n(i, j)$ armazena a fração da ROI coberta (CF – *Coverage Fraction*) pela n -ésima estação na iteração t , localizada em $(x_n(t-\tau), y_n(t-\tau))$, anterior a t . Esta superfície avalia o quão promissor, em termos de cobertura, um ponto previamente testado é em relação aos demais (testados ou não). Ou seja, na Equação (4-9), $CF_n(i, j)$ tem o intuito de indicar posições candidatas previamente não testadas ou bem avaliados. Define-se

$$CF_n(x, y) = \frac{\sum_{(x,y) \in ROI} Coverage_n(x, y)}{\mathcal{R}}, \quad (4-11)$$

onde \mathcal{R} é a quantidade de pixels da ROI e $Coverage_n(l, c)$ são os pixels considerados cobertos, ou seja, nos quais o campo elétrico no ponto (l, c) resultante do transmissor n em (x, y) é maior que o limiar de sensibilidade dos receptores alvo. Quanto maior o valor de $CF_n(x, y)$, melhor a cobertura obtida por uma estação. Inicialmente, faz-se $CF_n(x, y)$ igual a 1 (um) para todo (x, y) . Cada célula é atualizada usando

$$CF_n(x_n(t), y_n(t)) = \begin{cases} \epsilon, & CF_n(x_n(t), y_n(t)) \leq \epsilon \\ CF_n(x_n(t), y_n(t)), & \text{c.c.} \end{cases}. \quad (4-12)$$

Que associa um pequeno valor não-nulo (usa-se $\epsilon = 0,01$) para pontos onde colocar uma estação base leva a fração de cobertura muito pequena da ROI.

4.2.3.3

Regiões Não Cobertas

De forma oposta à da superfície $CF_n(x, y)$, usa-se $NC_{n,t}(x, y)$ para indicar as regiões não cobertas da ROI (NC – *Not Covered*) pela SFN. O objetivo desta superfície é atrair a n -ésima estação para a região não coberta mais próxima a ela (e afastá-la das demais regiões). Simultaneamente, tal estratégia tenta aumentar a cobertura da ROI enquanto diminui a superposição de coberturas de diferentes estações base da SFN.

Divide-se a ROI em C regiões de Voronoi (64) V_c ($c=1 \dots C$) criadas a partir de máximos locais (65) do relevo da ROI (conforme exemplificado na Figura 4.1). A função máximo local(h, ROI, ρ_{LM}) retorna a fração ρ_{LM} ($0 < \rho_{LM} < 1$) dos máximos locais dentro da ROI. Ou seja, retorna os C máximos locais

$$\{(x_c, y_c)\}_{c=1 \dots C} = \text{máximo local}(h, ROI, \rho_{LM}). \quad (4-13)$$

Cada (x_c, y_c) é um centroide de uma V_c . Para a c -ésima célula de Voronoi, avalia-se a cobertura do centroide pela SFN e, assim, define-se

$$D_c(x, y) = \begin{cases} g(d_c), & (x_c, y_c) \text{ não coberto} \\ 0, & \text{c.c.} \end{cases}, \quad (x, y) \in V_c \quad (4-14)$$

$$\text{com } g(d_c) = \frac{d_{c,M} - d_c}{d_{c,M}}, \quad d_{c,M} = \max_{(x,y) \in V_c} d_c, \quad (4-15)$$

$$\text{e } d_c = \sqrt{(x - x_c)^2 + (y - y_c)^2}. \quad (4-16)$$

Como resultado, cada máximo local da ROI corresponde a $D_c(x, y)$ onde o máximo vale 1 no centro da célula e diminui conforme se afasta do centro.

Consequentemente $NC_{n,t}(x, y) \cup NC_{m,t}(x, y) = \emptyset$, $n \neq m$ (3). Uma vez obtidos os politopos (células de Voronoi), verifica-se quais de seus centroides são mais próximos da n -ésima estação do que das demais estações, este conjunto de células é denominado C_n (com $\#C_n$ elementos), na t -ésima iteração. Do exposto, definimos a superfície através de

$$NC_{n,t}(x, y) = \log_{10} \left(\frac{\sum_{c \in C_n} d_c(x, y)}{\#C_n} \right). \quad (4-17)$$

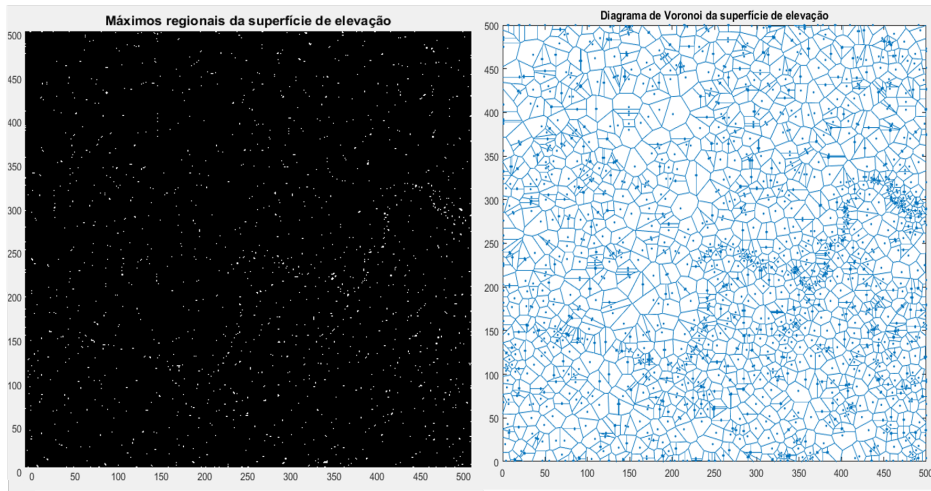


Figura 4.1: Superfície de Voronoi (direita) gerada a partir dos máximos locais (esquerda) da superfície de elevação.

4.2.3.4

Candidatos Fora da ROI

A superfície $OutR(x, y)$ é a altura normalizada dos pixels fora da ROI. Quanto maior a altura de um pixel (x, y) fora da ROI, maior é $OutR(x, y)$. Esta

superfície pondera a possibilidade de haver boas posições candidatas fora da ROI em termos de cobertura. Para diminuir a complexidade dessa superfície, avalia-se uma fração $0 < \rho_{\text{ROI}} < 1$ dos politopos com maiores altitudes fora da ROI (3).

4.2.3.5 Superfície Aleatória Gaussiana

A superfície $A_{n,t}(x, y)$ é gerada aleatoriamente usando uma distribuição Gaussiana $\mathcal{N}(\nu, \sigma)$. Sua adição na Equação (4-9) visa explorar posições candidatas de baixa aptidão ocasionalmente e assim aumentar a variabilidade das posições candidatas testadas.

4.2.3.6 Região de Busca

A região de busca $SR_{n,t}$ (*Search Region*) é limitada ao quadrante definido a partir da variação da cobertura da n -ésima estação base entre $t-1$ e $t-2$ e das interferências geradas pelas demais estações na iteração t . Este processo é ilustrado na Figura 4.2. Quando a cobertura mostra um aumento entre $t-1$ e $t-2$, o raio de busca diminui, e quando mostra uma diminuição, o raio de busca aumenta (3). Define-se o raio de busca para a n -ésima estação base, na t -ésima iteração

$$r(n, t) = \begin{cases} \kappa r(n, t-1), & \text{CF}(i_n(t-1), j_n(t-1)) \leq \text{CF}(i_n(t-2), j_n(t-2)) \\ \frac{r(n, t-1)}{\kappa}, & \text{CF}(x_n(t-1), y_n(t-1)) > \text{CF}(x_n(t-2), y_n(t-2)), \end{cases} \quad (4-18)$$

onde κ é o fator de crescimento/decrescimento do raio.

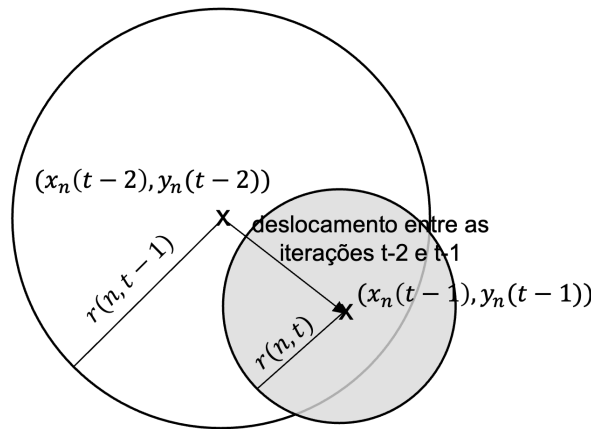


Figura 4.2: Processo de restrição da região de busca por posições candidatas para uma estação através alteração do tamanho do raio de busca conforme a variação da cobertura obtida.

Para a n -ésima estação base, avalia-se a cobertura de outros dois transmissores mais próximos a este, indexados como m e p na Figura 4.3. Após definido o raio de busca, define-se o quadrante de deslocamento como o quadrante oposto a n -ésima estação base com a estação de maior interferência. Sua função é afastar a estação base n de outras estações consideradas interferentes (66). Primeiramente, desenha-se um segmento de reta ligando as duas estações mais próximas de n , indicadas usando m e p , e traça-se a perpendicular a partir da distância central

$$d_m = \frac{OL_{m,n}}{OL_{m,n} + OL_{p,n}} d(m, p), \quad (4-19)$$

onde $d(m, p)$ é a distância entre m e p e $OL_{m,n}$ é a sobreposição entre as áreas de cobertura das estações base m e p . Isto é,

$$OL_{m,n} = \sum_x \sum_y \text{test}_{m,n}(x, y) \quad (4-20)$$

$$\text{test}_{m,n}(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{se } \text{Coverage}_n(x, y) = \text{Coverage}_m(x, y), \\ 0, & \text{c.c.} \end{cases},$$

O segmento de reta que liga m e p e a linha perpendicular a ele definem um eixo que divide o plano em quatro quadrantes. Considerando que esse eixo é centralizado no ponto testado para o n -ésimo transmissor na t -ésima iteração, então o transmissor pode ser deslocado dentro do quadrante indicado pela região hachurada na Figura 4.3.

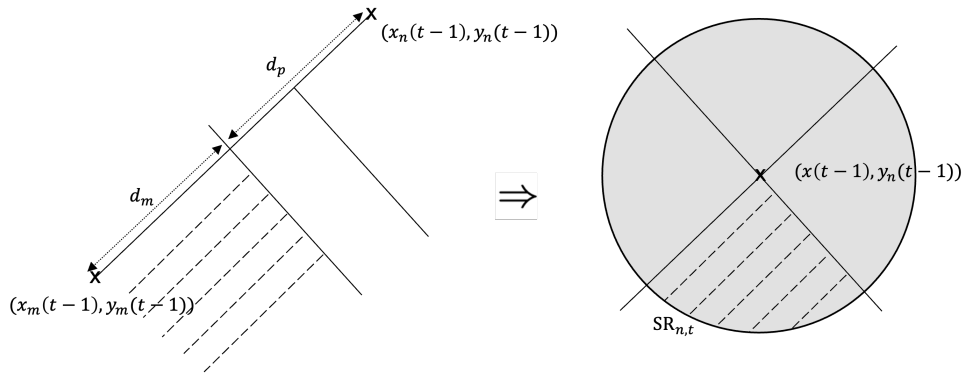


Figura 4.3: Processo de restrição da região de busca por posições candidatas para uma estação através da definição do quadrante de busca considerando a estação n e o par de estações mais próximas m e p .

4.2.4

Algoritmo

A cada iteração, as áreas de cobertura das N estações base, a cobertura total e a sobreposição entre as áreas de coberturas são avaliadas para computar as funções heurísticas na Equação (4-9). O campo elétrico recebido é predito usando a ITU-R P.1546-1 (67). O Algoritmo 2 mostra esse processo.

O Algoritmo 2 recebe: 1) os dados de altitudes $h(x, y)$ e o formato da ROI; 2) os parâmetros sistêmicos E_{\min} , Coverage_{\min} , N ; e 3) o número máximo de iterações t_{\max} e a fração dos máximos locais avaliados dentro e fora da ROI, ρ_{LM} e $\rho_{\overline{ROI}}$. As saídas do algoritmo são as posições das antenas que maximizam a cobertura da SFN $\{(x_n(t^*), y_n(t^*))\}_{n=1\dots N}$ com $t^* = \arg \max_t \text{FC}_N(t)$.

Algoritmo 2: Algoritmo proposto para alocar posições de estações base em uma SFN.

Require: $h(x, y)$, ROI, E_{\min} , N , t_{\max} , ρ_{LM} , $\rho_{\overline{ROI}}$, Coverage_{\min}
 $t^* = \arg \max_t \text{FC}_N(t)$
1: Computa $\text{NH}(x, y)$
2: Computa $\text{OutR}(x, y)$
3: Obtém os politopos da ROI como na Equação (4-13);
4: # inicializando variáveis
5: $t \leftarrow 1$
6: Arbitra $\{(x_n(t), y_n(t))\}_{n=1\dots N}$
7: $H_{\text{cand}}(t) \leftarrow \{(x_n(t), y_n(t))\}_{n=1\dots N}$
8:
9: **repeat** # loop principal
10: $t \leftarrow t + 1$
11: **for** $n = 1$ to N **do**
12: Computa $E_n(x, y)$ usando ITU-R P.1546 (67) para toda ROI
13: Computa $\text{CF}_n(x, y)$
14: Computa $\text{NC}_{n,t}(x, y)$
15: Computa $A_{n,t}(x, y)$
16: Computa $\text{Cand}_{n,t}(x, y)$
17: $(x_n(t), y_n(t)) \leftarrow \arg \max_{(x,y) \in \text{SR}_{n,t}} \text{Cand}_{n,t}(x, y)$
18: **end for**
19: **if** $\text{Perm}\{(x_n(t), y_n(t))\}_{n=1\dots N} \in H_{\text{cand}}$ **then**
20: $\forall n \ r(n, t) \leftarrow \kappa r(n, t)$,
21: **goto** line 9
22: **end if**
23: $H_{\text{cand}}(t) \leftarrow \{(x_n(t), y_n(t))\}_{n=1\dots N}$
24: Avalia a cobertura da SFN usando 4-7
25: **until** $\text{FC}_N(t) \geq \text{Coverage}_{\min}$ ou $t > t_{\max}$

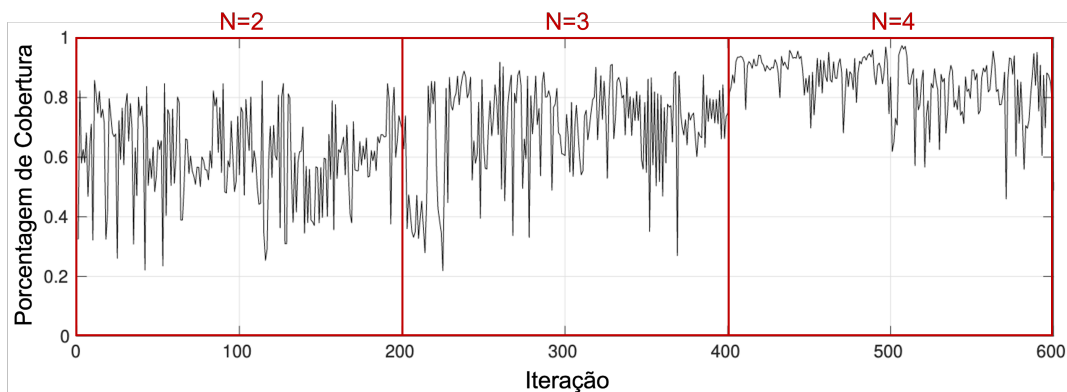


Figura 4.4: Fração de cobertura da ROI do município de Queimados enquanto se varia o número de estações de 2 até 4 a cada 200 iterações, usando antenas isotrópicas e 10 W de potência irradiada.

4.2.5

Resultados

O uso do algoritmo proposto pode obter bons candidatos para o posicionamento de estações em uma rede de radiodifusão. As Figuras 4.4 e 4.5 mostram resultados da aplicação da otimização de posição de estações base simulada com o simulador HeuCov (21), desenvolvido com este intuito. Foram consideradas estações com antenas omnidirecionais, 10 W de potência irradiada e 30 m de altura para o centro de irradiação. Define-se a ROI a partir do contorno do município de Queimados, Rio de Janeiro, enquanto se varia o número de estações N de 2 para 4 a cada 200 iterações, como também os pontos candidatos para compor a rede em $n = 4$ que atendem o critério de atendimento de cobertura, arbitrado como $E_{\min} = 58 \text{ dB}\mu\text{V}/\text{m}$ (68), em no mínimo 90% dos pontos da ROI.

Na Figura 4.4, observa-se como a porcentagem de cobertura da ROI aumenta com o aumento de N e como o algoritmo explora arranjos de melhores desempenhos conforme as iterações. Para ilustrar o espaço de Solução explorado pelo algoritmo, a Figura 4.5 mostra as posições que compõem alguma solução candidata, considerando todas as iterações para $N=4$. Pode-se observar que, com a ROI destacada em amarelo, vários pontos fora da ROI são selecionados para atender a SFN.

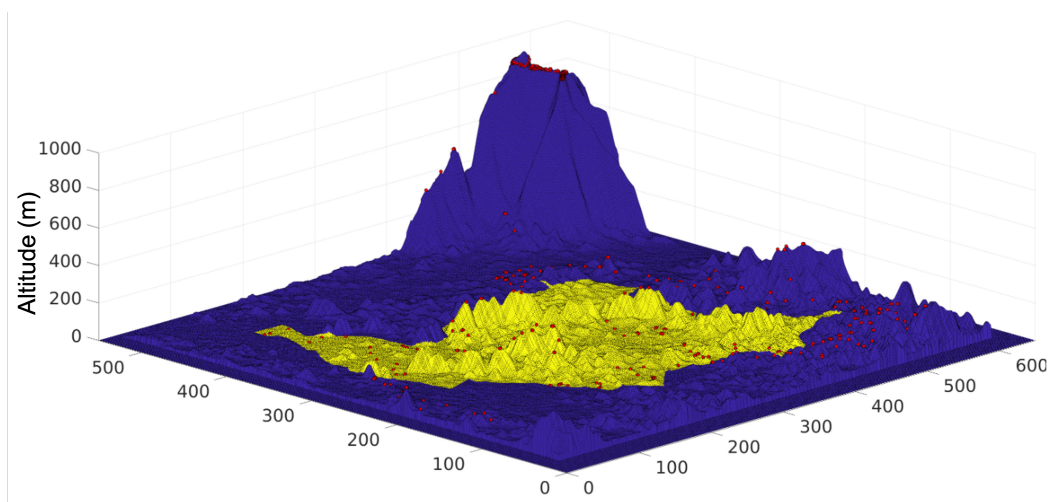


Figura 4.5: Mapa de pontos candidatos do conjunto solução (em vermelho) para o caso de uma SFN composta por quatro estações usando antenas isotrópicas que atendem ao critério de desempenho mínimo hipotético de 90% de cobertura da ROI do município de Queimados (em amarelo).

4.3

Arranjos de Estações para Redes Celulares

4.3.1

Estimando Bons Pontos Candidatos para a RAN

Com a rápida evolução, aumento da complexidade e da quantidade de dispositivos presentes nas redes celulares (69). O projeto de implantação das estações dessas redes também se torna um problema complexo. A fim de se obter bons arranjos de posições de BSs de acordo com a distribuição posições dos UEs presentes na RAN, desenvolve-se aqui uma metodologia que usa a técnica de *clustering* (agrupamentos), para obter esses arranjos de posições de BSs. Esses agrupamentos podem fornecer posições para as BSs que diminuem a distância média destas para com os UEs com o qual se associam. Partindo do desenvolvimento feito na seção anterior, a fim de expandir os estudos para redes celulares mais complexas, optou-se por desenvolver uma metodologia para uma rede de acesso por rádio celular. O projeto do arranjo de posições de estações base para uma rede de acesso rádio móvel celular não se limita à área coberta, faz-se necessário avaliar critérios de desempenho do serviço de dados. Por exemplo, conforme detalhado no Capítulo 2 e no Capítulo 3, a rede deve ser capaz de suportar a demanda gerada pelos clientes (UEs) espacialmente distribuídos na ROI. A avaliação de cada lote de U UEs na ROI leva ao deficit de capacidade médio do seu arranjo $\overline{CD}(\mathbf{p}_k)$. Logo, pode-se atribuir

$$\text{se } (x, y) \in \mathbf{p}_k \begin{cases} D(x, y) = \overline{CD}(\mathbf{p}_k), \\ \Psi(x, y) = \Psi(x, y) + 1, \end{cases} \quad (4-21)$$

com $\overline{CD}(\mathbf{p}_k)$ como a diferença média entre a meta de capacidade C_{target} e a capacidade alcançada pelo u -ésimo UE, calculada para o ponto p_k , atendido pela BS n no k -ésimo lote e $\Psi(x, y)$ como a frequência na qual o ponto (x, y) é testado. É importante ressaltar que, diferentemente do desenvolvimento feito na Seção 4.2, o critério de atendimento não deve considerar a área coberta, mas o deficit de capacidade $CD(u)$ do u -ésimo UE, localizado em (x_u, y_u) (conforme explicado na Seção 2.8.2.2).

A partir da definição da Seção 4.1, com $M(x, y) = D(x, y)$ e $f(M(x, y)) = D(x, y)/\Psi(x, y)$ e após a execução de K lotes, obtém-se a medida de desempenho ao se posicionar uma BS na ROI

$$Q(x_n, y_n) = \begin{cases} \frac{D(x, y)}{\Psi(x, y)}, & C(x, y) > 0 \\ 0, & \text{c.c.} \end{cases} \quad (4-22)$$

Assumindo que a superfície $Q(x, y)$ varia lentamente, usa-se um número

limitado de rodadas e interpola-se os resultados para obter o mapeamento a partir da Equação (4-22).

Pode-se observar na Equação (4-22) que deseja-se alocar N BSs de forma a suprir o deficit de capacidade para os U UEs presentes na ROI. Para isso, gera-se um arranjo que, dada uma distribuição arbitrária de UEs, evita que algumas BSs sejam sobrecarregadas com uma grande demanda de capacidade dos UEs, enquanto existam outras com uma pequena demanda de capacidade, permitindo que uma maior quantidade de UEs alcancem ou se aproximem de C_{target} (aumentando $\overline{CD}(\mathbf{p}_k)$). Assim, usa-se o algoritmo de clusterização para agrupar os UEs a partir das suas posições e alocar BSs nos centroides destes agrupamentos, dividindo a demanda de capacidade.

4.3.1.1

Clusterização para Determinar o Arranjo de Posições se BSs

Dada a ROI \mathcal{R} composta por $X \times Y$ células de área $A_{\mathcal{R}}/(XY) m^2$ e o número de BSs N , aplicamos o algoritmo *K-means* com a distância Euclidiana (norma L^2) para calcular os centroides que formam o arranjo de posições para N BSs para o k -ésimo lote de U UEs. A Figura 4.6 exemplifica os centroides e os *clusters* resultantes considerando 2, 4 e 8 BSs.

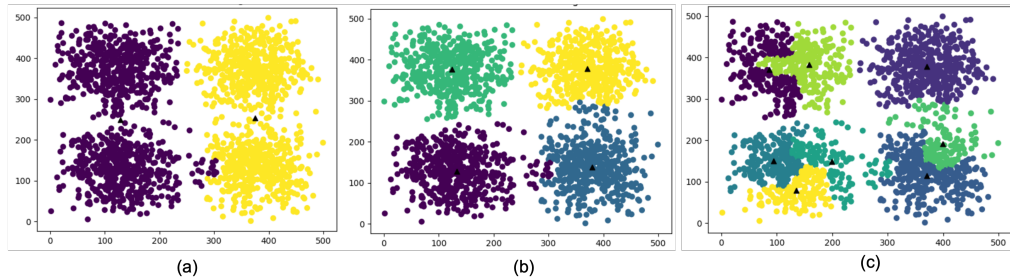


Figura 4.6: Exemplo do algoritmo de clusterização sendo aplicado em 200 pontos em uma ROI de 500×500 pixels com 2 (a), 4 (b) e 8 (c) *clusters*.

A aleatoriedade inerente ao sorteio de posições para UEs impacta o arranjo de posições de BSs resultante da clusterização, já que tal procedimento não fornece sempre o mesmo resultado (70). Consequentemente, a clusterização aplicada a K lotes de U UEs retorna um conjunto de arranjos $\mathcal{P} = \{\mathbf{P}_k\}, k = 1 \dots K$ e $\mathbf{P}_k = \{\mathbf{p}_{k,0}, \mathbf{p}_{k,1}, \dots, \mathbf{p}_{k,N}\}$. O Algoritmo 3 apresenta a totalidade deste processo.

O algoritmo requer a simulação da RAN. Ela emprega o simulador Sama, descrito no Capítulo 2. Com o Sama, avalia-se o desempenho da RAN empregando células setorizadas e *beamforming* em cada setor. Os recursos de tempo-frequência dividem-se em RBs que podem ser atribuídos arbitrariamente para os UEs para cada lote de arranjos de posições de BS calculado usando cluste-

Algoritmo 3: Simulação do desempenho da RAN usando os arranjos de posição obtidos via clusterização

Require: $\mathcal{R}, S(x, y), N, K, j$

- 1: **for** $n \leq N$ **do**
- 2: **for** $k \leq K$ **do**
- 3: $U \leftarrow j$ amostras de $S(x, y) | \forall (x, y) \in \mathcal{R}$
- 4: $\mathbf{p}_k \leftarrow$ executar o Algoritmo 4 para n
- 5: Computa enlaces da RAN via Sama (descrito na Seção 2.8.1.1)
- 6: Computa $\overline{\text{CD}}(\mathbf{p}_k)$
- 7: Armazena $\overline{\text{CD}}(\mathbf{p}_k)$ in $(x, y) \in \mathbf{p}_k$
- 8: Computa $C(x, y)$
- 9: Armazena $C(x, y)$ in $(x, y) \in \mathbf{p}_k$
- 10: **end for**
- 11: **end for**

rização no conjunto de posição de UEs. Como resultado, obtém-se uma função de desempenho em se alocar as BSs na ROI.

Clusters A clusterização é uma técnica não-supervisionada de agrupamento das amostras de um conjunto (70). Técnicas de clusterização tentam encontrar as amostras similares, cada subconjunto de amostras similares é dito um *cluster* (conjunto, agrupamento ou aglomerado). Cada *cluster* contém elementos mais similares entre si com base em um índice de similaridade (70). Os elementos de um cluster são mais diferentes dos elementos de outros clusters do que de um de seu próprio. O objetivo é agrupar as amostras mais semelhantes em um agrupamento enquanto se produz agrupamentos pouco semelhantes entre si.

Para alocar as posições das BSs usando uma metodologia simples, agrupam-se as UEs usando as suas posições. Formam-se assim clusters de BSs. Empregam-se tantos clusters quantas estações base forem consideradas.

Existem diversos métodos de clusterização. O autor de (70) classifica-os como métodos de particionamento, métodos hierárquicos ou métodos baseados em densidade.

Por exemplo, o algoritmo de particionamento *k-means* emprega um critério de similaridade para obter K agrupamentos e seus centroides. O Algoritmo 4 descreve o funcionamento básico do algoritmo *k-means*. O algoritmo *k-means* começa escolhendo K pontos iniciais para os centroides dos *clusters*. Cada amostra é associada ao centroide mais próximo (dependendo da função de similaridade empregada) obtendo as amostras contidas em cada um dos K clusters. Então, as posições dos centroides são computadas novamente usando as amostras pertencentes aos clusters. Itera-se este processo até a convergência ou a condição de relaxamento ser alcançada (70).

Algoritmo 4: Clusterização com K -means

- 1: Selecciona K pontos aleatoriamente como centroides iniciais
 - 2: **while** Critério de convergência não for alcançado **do**
 - 3: Atribui cada amostra ao centroide mais próximo
 - 4: Recalcula os centroides
 - 5: **end while**
-

Dependendo do que as amostras representam, especifica-se o critério de proximidade/similaridade. Por exemplo, para vetores nos quais as coordenadas tem significados similares, pode-se usar a distância Euclidiana (norma L^2) ou e o critério de similaridade do cosseno são alguns exemplos; já a distância de Manhattan (norma L^1) acumula as diferenças absolutas entre as coordenadas do vetor.

A distância ou norma euclidiana entre dois vetores \mathbf{x} e \mathbf{a} é

$$d(\mathbf{x}, \mathbf{a}) = \|\mathbf{x} - \mathbf{a}\| = \sqrt{\sum_i (x_i - a_i)^2}, \quad (4-23)$$

que é a função objetivo a ser minimizada pelo algoritmo.

Seja \mathcal{A}_k o k -ésimo *cluster*, \mathbf{a}_k o centroide do *cluster*, e um ponto do conjunto de dados $\mathcal{X} = \mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_U$. Isto é,

$$\mathbf{a}_k = \frac{\sum_{\mathbf{x}_i \in \mathcal{A}_k} \mathbf{x}_i}{|\mathcal{A}_k|}. \quad (4-24)$$

Define-se a soma de erros quadráticos (SSE, *Sum of Squared Errors*) como

$$\text{SSE}(A) = \sum_{k=1}^K \sum_{\mathbf{x}_i \in \mathcal{A}_k} \|\mathbf{x}_i - \mathbf{a}_k\|^2. \quad (4-25)$$

A clusterização visa encontrar um mínimo local para o SSE.

Diferencia-se o SSE em relação aos \mathbf{a}_k e igualam-se as derivadas parciais a zero (70), obtendo

$$\frac{\partial \text{SSE}}{\partial \mathbf{a}_k} = \sum_{\mathbf{x}_i \in \mathcal{A}_k} 2(\mathbf{a}_k - \mathbf{x}_i) = 0, \text{ portanto} \quad (4-26)$$

$$|\mathcal{C}_k| \cdot \mathbf{c}_k = \sum_{\mathbf{x}_i \in \mathcal{A}_k} \mathbf{x}_i \text{ e } \mathbf{c}_k = \frac{\sum_{\mathbf{x}_i \in \mathcal{A}_k} \mathbf{x}_i}{|\mathcal{A}_k|}. \quad (4-27)$$

É importante salientar que o desempenho do algoritmo *k-means* pode depender do número *clusters*, assume-se que o número de agrupamentos é pré-determinado para o algoritmo de clusterização.

4.3.2

Projeto do Arranjo de BSs

A fim de avaliar o desempenho da técnica de clusterização para se posicionar BSs de uma RAN conforme a distribuição espacial de UEs, compara-se com a alternativa de alocação aleatória de posições de BSs. Considera-se o cenário de redes de acesso por rádio em que se avalia o atendimento de um critério de capacidade por UE C_{target} , um cenário sintético é empregado com uma ROI retangular de $X \times Y$ pixels ou células. E, para simular uma distribuição aleatória de UEs em uma ROI, usa-se uma distribuição uniforme no plano. Cada amostra da função de distribuição representa a localização de uma UE.

4.3.2.1

Resultados

Para a simulação da RAN, usam-se os parâmetros apresentados na Tabela 4.1 e executa-se o simulador Sama para calcular o deficit de capacidade por UE $CD(t, u)$. Considera-se uma ROI de 1000×1000 pixels de $30 \times 30 m^2$ e simula-se os enlaces de descida usando antenas setoriais com capacidade de *beamforming*, verificando qual é a capacidade do enlace e se é atingida a capacidade alvo $C_{\text{target}} = 30$ Mbps por cada UE.

O processo acima requer o arranjo de BSs na ROI. Para cada lote de U UEs, avalia-se o deficit de capacidade $CD(\mathbf{p}_k)$ para o conjunto de N BSs posicionadas em $\mathbf{p}_k = \{p_{n,k}\} = \{(x_{n,k}, y_{n,k})\}$, $n = 1 \dots N$. Para evitar o teste de arranjos de BSs ruins, usa-se a metodologia de clusterização que visa encontrar bons arranjos de posições de BSs para serem testados. O cálculo do deficit de capacidade, assim como os detalhes dos cálculos de capacidade por UE, razão sinal-ruído e outros indicadores da simulação foram discutidos no capítulo anterior, onde detalha-se o desenvolvimento do simulador.

Comparou-se o desempenho da RAN quando se usa o método de clusterização para escolher as posições das BSs com os resultados obtidos nas mesmas condições ao se posicionar as BSs aleatoriamente na ROI, usando uma distribuição uniforme. Realizaram-se 100 simulações para $N = 1, 2, 3, \dots, 14, 15$. Os resultados estão presentes na Figura 4.7, onde se pode observar o ganho derivado do posicionamento por clusterização conforme N aumenta.

Aplicou-se o Algoritmo 3 em uma distribuição de posições de UEs $S(x, y)$ em que se sortearam 400 pontos para validar a solução obtida. O principal fator avaliado é o deficit de capacidade $CD(\mathbf{p}_k) \forall u$ para o arranjo de BSs. Nesta

Tabela 4.1: Parâmetros de Configuração da RAN

Parâmetros da RAN	
Frequência central	3,5 GHz
Largura de banda	100 MHz (reutilizado em cada setor)
Número de BSs na RAN	Variável
Número de UEs na RAN	500
<i>Scheduler</i>	<i>Round Robin</i>
Meta de Serviço da RAN	
C_{target} (Mbps)	30
Parâmetros da BS	
Altura da BS	30 m
Número de setores por BS	3
Apontamentos dos setores (ϕ, θ)	$\phi=(60^\circ, 180^\circ, 300^\circ)$, $\theta=(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$
Modelagem e Parâmetros dos Setores	
Potência de transmissão por setor	100 W
Arranjo da antena setorial	8 x 8 (espaçamento de $0,5\lambda$)
Ganho do arranjo de antena setorial	Conforme a Seção 2.4.3.2
Ganho do elemento do arranjo	5 dBi
Número de feixes	20 por antena
Modelagem e Parâmetros dos UEs	
Altura do UE	1,5 m
Diagrama da antena do UE	omnidirecional
Ganho da antena do UE	0 dBi
Parâmetros de Simulação	
Variância do modelo de <i>Path-Loss</i>	6 dB
Duração da iteração T	1 s

configuração, quando $CD(\mathbf{p}, u)$ é positivo, $C(\mathbf{p}_k)$ é menor do que capacidade alvo C_{target} e quando é negativo, é maior do que C_{target} . Para um determinado C_{target} , a razão de UEs que pode ser considerada atendida, em uma rodada de simulação, pode ser definido como

$$R_S(\mathbf{p}_k) = \frac{\sum_{u_k} \Lambda(u_k)}{U}, \quad (4-28)$$

com $\Lambda(u_k)$ sendo definido por

$$\Lambda(u_k) = \begin{cases} 1, & CD(u_k) \leq 0 \\ 0, & c.c. \end{cases}. \quad (4-29)$$

Ao mapear $R_S(\mathbf{p}_k)$ para a alocação de posições de BS \mathbf{p}_k em cada lote k

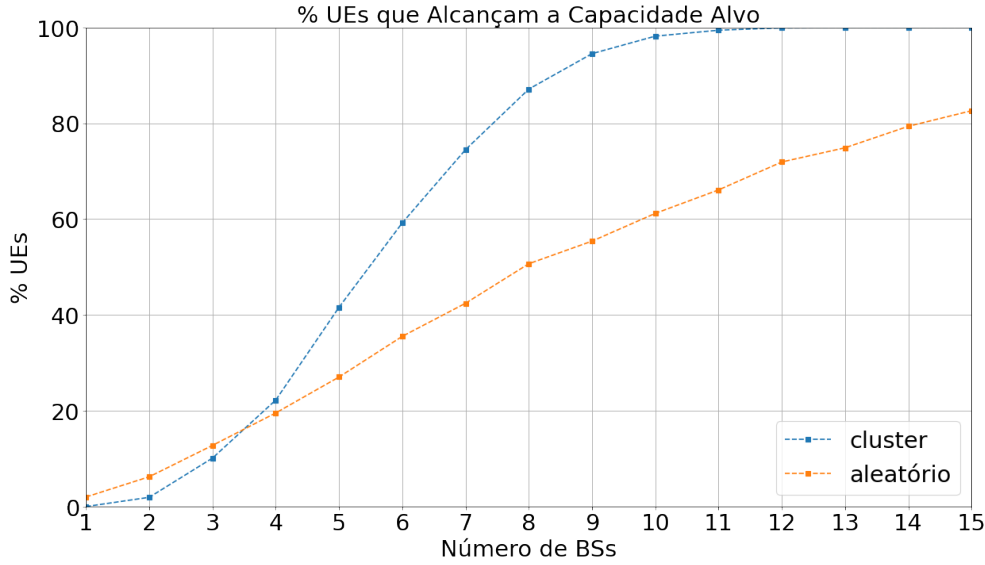


Figura 4.7: Porcentagem de UEs que alcançam a capacidade alvo de 30 Mbps para 400 UEs e $N = 1, 2, 3, \dots, 14, 15$.

de simulação, os resultados apresentados nas Figuras 4.8 e 4.9 mostram nuvens de pontos para diferentes números de BSs ($N = 4, 5, 6, 7$ e $N=10, 11, 12, 13$, respectivamente) usando a técnica de clusterização.

Pode-se observar nas Figuras 4.8 e 4.9 que as distribuições de posições para BSs formam diferentes formatos dependendo do valor de N . Também se observa a discrepância entre a resolução da grade de 1 M de pixels (1000×1000 pixels) e o número de iterações em cada lote (100 para cada). Assim, se for calculado $CD(\mathbf{p}_k)$ para cada pixel, a representação será espacialmente esparsa. Para prover uma visualização mais apresentável dos resultados, o valor médio $\overline{CD}(\mathbf{p}_k)$ (e, consequentemente, $\overline{R}_S(\mathbf{p}_k)$) é calculado nos pontos testados em torno de um raio de 5 pixels a partir dos valores mais altos, em um processo iterativo. Ou seja, verifica-se o maior $R_S(\mathbf{p}_k)$ e faz-se a média com os pontos em um raio de 5 pixels e, após isso, o processo se repete com o próximo maior $R_S(\mathbf{p}_k)$. Também se observa a baixa variação de $R_S(\mathbf{p}_k)$ nas figuras, isso mostra que, comparativamente com a distribuição uniforme de UEs, a clusterização fornece resultados consistentes ao longo de múltiplas rodadas de simulação. Ou seja, para uma distribuição aleatória de posições de UEs $S(x, y)$ na ROI, pode-se usar a clusterização para se obter um conjunto de posições de BSs \mathbf{p}_k que forneça bons resultados no que diz respeito ao atendimento de um critério de demanda de capacidade.

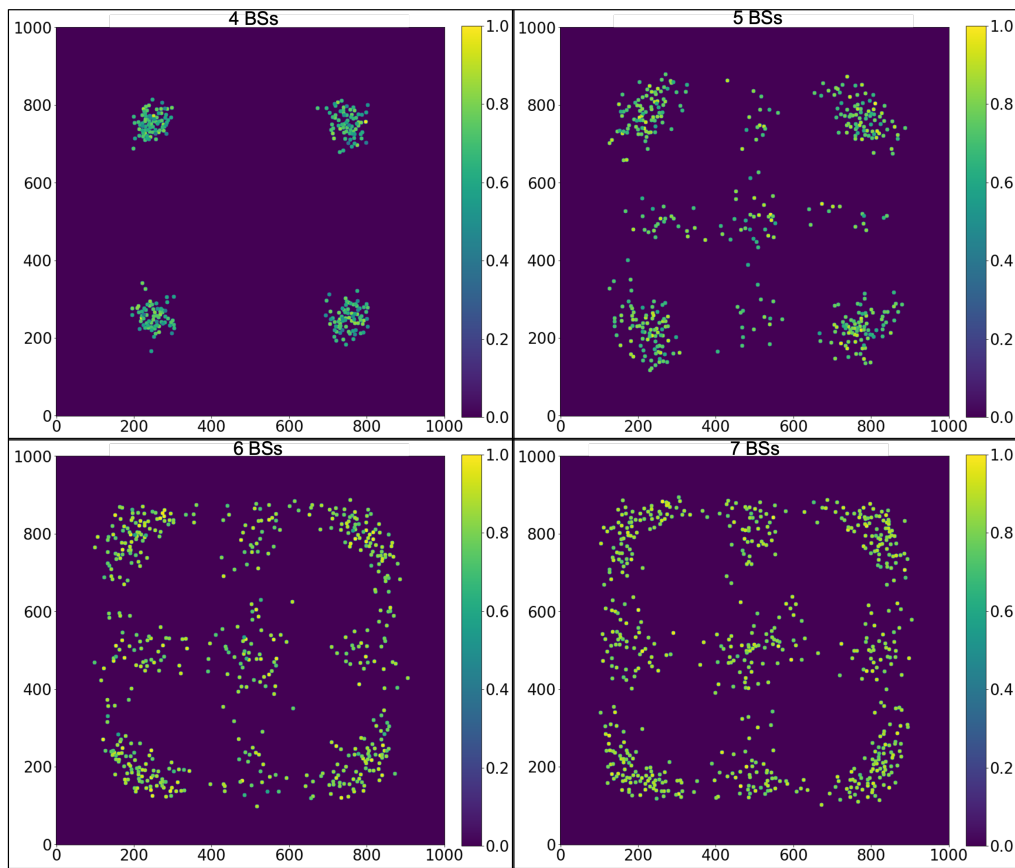


Figura 4.8: Razão Normalizada de UEs atendidos por BSs usando clusterização para a capacidade alvo de 30 Mbps, $U = 400$ e $N = 4, 5, 6, 7$.

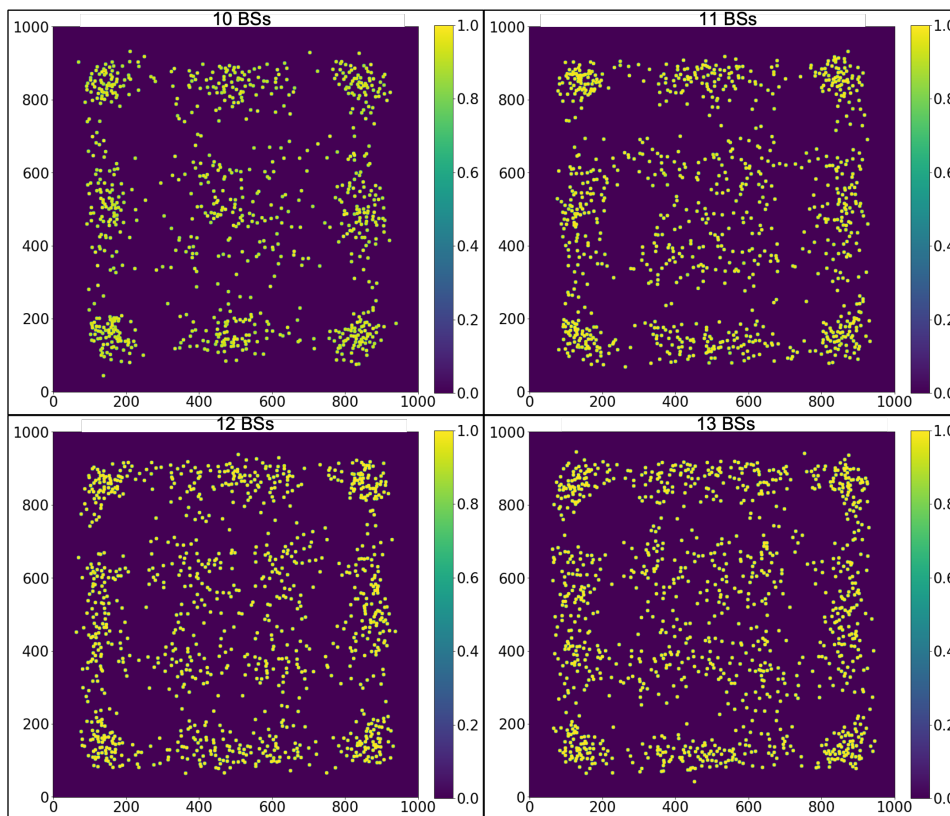


Figura 4.9: Razão Normalizada de UEs atendidos por BSs usando clusterização para a capacidade alvo de 30 Mbps, $U = 400$ e $N=10, 11, 12, 13$.

5

Alocação de Recursos a Partir de um Critério de Utilidade

Neste capítulo, propõe-se uma estratégia para a alocação de blocos de recursos de tempo-frequência baseada em um critério de utilidade. O critério é função do estado do canal, ou CSI, do UE.

Em Economia, “utilidade” é sinônimo de “satisfação”, “bem-estar”, “felicidade”, “prazer” (71). A ordenação de preferência é tida como a primeira definição de utilidade; a ordem em que um indivíduo classifica alternativas, por exemplo, o quanto um indivíduo ‘gosta’ de algo quando compra o produto (71). Existem duas abordagens para definir utilidade: a ordinal é diretamente ligada às preferências humanas e, portanto, assume que a utilidade não é, a princípio, quantificável, mas somente comparável (72); e a cardinal, que assume que a utilidade é mensurável e pode ser expressa quantitativamente, ou que pode listar a preferência em uma ordem cardinal (1, 2, 3, etc.) (72). Por exemplo, pode-se definir a utilidade total Y_T em se consumir uma quantidade n de produtos ou serviços como

$$Y_T = Y_1 + Y_2 + Y_3 + \dots + Y_n. \quad (5-1)$$

Em (73), o autor descreve o conceito de utilidade em um serviço, como telefonia, luz, água, etc. Define-se a utilidade de um serviço para seus usuários como a combinação da influência dos seguintes fatores: necessidade, disponibilidade, usabilidade, taxa de utilização e exclusividade.

A estratégia aqui proposta quantifica a utilidade de se servir um UE com uma determinada quantidade de recursos (ou RBs) considerando três fatores: a resposta de canal, a demanda de capacidade do UE e a quantidade de recursos disponíveis na BS em que o UE está alocado. Com as pontuações de utilidade calculadas, a BS pode ranquear os UEs e alocar os recursos, ou RBs, priorizando os UEs em melhores condições para o atendimento da sua demanda (com o melhor canal e/ou menos demanda de capacidade) a partir dessa classificação.

5.1

Alocação de Recursos em Redes Celulares

Atemo-nos a algoritmos do tipo *channel aware*, mais modernos e com melhores resultados. Eles fazem uso do canal da UE para o BS para o *feedback* dos diversos indicadores do sistema 5G. O trabalho (74) implementa uma NVS (*Network Virtualization Substrate*), uma rede de serviços definidos

virtualmente, em que se almeja alocar recursos eficientemente para os mais diversos serviços, com tarifação adequada; quanto maior a função de utilidade do recurso de rede, maior será a taxa para o usuário que a utiliza. O NVS *Slice Scheduler* define a utilidade de se reservar um *slice* r_g (*slice* é uma fração dos recursos de rede disponíveis)

$$Y_g(r_g) = \frac{r_g^{\text{rsv}}}{r_g^{\text{eff}}} \log(r_g), \quad (5-2)$$

para a taxa acumulada r_g em relação à taxa efetiva média r_g^{eff} de um *slice* g e a taxa requisitada r_g^{rsv} no mesmo *slice*. Neste caso, se um usuário solicita uma taxa r_g^{rsv} maior que a mínima, deve ser cobrada uma tarifa maior. Tal trabalho foi usado como inspiração para o desenvolvimento da estratégia de alocação de recursos proposta nesta tese, especialmente a Equação (5-2).

O trabalho (75) propõe uma estratégia de alocação que tenta alcançar um valor desejado do índice de justiça (*fairness index*), para evitar que um UE obtenha uma taxa de dados demasiadamente maior que os demais (o *fairness index* é discutido na Seção 2.8.2.4), enquanto tenta maximizar o *throughput* total para as diversas condições de canal (76). Os autores definem a utilidade de alocar os recursos da rede para o u -ésimo UE, via

$$Y_\alpha = \begin{cases} \frac{x^{1-\alpha}}{1-\alpha}, & \alpha \geq 0, \alpha \neq 1 \\ \log(x), & \alpha = 1 \end{cases}, \quad (5-3)$$

onde x é o recurso alocado a um UE e α é um fator ajustável relacionado ao *fairness index*. Os autores propõem um algoritmo que encontra o valor de α que maximiza o *throughput*, para um *fairness index* alvo. Além disso, testam a proposta em um cenário limitado a dois UEs dividindo os recursos de uma BS.

O trabalho (77) propõe um algoritmo de alocação baseado no *Proportional Fair* (PF), mas com a adição do parâmetro de latência, usado conjuntamente com o *Channel Quality Indicator* (CQI) e a taxa de dados média transmitida. Esses dados permitem ao algoritmo prover resultados ponderados para a métrica de *fairness index* e a taxa de dados da rede. Os autores definem a razão entre o taxa disponível no i -ésimo fluxo de dados $f_1(\text{SINR}_i)$ e a taxa média durante o instante t

$$R_{(i,k)} = \frac{f_1(\text{SINR}_i)}{\text{avg_rate}} \cdot \frac{f_2(\text{package_delay}_{t-1})}{\text{DelayTh} - f_3(\text{package_delay}_{t-1})}, \quad (5-4)$$

onde *avg_rate* é a taxa média da rede, DelayTh é o máximo atraso aceitável na

rede, e $f_1(\cdot)$, $f_2(\cdot)$ e $f_3(\cdot)$ são funções ajustáveis lineares (fator \times parâmetro); elas dependem de SINR_i , a razão sinal-ruído-interferência do i -ésimo canal, e de $\text{package_delay}_{t-1}$, o atraso de transmissão desde o último *Transmission Time Interval* (TTI) $t - 1$. Da equação, observa-se que o algoritmo prioriza os fluxos de dados com melhores condições de canal (maior SINR) e com atrasos mais próximos ao limite *DelayTh*. Os autores comparam os resultados da metodologia com os algoritmos RR, PF e BCQI em um cenário simples, com uma BS com uma antena omnidirecionais e até 20 UEs. Os resultados favorecem o algoritmo proposto em relação aos demais.

O trabalho (78) aborda o problema considerando tanto a alocação de recursos típica (de pacotes), como também a alocação de recursos de RF, diferentemente dos anteriores. Nele, os autores propõem e analisam variantes do algoritmo EDF (*Earliest Deadline First*), limite de prazo mais antigo primeiro (79, 80, 81), comumente usado para alocação de tempo de CPU. No EDF, usa-se prioridades para a alocação de recursos de acordo com os prazos com os quais os recursos são necessários. Desta forma, atende-se os clientes que têm o prazo mais próximo do limite primeiro. Para os estudos de redes sem fio, como a alocação é de pacotes, os autores definem um algoritmo baseado em filas para processar o maior número de pacotes enquanto tentam respeitar limites de latência.

5.1.1

Função de Utilidade

A principal métrica em uma rede do tipo eMBB (*Enhanced Mobile Broadband*) é a taxa de transferência de dados (16). Atualmente, vídeos *real-time* ou *on-demand* e jogos online ou via *streaming* demandam, além de um tempo de resposta pequeno, uma taxa de dados mínima para cada UE (82) para garantir a mesma qualidade de serviço a todos os usuários simultaneamente. Nessa perspectiva, considera-se ofertar para todos os UEs conectados à RAN uma capacidade alvo C_{target} e propõe-se uma metodologia para alcançar tal meta usando um critério de menor esforço. Em vez de tentar gerenciar os perfis de demanda em uma rede física compartilhada de uma só vez ou de maneira gananciosa, usa-se um critério de menor esforço para alocar bandas de frequência para as diferentes demandas, isto, para os diferentes UEs conectados à RAN, como o usado em (74).

No presente trabalho, aplica-se uma estratégia para a alocação de recursos de uma RAN 5G que considera os recursos de RF à disposição dos UEs, na forma da alocação de feixes e BSs associadas. Esses elementos são ranqueados em cada conjunto usando critérios de menor esforço em *pipeline* (encadeada-

mente) para realizar a alocação de recursos da RAN. A meta é prover uma solução simples que, inspirada por outros algoritmos baseados em critérios de utilidade e usando o canal de retorno mais robusto presente em redes 5G, que atenda as KPIs (*Key Performance Indicators*) eMBB ao alocar recursos de RF (os RBs - *Resource Blocks*). O critério de alocação proposto é desenhado para atender um cenário eMBB em uma rede 5G ao prover um ganho em termos de taxa com moderados ganhos de latência (16) em comparação a outras estratégias de alocação.

Usa-se $R_{\text{need}}(u)$ para simbolizar os recursos necessários de largura de banda de frequência e *slots* de tempo que devem ser atribuídos pela RAN para o u -ésimo UE atingir o desempenho alvo. Considera-se que $R_{\text{tsv}}(u)$ simboliza os recursos já alocados para esse UE. Os UEs são ranqueados em termos da utilidade $Y(u)$ em oferecer a banda necessária para o u -ésimo UE, via

$$Y(u) = \frac{R_{\text{tsv}}(u)}{R_{\text{need}}(u)} f(\text{CSI}(u)). \quad (5-5)$$

Acima, $\text{CSI}(u)$ é o *Channel State Information*, informação do estado do canal ou sua estimativa de resposta para o u -ésimo UE (20), uma representação para a capacidade de um enlace.

A Equação (5-5) provê uma pontuação de utilidade derivada da quantidade de recursos disponíveis e requisitados, e da qualidade do canal. Nota-se que, quanto menos recursos um UE necessita, maior é a sua pontuação de utilidade, favorecendo o menor esforço (quanto melhor a qualidade do canal e menor a demanda, menor é o esforço). Na Equação (5-5), $f(\cdot)$ é uma função crescente não-monotônica do CSI já que, quanto melhor a qualidade do enlace, mais fácil é servir um UE. A derivada de $f(\cdot)$ deve ser decrescente de modo que, quando a qualidade do enlace aumenta, menor é o aumento da utilidade.

A partir do ranqueamento dos UEs, ranqueiam-se os feixes de cada BS e, subsequentemente, as BSs que compõem a RAN. Assim, o critério do menor esforço é usado em uma sequência inversa para alocar os recursos nos UEs. Isto é, uma maior pontuação de utilidade aponta que uma menor quantidade de recursos é necessária para atender a uma determinada taxa de dados; aloca-se banda de frequências prioritariamente para os UEs que necessitam da menor quantidade de recursos nos feixes que atendem UEs que, em conjunto, necessitam de uma menor quantidade de recursos, ativando-os no tempo, isto, alocando-lhes tempo.

5.2

Formulação do Problema

Considera-se que a RAN é composta por N BSs, e que cada uma pode ter diferentes setores. Cada setor suporta no máximo B feixes. Isto posto, sem perda de generalidade, pode-se ignorar que uma BS seja dividida em setores e acomodá-los no índice das BSs. Uma ilustração da organização de UEs, BSs e feixes é a apresentada na Figura 2.12. A rede atende UEs em uma ROI e deve prover uma capacidade alvo C_{target} para cada um. Isto demanda o uso de um esquema de alocação de recursos justo, independentemente da variabilidade do canal.

5.2.1

Deficit de Capacidade

Considera-se como deficit de capacidade do u -ésimo UE, a impossibilidade da rede em prover a um UE u , até o instante de tempo t , a taxa alvo C_{target} . Pode-se defini-lo como

$$\text{CD}(t, u) = C_{\text{target}}(u) - \sum_{\tau=1}^t C(\tau, n_{\tau,u}, b_{\tau,u}, u), \quad (5-6)$$

onde $C(\tau, n_{\tau,u}, b_{\tau,u}, u)$ é a capacidade provida para o u -ésimo UE pelo feixe $b_{\tau,u}$ da BS $n_{\tau,u}$ durante o *slot* de tempo τ .

Se T é o último *slot* de tempo, o deficit de capacidade médio é

$$\overline{\text{CD}} = \sum_{u=1}^U \text{CD}(T, u) = UC_{\text{target}}(u) - \sum_{u=1}^U \sum_{\tau=1}^T C(\tau, n_{\tau,u}, b_{\tau,u}, u). \quad (5-7)$$

A tarefa da alocação é prover recursos de tempo-frequência e RF, minimizando a Equação (5-7). Admite-se, num cenário multiplex, tipicamente *full-duplex* TDD ou FDD, em que os enlaces de subida e descida apresentem metas e déficits de capacidade diferentes e independentes. O deficit de capacidade é um importante KPI de redes do tipo eMBB, que procuram prover grande quantidade de dados para os seus usuários.

5.2.2

Modelagem do Problema

A fim de simplificar a alocação de potência, assume-se que a máxima potência de saída de qualquer setor de uma BS qualquer é P_{max} e que essa potência é igualmente distribuída em toda a largura de banda de frequências, conforme definido na especificação do simulador na Seção 2.6.4. Além disso,

assume-se que, em um *slot* de tempo, somente um feixe esteja ativo por setor de uma BS com uma potência de transmissão fixa.

Consequentemente, a abordagem proposta determina a largura de banda de frequências, no lugar da potência de transmissão para uma fração da banda de frequências fixa, como, por exemplo, faz (83). Nota-se que a potência de transmissão fixa não é uma limitação rígida para a abordagem proposta, já que se pode reduzir a potência de transmissão para um UE considerando a alocação de banda de frequências, iterativamente, se ainda existir disponibilidade na RAN.

Se $\zeta'(t, n, b) = \max_{f,u} \zeta(t, f, u, n, b)$ (ou seja, igual a um se o b -ésimo feixe no n -ésimo setor está ativo no *slot* de tempo t e igual a zero, caso contrário). As suposições acima levam ao seguinte problema de alocação de tempo-frequência

$$\min_{\text{time-band}} \sum_{n=1}^N \sum_{b \in \mathcal{B}_n} \sum_{u=1}^U \sum_{t=1}^T C_{\text{target}} - \zeta'(t, n, b) C(\tau, n, b, u) \quad (5-8)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} C_1: & \sum_{b \in \{\mathcal{B}_n\}} \zeta'(t, n, b) \leq 1, \forall t, n \\ C_2: & \sum_{u \in \mathcal{U}_{b,n}} \sum_f P_{\text{Tx}}(t, f, u, n, b) \leq P_{\text{max}} \forall t, b, n \end{cases} \quad (5-9)$$

Acima, \mathcal{B}_n lista os feixes da n -ésima BS associada ao menos a um UE. Usa-se $\zeta'(t, n, b)$ para representar a matriz de ativação dos feixes, indicando se o b -ésimo feixe na n -ésima BS durante a fatia de tempo t está ativo ou inativo.

A primeira condicionante (C_1), na Equação (5-9), restringe a ativação de somente um feixe durante um *slot* de tempo t . Por outro lado, como $P_{\text{Tx}}(t, f, n, b, u)$ é a potência de transmissão para o UE u durante t , na frequência f , para o feixe b na BS n , C_2 , na Equação (5-9), restringe a potência total por *slot* de tempo em uma BS a ser menor que a máxima potência de saída.

Observa-se que a formulação apresentada pode ser estendida para acomodar simultaneamente múltiplos feixes ativos em uma BS, dividindo a potência de transmissão total pelo número de tais feixes.

5.3

Solução Proposta

Formula-se o problema de alocação de recursos com as Equações 5-8 e 5-9 a fim de minimizar o deficit de capacidade para todos os UEs atendidos pela RAN. Usa-se um critério de menor esforço baseado nas pontuações de utilidade para encontrar uma solução viável para atribuir os recursos para os UEs.

5.3.1

Pontuações de Utilidade

A meta do algoritmo de alocação de utilidade é maximizar o *throughput* de uma BS enquanto evita priorizar o atendimento de um UE em detrimento dos demais, considerando que cada UE possa ter uma capacidade alvo diferente. A seguir, definem-se pontuações de utilidade que descrevem o algoritmo de alocação de recursos proposto. É importante ressaltar que a modelagem deste e dos demais algoritmos descritos na Seção 2.6 é voltada para uma RAN com BSs capazes de *beamforming*.

5.3.1.1

Utilidade de um UE

Propõe-se o uso de uma abordagem usando o critério de menor esforço para alocar recursos e prover capacidade para todos os UEs. Primeiramente, refina-se a Equação (5-5), a utilidade $Y_{BW}(t, u)$ de se empregar um recurso de largura de banda no t -ésimo *slot* de tempo, para o u -ésimo UE, como

$$Y_{BW}(t, u) = \Omega(t, u) \log(1 + \text{SINR}(t, u)). \quad (5-10)$$

O SINR depende do CSI como na Equação (2-15) e, a princípio, UEs diferentes têm diferentes CSI. Consequentemente, quanto melhor a condição do enlace, maior é a utilidade em alocar recursos para o UE correspondente. Na Equação (5-10),

$$\Omega(t, u) = \frac{BW_{\min}(t, n_u, b_u)}{BW_{\text{need}}(t, u)}, \quad (5-11)$$

é a razão entre a menor banda de frequências mínima em um feixe n_u que atende ao u -ésimo UE, durante o *slot* de tempo t , e a banda de frequências requerida para atender u durante o *timeslot* t com a capacidade alvo. Observa-se que Y_{BW} é a densidade da capacidade mínima calculada para a largura de banda BW_{\min} e a largura de banda necessária BW_{need} .

Para calcular $BW_{\text{need}}(t, u)$, leva-se em conta a qualidade do enlace usando a Lei de Shannon, i.e.,

$$BW_{\text{need}}(t, u) = \frac{C_{\text{target}} - C(t-1, u)}{\log_2(1 + \text{SINR}(t, u))}, \quad (5-12)$$

$$C(t-1, u) = \sum_{\tau=1}^{t-1} C(\tau, n_{\tau,u}, b_{\tau,u}, u) \quad (5-13)$$

onde $C(t-1, u)$ é a capacidade alcançada pelo UE u até o *slot* anterior.

Adicionalmente, para calcular a quantidade mínima de recursos em frequência em um feixe, usa-se

$$BW_{\min}(t, n_u, b_u) = \nu \frac{BW}{|U(t, n_u, b_u)|}, \quad (5-14)$$

onde $U(t, n_u, b_u)$ é o conjunto de UEs atendido pelo b_u -ésimo feixe da n_u -ésima BS (atendendo o u -ésimo UE) durante o *slot* de tempo t . Assume-se que uma fração ν dos recursos é igualmente alocada entre todos os UEs atendidos por um feixe (permitindo todos os UEs permanecerem conectados à RAN). Portanto, $BW_{\min}(t, n_u, b_u)$ é o mesmo para todos os UEs atendidos por um feixe durante o *slot* de tempo t , e, quanto menor a quantidade de UEs atendidos por um feixe, maior é $BW_{\min}(t, n_u, b_u)$. A relação entre as bandas de frequência reservada, mínima e total é ilustrada na Figura 5.1.

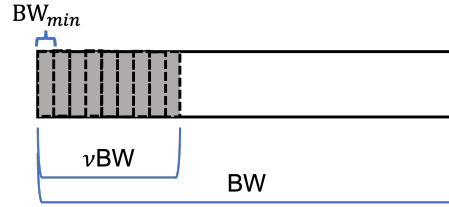


Figura 5.1: Representação da BW, νBW and BW_{\min} .

Vê-se que quanto maior o SINR, menor a quantidade de UEs em um feixe e menor a BW necessária, menor é o esforço. E, quanto menor o esforço, maior é o valor retornado pela Equação (5-10); caracterizando assim uma pontuação de menor esforço. A Figura 5.2 ilustra este aspecto. $Y_{BW}(t, u)$ estima a utilidade em alocar bandas de frequências $BW_{\text{need}}(t, u)$ para o u -ésimo UE durante o *slot* de tempo t . Esta é a definição que adotamos para utilidade de uma fatia de frequência.

5.3.1.2

Utilidade de um Feixe

Após o cálculo de utilidade dos recursos frequenciais (banda de frequência) para cada UE, pode-se calcular as utilidades dos feixes de uma BS através do somatório das utilidades dos UEs atendidos pelo feixe. Ou seja,

$$W_{\text{beam}}(t, n, b) = \sum_{u \in U(t, n, b)} Y_{BW}(t, u), \quad (5-15)$$

é a utilidade de alocar recursos para o b -ésimo feixe da n -ésima BS ($b \in \mathcal{B}_n$) no *slot* de tempo t .

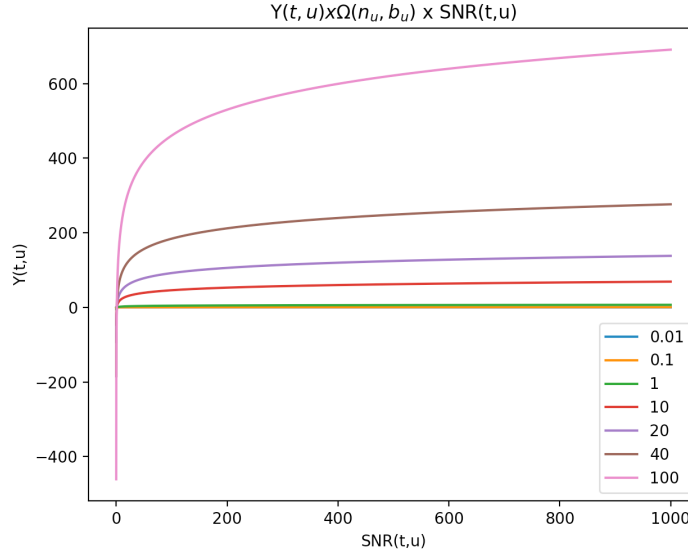


Figura 5.2: Utilidade de uma fatia de frequência $Y_{\text{BW}}(t, u)$ versus $\text{SINR}(t, u)$ (em escala linear) para diferentes valores de $\Omega(t, u)$.

5.3.1.3

Utilidade de uma BSs

A partir das pontuações de utilidade dos diferentes feixes em uma BS, Equação (5-15), define-se a utilidade de alocar recursos na n -ésima BS durante o slot de tempo t

$$W_{\text{BS}}(t, n) = \sum_{b \in \mathcal{B}_n} W_{\text{beam}}(t, n, b). \quad (5-16)$$

A seguir, discute-se como empregar as pontuações de utilidade apresentadas para as BSs, feixes e UEs para alocar os recursos de uma RAN 5G visando o atendimento justo (equânime) de uma dada demanda para todos os UEs.

5.3.2

Alocação de Recursos Usando a Utilidade

Propõe-se priorizar os UEs para os quais a utilidade de alocar recursos seja maior. O que faz com que os UEs com menores demandas faltantes e melhores condições de canal alcancem a capacidade alvo C_{target} prioritariamente. Com isso, pretende-se satisfazer a capacidade alvo para a maior quantidade de UEs. A partir da definição de $Y_{\text{BW}}(t, u)$, isso leva a atender primeiramente os UEs com melhores qualidades de enlace. Consequentemente, aloca-se a largura de banda de frequência \times fatias (slots) de tempo dependendo da qualidade do enlace.

Como explicado anteriormente, uma quantidade de recursos mínima $t_{\text{min}} \times \text{BW}_{\text{min}}$ é assegurada para todos os UEs. Propomos que BW_{min} dependa

do feixe, como mostrado na Equação (5-14).

Complementarmente, t_{\min} é a menor duração durante a qual um feixe permanece ativo. Isto é, dado que um feixe atende a pelo menos um UE, é garantido que este feixe, fique ativo por pelo menos t_{\min} (com $t_{\min} < T$). Assume-se que este é igual e fixo por toda a RAN.

Do acima exposto, resulta que, para o feixe b na BS n , i.e., $b \in \mathcal{B}_n$, no slot de tempo t , aloca-se

$$\Delta t(t, n, b) = \delta \left(t_{\min} + \frac{W_{\text{beam}}(t, n, b)}{W_{\text{BS}}(t, n)} (T - |\mathcal{B}_n| \times t_{\min}) \right), \quad (5-17)$$

slots de tempo ativos, em que $\delta = 1 - t/T$. Salienta-se que isto se aplica a um feixe somente se $\exists u | \text{CD}(t, u) \leq 0, \forall u \in \mathcal{U}_b$.

Se um feixe que atende a um UE u está ativo, o recurso de largura de banda de frequências reservado para este feixe é

$$\text{BW}(t, u) = \text{BW}_{\min} + \frac{Y_{\text{BW}}(t, u)}{W_{\text{beam}}(t, n_u, b_u)} (\text{BW} - |U(t, n_u, b_u)| \times \text{BW}_{\min}(t, n_u, b_u)). \quad (5-18)$$

A Figura 5.3 ilustra o processo. Há camadas no cálculo da utilidade: 1 – utilidade do UE $Y_{\text{BW}}(t, u)$, usando a Equação (5-10); 2 – utilidade do feixe $W_{\text{beam}}(t, n, b)$, usando a Equação (5-15); 3 – utilidade do setor $W_{\text{BS}}(t, n)$, usando a Equação (5-16). Após, no quarto passo, os $Y_{\text{BW}}(t, u)$, $W_{\text{beam}}(t, n, b)$ e $W_{\text{BS}}(t, n)$ ditam a alocação de recursos em tempo e frequência, através das Equações (5-17) e (5-18). No quinto passo, a capacidade alcançada utilizando a alocação de recursos em tempo-frequência é verificada, os coeficientes acima são atualizados no sexto passo e o processo é iterado.

O modelo assume uma potência de transmissão constante. Ao fim da alocação, recursos de tempo e frequência podem ficar sem uso. Se este for o caso, pode-se reduzir a potência de transmissão para aplicar os recursos não utilizados e empregar novamente o critério de menor esforço/utilidade na alocação dos recursos da RAN 5G. Isso permite alocar os recursos enquanto se economiza energia.

5.3.3

Alocação de RBs

Na frequência, usam-se as larguras de banda $\text{BW}(t, u)$ obtidas por meio da Equação (5-18), enquanto a alocação temporal depende dos tempos de ativação dos feixes na BS, que por sua vez depende da utilidade do feixe $W_{\text{beam}}(t, n, b)$ e de $\Delta t(t, n, b)$ calculado usando a Equação (5-17).

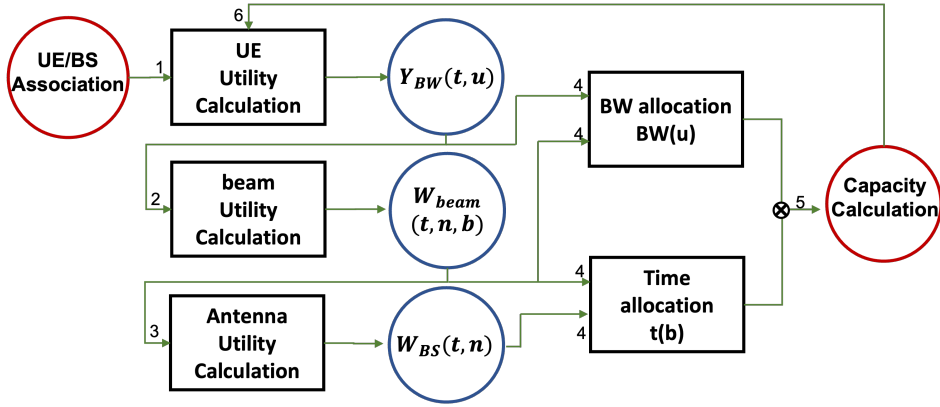


Figura 5.3: Diagrama de blocos da alocação de recursos baseada em utilidade.

A alocação ocorre em duas etapas: primeiramente, aloca-se t_{\min} para cada feixe ativo de BS; após, define-se uma função de probabilidade para os feixes ativos em cada BS, via

$$p_{n_b} = \frac{Y_{BW}(t, u)}{W_{\text{beam}}(t, n_u, b_u)}, \quad \text{com } p_{n_b} \leq 1 \quad (5-19)$$

$$P(n_b) = \sum_{b=1}^B p_{n_b} = 1, \quad (5-20)$$

que é uma distribuição não-uniforme. Para cada BS, sorteia-se um feixe n_b ativo em cada t . Esta estratégia garante que um feixe com pontuação de utilidade mais alta permaneça mais tempo ativado, beneficiando o conjunto de UEs melhor ranqueado a ele associado. Atualiza-se a alocação temporal de feixes, assim como a Equação (5-17), a cada alteração relevante na RAN – quando um UE entra ou sai, ou o estado de um UE muda de demandante para satisfeito.

5.4

Algoritmo de Alocação

O processo descrito neste capítulo, usando as grandezas definidas nas Equações (5-10) até (5-18), é mostrado no Algoritmo 5. O mesmo considera um quadro de T fatias temporais (empregamos 1 ms por fatia) e itera para $t = 1 \dots T$. Em cada *slot* de tempo, $Y_{BW}(t, u)$, $W_{\text{beam}}(t, n, b)$ e $W_{BS}(t, n, b)$ são calculadas para $\zeta(t, n, b)$ e $BW(t, u)$ a serem designados. O tempo ativo dos feixes $\Delta t(t, n, b)$ é somente atualizado quando ocorre uma alteração na rede (alteração no número de UEs ou feixes ativos, enquanto a largura de banda designada por UE é atualizada a cada *slot* de tempo).

O Algoritmo 5 apresenta o algoritmo de alocação de recursos proposto baseado em utilidade. Este algoritmo pode ser chamado na linha 15, "Alg. alocação de recursos" do Algoritmo 1 na Seção 2.9, para realizar a alocação de

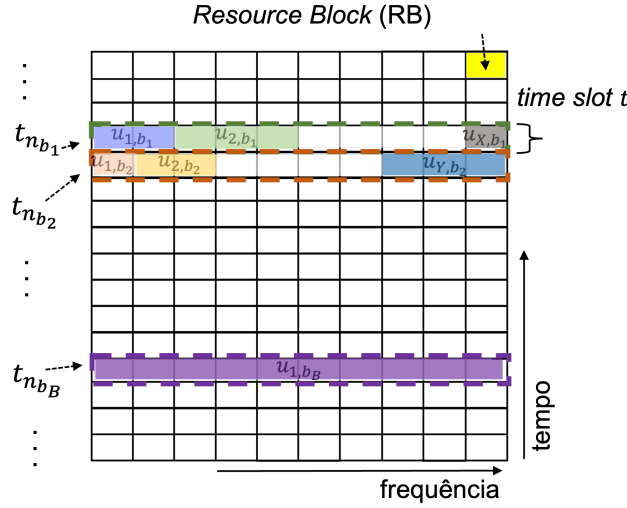


Figura 5.4: Exemplo da alocação de RBs por feixe e por usuário. t_{n_b} representa o tempo em que o b -ésimo feixe está ativo, definido em 5-19 e 5-17, no qual alocará larguras de banda de frequências para o UE u_b que atende por 5-18.

recursos usando $CD(t, u)$.

5.5

Desempenho do Algoritmo de Alocação Baseado em Utilidade

A fim de avaliar o desempenho do algoritmo de alocação de recursos baseado em utilidade proposto neste capítulo, faz-se a comparação de desempenho com os algoritmos de alocação de recursos (RR, *Best CQI* e PF; descritos na Seção 2.6) usando o simulador Sama. Como a alocação de recursos baseada em utilidade é desenhada para atender um dado C_{target} , empregam-se cenários eMBB. A configuração base usada nas simulações pode ser vista na Tabela 5.1.

Foram executadas simulações em 4 cenários: enlaces de descida e subida em configuração *simplex* e outros três cenários *duplex* usando TDD, com o fator de duplexação $r_{\text{duplex}} = 0,4, 0,5$ e $0,6$. Em todos os cenários, estabelece-se $U=500$ e $N=1, 2, \dots, 30$, e simula-se o atendimento de $C_{\text{target}} = 30$ Mbps nos enlaces de descida e de $C_{\text{target}} = 10$ Mbps nos enlaces de subida. Desta forma, têm-se dois cenários, um deles com três variantes: 2.A) *simplex* para *downlink* e *uplink*, 2.B) TDD com 40% UL e 60% DL, 2.C) TDD com 50% UL e 50% DL e 2.D) TDD com 60% UL e 40% DL.

5.5.1

Comparativo eMBB em *Simplex* - Cenário 2.A

Na Figura 5.5, pode-se observar que o algoritmo de alocação baseado em utilidade apresenta resultados superiores ao algoritmo RR e inferiores ao

Algoritmo 5: Cálculo de Utilidade e Alocação de Recursos**Require:** T , $\text{SINR}(t, u)$, $C(t-1, u)$, $\zeta(t, n, b)$, \mathcal{U} , \mathcal{B}

```

1: for  $1 \leq t \leq T_a$  do
2:   for  $u \in \mathcal{U}$  do
3:      $Y_{BW}(t, u) \leftarrow$  Usando Equação (5-10)
4:   end for
5:   for  $b \in \mathcal{B}$  do
6:      $W_{beam}(t, n, b) \leftarrow$  Usando Equação (5-15)
7:   end for
8:    $W_{BS}(t, n) \leftarrow$  Usando Equação (5-16)
9:   for  $u \in \mathcal{U}$  do
10:     $BW(t, u) \leftarrow$  Usando Equação (5-18)
11:   end for
12:   if update=VERDADEIRO then
13:     for  $b \in \mathcal{B}$  do
14:        $\Delta t(t, n, b) \leftarrow$  Usando Equação (5-17)
15:        $\zeta(t, n, b) \leftarrow$  Usando Equações (5-19) e (5-20)
16:     end for
17:   end if
18: end for
19: Return  $BW(t, u), \zeta(t, n, b)$ 

```

PF e *Best CQI* quando a RAN contém poucas BSs. O algoritmo proposto os supera a partir de 5 e 8 BS, respectivamente, nos enlaces de descida. O mesmo ocorre nos enlaces de subida, onde o algoritmo baseado em utilidade tem os melhores resultados, a partir de $N > 9$, se comparado ao PF, e melhores que o *Best CQI*, a partir de $N > 12$. Em ambos os casos, os algoritmos *Best CQI* e PF têm resultados inferiores para quantidades maiores de BSs. Isso acontece pela dificuldade dos algoritmos PF e BCQI em estimar de forma precisa o SINR conjuntamente com a alocação aleatória do algoritmo RR, que tem melhores resultados conforme a relação UE/BS diminui (existem mais BSs para atender aos UEs). Para grandes quantidades de BSs (maiores valores de N), os algoritmos RR e o proposto têm resultados semelhantes. Isso é explicado pela distribuição uniforme de UEs que, em conjunto com a determinação do arranjo de BSs via agrupamento (conforme descrito na Seção 2.4.5.2), faz com que os UEs se dividam entre as BSs de forma bastante uniforme e, conseqüentemente, a distribuição dos SINRs também o é.

Tabela 5.1: Parâmetros de Configuração da RAN eMBB - Cenários 2.A e 2.B.

Parâmetros da RAN	
Frequência central	3,5 GHz
Largura de banda	100 MHz (reutilizado em cada setor)
Número de BSs na RAN	Variável
Meta de Serviço da RAN	
C_{target} (Mbps)	[30, 10] [descida, subida]
Parâmetros da BS	
Altura da BS	30 m
Número de setores por BS	3
Apontamentos dos setores (ϕ, θ)	$\phi=(60^\circ, 180^\circ, 300^\circ), \theta=(0^\circ, 0^\circ, 0^\circ)$
Modelagem e Parâmetros dos Setores	
Potência de transmissão por setor	100 W
Arranjo da antena setorial	8 x 8 (espaçamento de $0,5\lambda$)
Ganho do arranjo de antena setorial	Conforme a Seção 2.4.3.2
Ganho do elemento do arranjo	5 dBi
Número de feixes	20 por antena
Modelagem e Parâmetros dos UEs	
Altura do UE	1,5 m
Potência de transmissão do UE	400 mW
Diagrama da antena do UE	omnidirecional
Ganho da antena do UE	0 dBi
Parâmetros de Simulação	
Variância do modelo de <i>Path-Loss</i>	6 dB
Duração do <i>slot</i> de tempo	1 ms
Duração da iteração T	1000 <i>slots</i> de tempo
Critério de Parada	
Teste de Mann-Whitney U em	C_u
Tamanho do lote	20 iterações
p -valor	0.05

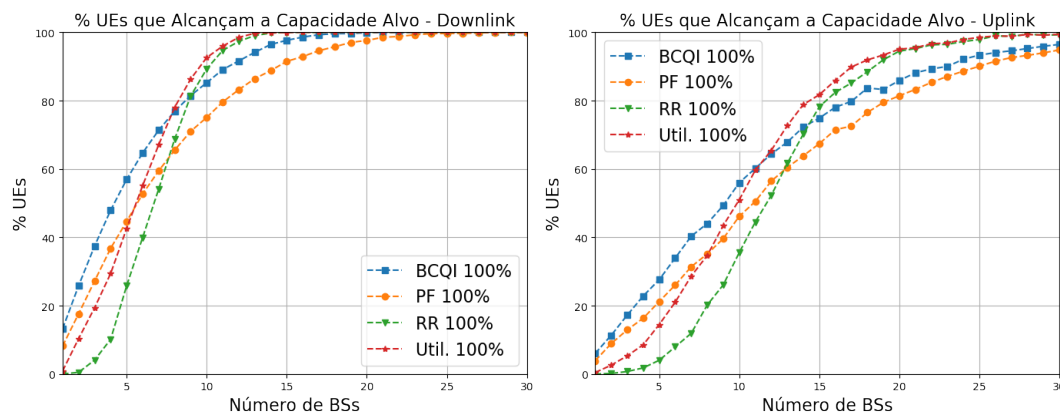


Figura 5.5: Comparativo de UEs que alcançam $C_{\text{target}}=30$ e 10 Mbps, na descida e na subida, respectivamente, para $N = 1, \dots, 30$, no cenário 2.A, empregando 100% do tempo para cada enlace *simplex* separadamente.

Na Figura 5.6, compara-se o *throughput* total da RAN conforme se aumenta o número de BSs. Os resultados mostram que o algoritmo proposto e o RR apresentam desempenhos superiores para maior quantidade de BSs e inferiores para menor quantidade de BSs quando comparados com os algoritmos PF e *Best CQI*. Esse comportamento se assemelha ao demonstrado na Figura 3.3, em que as curvas ligeiramente inferiores dos algoritmos PF e *Best CQI* se justificam pela dificuldade em estimar o SINR do canal, dada a sua variabilidade, e, conseqüentemente, a quantidade de recursos necessários, desperdiçando RBs na alocação.

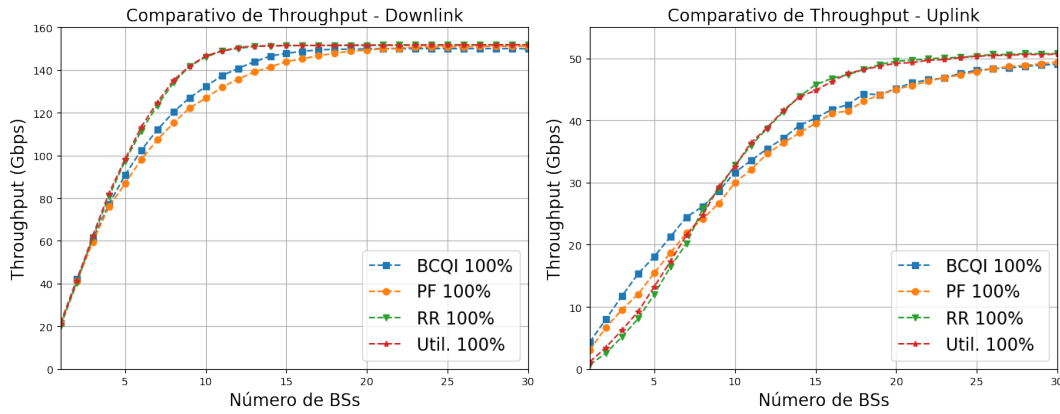


Figura 5.6: Comparativo de *throughput* da RAN para $N = 1, \dots, 30$ na subida e descida no cenário 2.A, empregando 100% do tempo para cada enlace *simplex* separadamente.

Na Figura 5.7, compara-se o *Fairness Index* conforme se aumenta o número de BSs que compõem a RAN. Os resultados são similares para os algoritmos PF e *Best CQI*, que são inferiores aos demais. Isso é esperado, dada a estratégia empregada, integralmente ou em parte, de priorizar canais com melhor CQI, sem restrições. O algoritmo proposto obtém resultados ligeiramente inferiores aos do RR, sendo cada vez mais próximos conforme o número de BSs aumenta. Esse resultado relaciona-se com os da Figura 5.5, que mostram que o algoritmo proposto, priorizando os recursos empregados pela BSs pela qualidade do canal e demanda dos UEs, obtém melhores resultados na quantidade de UEs que alcançam a meta de C_{target} em detrimento de um menor *Fairness Index*.

A Figura 5.8 mostra a dispersão da capacidade na descida para os UEs em função da distância entre cada UE e a BS associada. Observa-se que, com o algoritmo proposto, para $N \geq 10$, mais UEs atingem a capacidade alvo (C_{target}) do que com os demais algoritmos. A Figura 5.9 detalha o comportamento da estratégia proposta; onde, se observa que o algoritmo proposto tende a prover

maior capacidade para os UEs mais próximos às BSs associadas, cujos enlaces apresentam perdas de propagação menores.

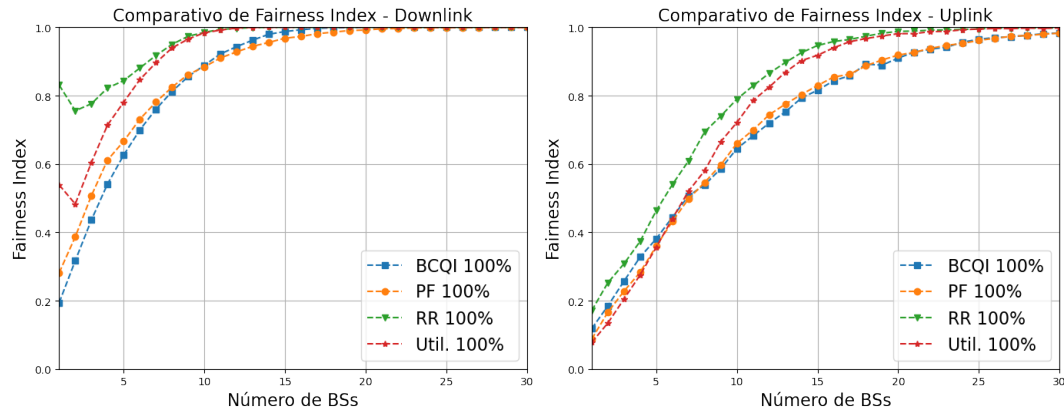


Figura 5.7: Comparativo de *fairness index* na descida e subida, considerando enlaces *simplex*, Cenário 2.A, considerando $N = 1, \dots, 30$.

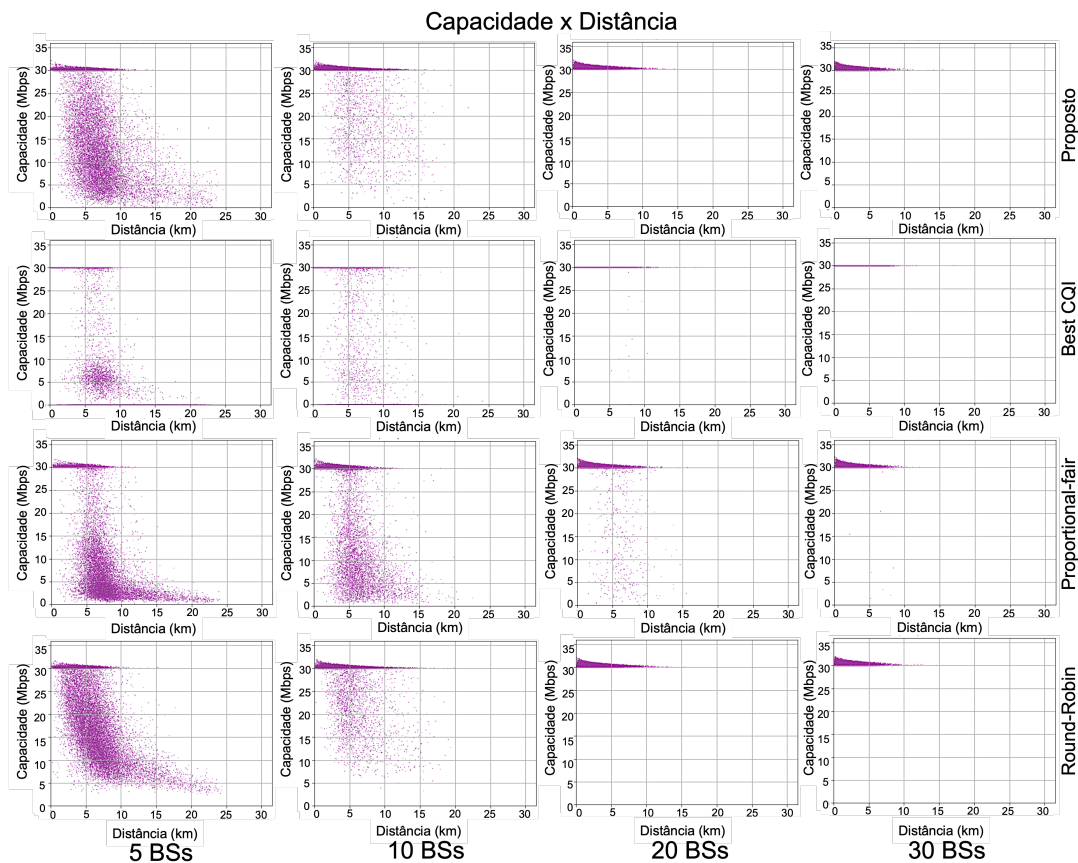


Figura 5.8: Gráficos de dispersão capacidade na descida \times distância para os quatro algoritmos de alocação; de cima para baixo, temos as dispersões para o algoritmo proposto (baseado em utilidade), o *Best CQI*, o PF e o RR; e, da esquerda para a direita varia-se a quantidade de BSs da RAN, com 5, 10, 20 e 30 BSs.

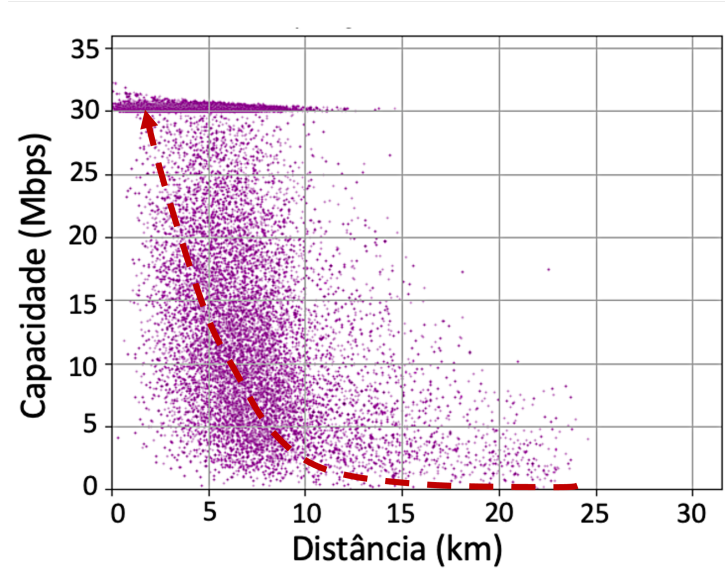


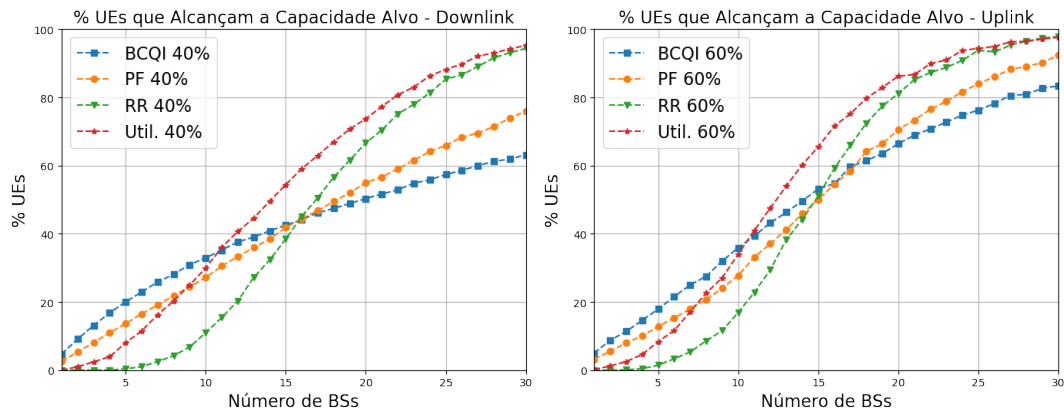
Figura 5.9: Dispersão da capacidade na descida \times distância para a estratégia de alocação baseada em utilidade para $N = 5$.

5.5.2

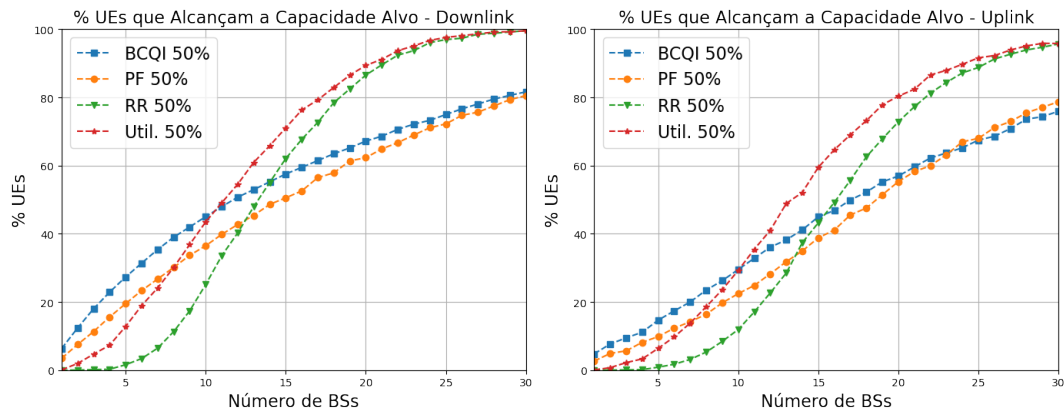
Comparativo eMBB em TDD - Cenário 2.B, 2.C e 2.D

Nesta seção, comparam-se os algoritmos de alocação RR, *Best CQI* e PF com o algoritmo proposto em uma RAN com configuração TDD com o fator de duplexação $r_{duplex} = 0,4, 0,5$, e $0,6$; que definem o Cenário 2.B, o Cenário 2.C e o Cenário 2.D, respectivamente.

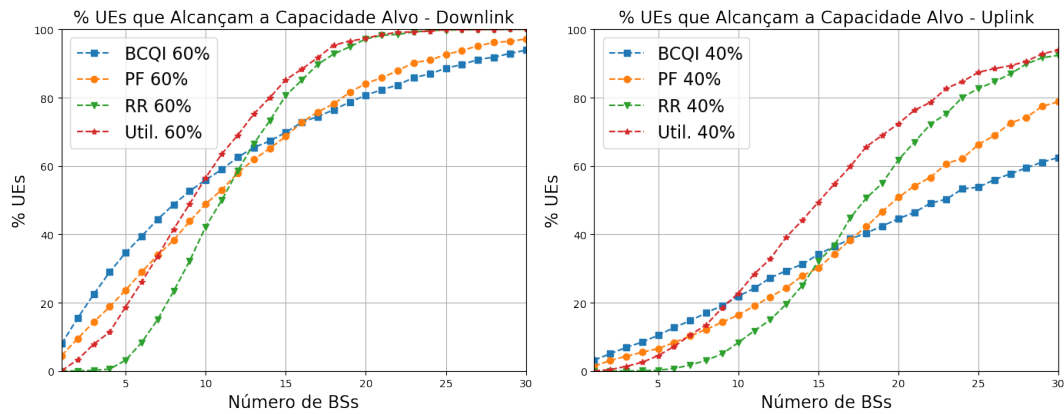
Atendimento da Meta de Capacidade As curvas apresentadas na Figura 5.10 comparam os atendimentos dos critérios $C_{target} = 30$ (DL) e 10 (UL) Mbps usando os diferentes algoritmos de alocação de recursos para as diferentes razões de subida/descida de TDD testadas. Elas mostram resultados similares aos encontrados no Cenário 1, Seção 5.5.1. O algoritmo de alocação baseado em utilidade apresenta resultados superiores no atendimento de UEs se comparado com o algoritmo RR e, conforme se aumenta a quantidade de UEs empregadas na RAN, o método proposto passa a ter melhores resultados do que o PF e o BCQI também. Pode-se observar ainda que o valor de N com o qual o algoritmo proposto se iguala ao demais varia com a porção do tempo empregado para descida ou subida.



Cenário 2.B: TDD com 40% para DL e 60% para UL



Cenário 2.C: TDD com 50% para DL e 50% para UL



Cenário 2.D: TDD com 60% para DL e 40% para UL

Figura 5.10: Comparativo de UEs que atingem $C_{\text{target}} = 30$ (DL) e 10 (UL) Mbps, $N = 1, \dots, 30$. De cima para baixo, tem-se os resultados para o Cenário 2.B, o Cenário 2.C e o Cenário 2.D.

Throughput A Figura 5.11 mostra o comparativo de *throughput* entre algoritmos de alocação de recursos conforme se aumenta o número de BSs, os comportamentos são consistentes com os resultados da Seção 5.5.1, do cenário A, onde se observa que o algoritmo proposto apresenta os melhores resultados na descida, na maioria dos casos. Na subida, o algoritmo proposto obtém resultados superiores ao RR quando há poucas BSs na RAN e supera os demais conforme esse número aumenta. Também pode-se observar, conforme esperado, que o *throughput* é menor conforme o tempo empregado em TDD para descida ou subida diminui. Conforme relatado anteriormente, o algoritmo BCQI apresenta os piores resultados pela dificuldade de se estimar o SINR futuro (gerando desperdício de recursos), além da restrição do Sama de se usar apenas 1 feixe ativo por instante de tempo.

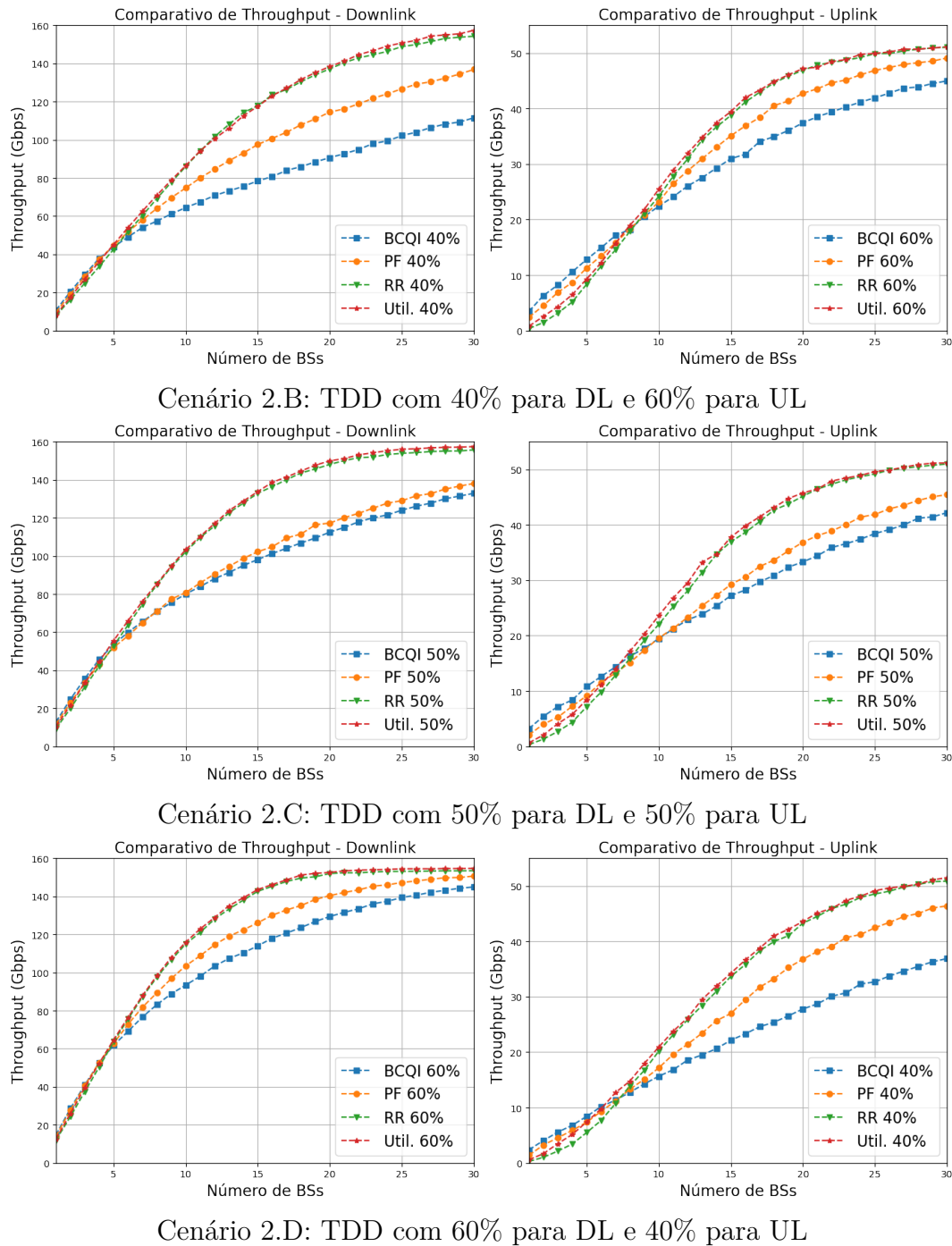


Figura 5.11: Comparativo de *throughput*, $N = 1, \dots, 30$. De cima para baixo, tem-se os resultados para o Cenário 2.B, o Cenário 2.C e o Cenário 2.D.

Fairness Index A Figura 5.12 mostra o comparativo entre algoritmos de alocação de recursos da evolução do *Fairness Index* conforme se aumenta o número de BSs e também são consistentes com os resultados da Seção 5.5.1. Observa-se que o *Fairness Index* do algoritmo de alocação de recursos baseado em utilidade se assemelha muito ao do RR conforme aumenta o número de BSs da RAN N . Ou seja, para menores valores de N , a diferença entre o algoritmo proposto e o RR é maior. Porém, o PF e o *Best CQI* apresentam *Fairness Index* inferiores aos algoritmos anteriores. Isto justifica o melhor atendimento do critério de capacidade C_{target} para menores valores de N , pois os algoritmos PF e BCQI, ao priorizarem UEs com melhores condições de canal em detrimento das demais, provocam esse comportamento (similar ao observado na Figura 5.7 na Seção 5.5.1).

5.6

Conclusões

O conjunto de resultados apresentados nesta seção (considerando o conjunto de cenários 1 e 2) permite observar que o algoritmo proposto apresenta excelente desempenho no fornecimento da capacidade alvo para os múltiplos UEs conectados à RAN, melhor do que algoritmo RR, na maioria dos casos; e que conforme a RAN cresce (emprega mais BSs), o desempenho supera o dos outros algoritmos comparados. Observa-se comportamento muito similar no *throughput*, com o algoritmo proposto apresentando os melhores resultados conforme N aumenta.

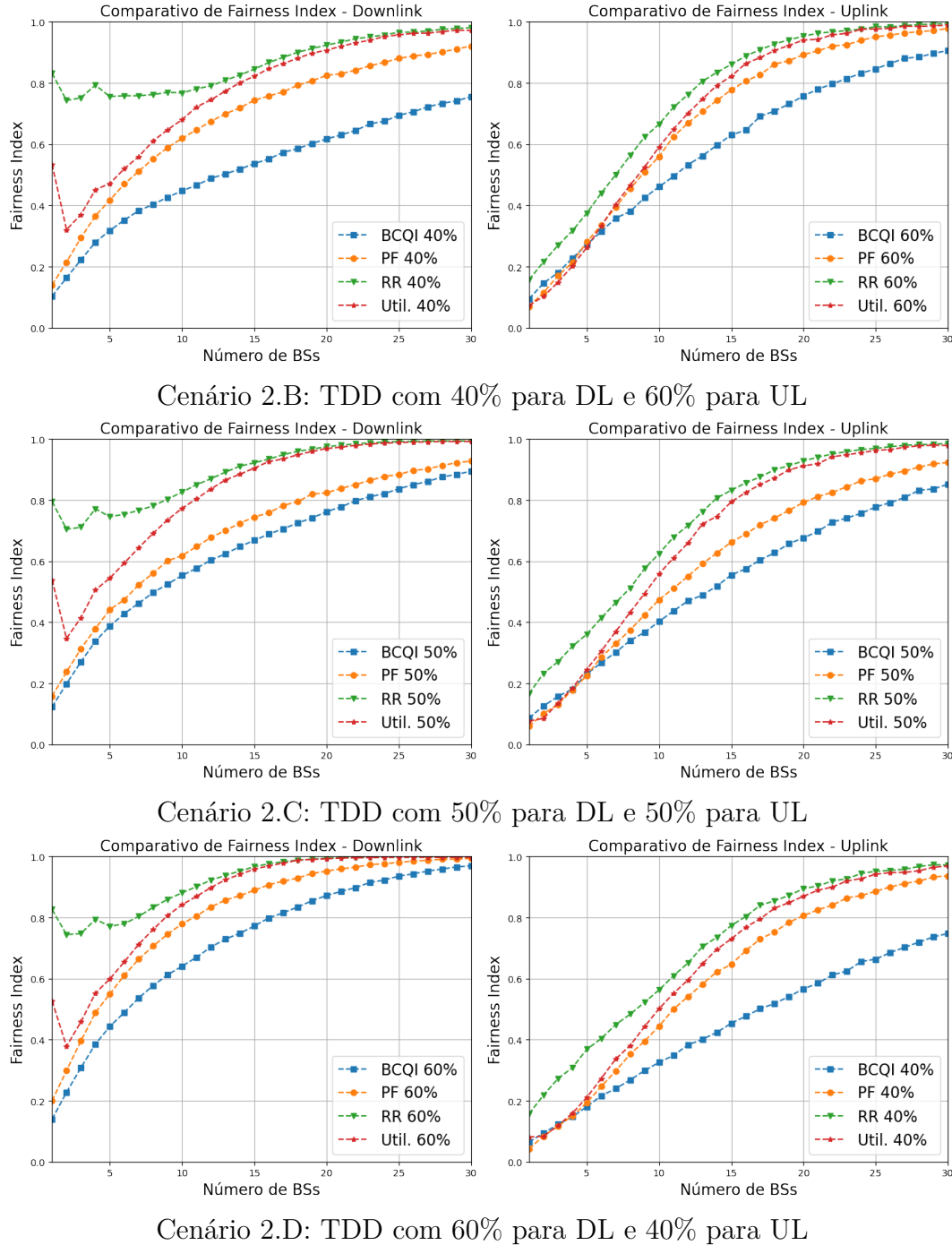


Figura 5.12: Comparativo de *Fairness Index*, $N = 1, \dots, 30$. De cima para baixo, tem-se os resultados para o Cenário 2.B, o Cenário 2.C e o Cenário 2.D.

Apresentou-se nesta tese contribuições para a análise e o projeto de redes de acesso por rádio (RANs). Primeiramente, para avaliar os resultados das metodologias propostas, desenvolveu-se um simulador, denominado Sama, que simula as associações entre UEs e BS e calcula a interferência, e realiza a distribuição dos recursos de tempo-frequência, aferindo a capacidade e a latência, dentre outros indicadores, dos enlaces de subida e descida entre os UEs e as BS que os servem. O Sama é capaz de simular técnicas como *beamforming* e RBs de tamanho variável, além de incorporar diversas automações para facilitar o processo de configuração e execução da simulação. Elaboraram-se diversos cenários e análises para demonstrar o uso do simulador em diversos casos de uso e avaliar as metodologias propostas.

Visando demonstrar casos de uso que podem ser estudados com o simulador Sama, simularam-se cinco cenários: um cenário *simplex* para subida e descida eMBB (separadamente), um cenário eMBB com TDD, variando a proporção do tempo para subida e descida, uma aplicação usando o mapa de uma municipalidade onde se deseja prover o serviço eMBB, um cenário URLLC e um cenário mMTC. Em todos os casos, variou-se a quantidade de BSs alocadas na ROI entre 1 e 20 e compararam-se as estratégias de alocação de recursos *Round-Robin*, *Best CQI* e *Proportional Fair*. Visualizou-se os dados que podem ser fornecidos pelo Sama, como curvas e gráficos de dispersão do SINR, tempos ativos da UE e da BS, capacidades atingidas, dentre outros.

Esses cenários permitiram avaliar a usabilidade e flexibilidade do simulador, ilustrando como o seu uso pode ser estendido. O Sama apresenta a conveniência de poder ser usado configurando um arquivo de parâmetros, sem a necessidade do usuário usar a linguagem de programação além do mínimo necessário para executá-lo. Os exemplos apresentados representam uma pequena fração das análises que podem ser feitas com a ferramenta desenvolvida neste trabalho. Novas funcionalidades podem ser adicionadas e complementar o código disponibilizado.

Neste trabalho, foram propostas metodologias para o posicionamento de estações transmissoras para redes de acesso por rádio. Apresentou-se um método heurístico baseado em aspectos de projeto de redes de radiodifusão, como altitude, cobertura provida e a interferência entre as estações base. Apresentou-se também um método baseado na técnica de clusterização das posições dos UEs para posicionar BSs em uma RAN 5G de maneira a atender

a demanda gerada por uma distribuição espacial específica de UEs.

Propôs-se um algoritmo de alocação de recursos para redes 5G baseado em uma pontuação de utilidade calculada a partir da condição do canal e da demanda do UE. A alocação de recursos proposta foi aplicada em uma RAN com compartilhamento de recursos de tempo, frequência e RF. Comparou-se a estratégia proposta com outras estratégias de alocação clássicas presentes na literatura.

Comparou-se o algoritmo de alocação de recursos proposto com os algoritmos *Round-Robin*, *Proportional Fair* e *Best CQI*. Foram simulados cinco cenários eMBB: um cenário *simplex* para os enlaces de subida e descida, simulados separadamente, e mais três cenários com TDD com diferentes proporções entre os enlaces de subida e descida. Dessas simulações, pôde-se concluir que a alocação de recursos proposta baseada em utilidade apresenta ótimos resultados, combinando um *Fairness Index* próximo ao do método *Round-Robin* (o melhor algoritmo dentre os que foram comparados nesse quesito) com o grau de satisfação dos UEs similar ou superior ao dos outros algoritmos de alocação testados. Na maioria dos casos, ao compararmos os resultados do *throughput* da RAN e da quantidade de UEs que atendem o critério de capacidade, o algoritmo proposto obtém bom desempenho, superando os demais, conforme a quantidade de BSs da rede aumenta. Estes resultados devem-se à maior flexibilidade do método proposto, com tempo de ativação de feixes e bandas alocadas dinamicamente conforme as informações de canal e demanda são trocadas entre UE e BS. Em conjunto, os resultados obtidos mostram a eficácia e a extensibilidade do simulador desenvolvido.

Para o simulador Sama, pode-se vislumbrar pontos para evolução e melhorias futuras. Pode-se implementar o uso de múltiplos feixes ativos simultaneamente por setor; o emprego de uma potência de transmissão de UE e BS arbitrária; um modelo de canal que considere UEs móveis durante um quadro e a alteração da posição dos mesmos durante a simulação; modelos de QoS mais complexos para os UEs, considerando modelos de tráfego baseados em distribuições lognormal, uniforme, exponencial, Beta, dentre outros, como em (82, 84); modelos de propagação adequados para diferentes faixas de frequência; modelos de propagação mais complexos considerando incerteza (85); e modelos de correlação espacial (86, 87). Além do acima exposto, o Sama ainda não suporta micro ou pico células operando em frequências mais altas que usam arranjos de antenas ultra densos (88) e seria interessante prover uma ferramenta que simule uma *Hetnet* (*Heterogeneous Network*), ou rede heterogênea, usando diversos tipos de BSs conjuntamente (89).

Consoante com a evolução do Sama, a metodologia de alocação que usa

clusters para posicionar as BSs na RAN pode ser aprimorada, com o estudo das superfícies de atendimento do critério de capacidade e, também, para o desenvolvimento de novas metodologias visando o atendimento de outros casos de uso e a aplicação da clusterização a partir de estruturas legadas (com centroides fixos aplicados no algoritmo).

Por fim, a estratégia de alocação baseada em utilidade, pode ser complementada fazendo com que, além da meta de capacidade, a meta de latência seja considerada para estendê-la a outros cenários além do eMBB, como o URLLC.

Referências bibliográficas

- 1 IBGE. **PNAD Contínua - Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios Contínua; Acesso à Internet e à televisão e posse de telefone móvel celular para uso pessoal**. 2019. Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/habitacao/17270-pnad-continua.html?=&t=resultados>>. Citado 5 vezes nas páginas 12, 45, 62, 73 e 74.
- 2 IBGE. **Censo Demográfico 2010**. 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/resultados.html>>. Citado 6 vezes nas páginas 12, 31, 45, 62, 73 e 74.
- 3 RODRIGUES, C. F. F.; LOVISOLO, L. Heuristic-based location allocation of single frequency network stations. **IEEE Transactions on Broadcasting**, v. 67, n. 1, p. 279–288, 2021. Citado 7 vezes nas páginas 20, 21, 25, 31, 84, 87 e 88.
- 4 RODRIGUES, C. F.; PERES, F. de A.; LOVISOLO, L. Receivers behavior in a isdb-t's single frequency network. In: **SET International Journal of Broadcast Engineering**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 44–54. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 21.
- 5 Operating Eurovision and Euroradio. TR24: SFN Frequency Planning and Network Implementation with Regard to T-DAB and DVB-T. **Geneva**. Citado na página 21.
- 6 LANZA, M. et al. Optimization of single frequency networks for dvb-t services using sa and pso. In: **Proceedings of the 5th European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP)**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 702–706. Citado 3 vezes nas páginas 21, 83 e 84.
- 7 ROSSI, F.; SMRIGLIO, S.; SASSANO, A. Models and algorithms for terrestrial digital broadcasting. **Annals of Operations Research**, v. 107, p. 267–283, 01 2001. Citado na página 21.
- 8 DOMINATO, L. B. et al. Tutorial on communication between access networks and the 5g core. **CoRR**, abs/2112.04257, 2021. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/2112.04257>>. Citado na página 22.
- 9 REED, J.; VASSILIOU, M.; SHAH, S. The role of new technologies in solving the spectrum shortage [point of view]. **Proceedings of the IEEE**, v. 104, n. 6, p. 1163–1168, 2016. Citado na página 22.
- 10 TEZERGIL, B.; ONUR, E. **Wireless Backhaul in 5G and Beyond: Issues, Challenges and Opportunities**. [S.l.: s.n.], 2021. Citado na página 22.
- 11 MARZETTA, T. L. et al. **Fundamentals of Massive MIMO**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 33.
- 12 MATHUR, H.; THANGAVEL, D. A survey on advanced multiple access techniques for 5g and beyond wireless communications. **Wireless Personal Communications**, v. 118, 05 2021. Citado na página 23.

- 13 XU, Y. et al. A survey on resource allocation for 5g heterogeneous networks: Current research, future trends, and challenges. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 23, n. 2, p. 668–695, 2021. Citado na página 23.
- 14 KITINDI, E. J. et al. Wireless network virtualization with sdn and c-ran for 5g networks: Requirements, opportunities, and challenges. **IEEE Access**, v. 5, p. 19099–19115, 2017. Citado na página 23.
- 15 POPOVSKI, P. et al. 5G wireless network slicing for eMBB, URLLC, and mMTC: A communication-theoretic view. **IEEE Access**, v. 6, p. 55765–55779, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 28.
- 16 ABDULLAH, D. M.; AMEEN, S. Y. Enhanced mobile broadband (embb): A review. **Journal of Information Technology and Informatics**, v. 1, n. 1, p. 13–19, Apr. 2021. Disponível em: <<https://www.qabasjournals.com/index.php/jiti/article/view/24>>. Citado 3 vezes nas páginas 24, 104 e 105.
- 17 LIU, D. et al. User association in 5g networks: A survey and an outlook. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, 09 2015. Citado 3 vezes nas páginas 25, 41 e 42.
- 18 HABAEBI, M. et al. Comparison between scheduling techniques in long term evolution. **International Islamic University Malaysia Engineering Journal**, v. 14, 04 2013. Citado 5 vezes nas páginas 25, 41, 46, 47 e 48.
- 19 RODRIGUES, C. F. F. **Sama Simulator**. 2022. <https://github.com/cfragoas/Sama_simulator>. Disponível em: <https://github.com/cfragoas/Sama_simulator>. Citado 3 vezes nas páginas 25, 50 e 56.
- 20 CAIRE, G.; SHAMAI, S. On the capacity of some channels with channel state information. **IEEE Transactions on Information Theory**, v. 45, n. 6, p. 2007–2019, 1999. Citado 3 vezes nas páginas 25, 29 e 105.
- 21 RODRIGUES, C. F. F. **Heuristic Coverage Simulator**. 2019. <<https://github.com/cfragoas/HeuCov>>. Disponível em: <<https://github.com/cfragoas/HeuCov>>. Citado 3 vezes nas páginas 25, 83 e 91.
- 22 MAMANE, A. et al. 5g heterogeneous networks: An overview on radio resource management scheduling schemes. In: **2019 7th Mediterranean Congress of Telecommunications (CMT)**. [S.l.: s.n.], 2019. p. 1–5. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 47.
- 23 JIANG, D. et al. A joint multi-criteria utility-based network selection approach for vehicle-to-infrastructure networking. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, PP, p. 1–15, 01 2018. Citado na página 27.
- 24 KOEHLER, M.; BENKNER, S. Design of an adaptive framework for utility-based optimization of scientific applications in the cloud. In: . [S.l.: s.n.], 2012. p. 303–308. ISBN 978-1-4673-4432-6. Citado na página 27.
- 25 CHEN, J. et al. Utility-based asynchronous flow control algorithm for wireless sensor networks. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 28, p. 1116–1126, 09 2010. Citado na página 27.

- 26 MÜLLER, M. et al. Flexible multi-node simulation of cellular mobile communications: the vienna 5g system level simulator. **EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking**, v. 2018, 09 2018. Citado na página 27.
- 27 RUPP, M.; SCHWARZ, S.; TARANETZ, M. **The Vienna LTE-Advanced Simulators: Up and Downlink, Link and System Level Simulation**. 1. ed. [S.l.]: Springer Singapore, 2016. (Signals and Communication Technology). ISBN 978-981-10-0616-6. Citado na página 27.
- 28 WANG, X.; CHEN, Y.; MAI, Z. A novel design of system level simulator for heterogeneous networks. In: **2017 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)**. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6. Citado na página 27.
- 29 NARDINI, G. et al. Simu5g—an omnet++ library for end-to-end performance evaluation of 5g networks. **IEEE Access**, v. 8, p. 181176–181191, 2020. Citado na página 27.
- 30 VIRDIS, A.; STEA, G.; NARDINI, G. Simulating lte/lte-advanced networks with simulte. In: _____. [S.l.: s.n.], 2016. ISBN 978-3-319-26470-7. Citado na página 27.
- 31 VARGA, A.; HORNIG, R. An overview of the omnet++ simulation environment. In: . [S.l.: s.n.], 2008. p. 60. Citado na página 27.
- 32 PATRICIELLO, N. et al. An e2e simulator for 5g nr networks. **Simulation Modelling Practice and Theory**, v. 96, p. 101933, 2019. ISSN 1569-190X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1569190X19300589>>. Citado na página 28.
- 33 MARTIRADONNA, S. et al. 5g-air-simulator: An open-source tool modeling the 5g air interface. **Computer Networks**, v. 173, p. 107151, 2020. ISSN 1389-1286. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1389128619317359>>. Citado na página 28.
- 34 PARK, G. et al. 5g k-simulator: Link level simulator for 5g. In: **2018 IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks (DySPAN)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–2. Citado na página 28.
- 35 BaKOWSKI, K.; RODZIEWICZ, M.; SROKA, P. System-level simulations of selected aspects of 5g cellular networks. In: **2015 International Symposium on Wireless Communication Systems (ISWCS)**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 711–715. Citado na página 28.
- 36 VERA, E. M. G. do N. et al. **Avaliação de Cenários 5G**. Tese (Doutorado) — ISCTE-Instituto Universitario de Lisboa (Portugal), 2018. Citado na página 28.
- 37 ROSSUM, G. V.; DRAKE, F. L. **Python 3 Reference Manual**. Scotts Valley, CA: CreateSpace, 2009. ISBN 1441412697. Citado na página 29.
- 38 ETSI TS 138 101-1. 5g; nr; user equipment (ue) radio transmission and reception; part 1: Range 1 standalone. **3GPP TS 38.101-1 version 16.5.0 Release 16**, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 42.

- 39 ITU-R F.1336-5. Reference radiation patterns of omnidirectional, sectoral and other antennas for the fixed and mobile services for use in sharing studies in the frequency range from 400 mhz to about 70 ghz. **International Telecommunication Union, Geneva.**, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 34.
- 40 3GPP - RAN 4. Specification 37.840: Study of radio frequency (RF) and electromagnetic compatibility (EMC) requirements for active antenna array system (AAS) base station. **3GPP Specification series, France.**, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 36, 37 e 38.
- 41 ITU-R P.2101-0. Modelling and simulation of IMT networks and systems for use in sharing and compatibility studies. **International Telecommunication Union, Geneva.**, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 36, 37 e 38.
- 42 VOOK, F. W.; GHOSH, A.; THOMAS, T. A. MIMO and beamforming solutions for 5G technology. In: **2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 38 e 39.
- 43 ZHANG, X. **LTE Optimization Engineering Handbook**. 1st. ed. [S.l.]: Wiley-IEEE Press, 2018. ISBN 1119158974. Citado na página 38.
- 44 ALOUINI, M.-S.; GOLDSMITH, A. Comparison of fading channel capacity under different csi assumptions. In: **Vehicular Technology Conference Fall 2000. IEEE VTS Fall VTC2000. 52nd Vehicular Technology Conference (Cat. No.00CH37152)**. [S.l.: s.n.], 2000. v. 4, p. 1844–1849 vol.4. Citado na página 40.
- 45 SUN, S. et al. Propagation path loss models for 5g urban micro- and macro-cellular scenarios. In: **2016 IEEE 83rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)**. [S.l.: s.n.], 2016. p. 1–6. Citado na página 40.
- 46 SUN, S. et al. Investigation of prediction accuracy, sensitivity, and parameter stability of large-scale propagation path loss models for 5g wireless communications. 03 2016. Citado na página 40.
- 47 GOLDSMITH, A. **Wireless Communications**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2005. Citado na página 40.
- 48 CAMPOS, R. S.; LOVISOLO, L. **RF positioning: fundamentals, applications, and tools**. [S.l.]: Artech House, 2015. Citado na página 42.
- 49 FERRAG, M. A. et al. Security for 4g and 5g cellular networks: A survey of existing authentication and privacy-preserving schemes. **Journal of Network and Computer Applications**, v. 101, p. 55–82, 2018. ISSN 1084-8045. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1084804517303521>>. Citado na página 42.
- 50 LOVISOLO, L.; SILVA, E. da. Uniform distribution of points on a hyper-sphere with applications to vector bit-plane encoding. **IEE Proceedings - Vision Image and Signal Processing**, p. 187 – 193, 07 2001. Citado na página 44.

- 51 NOLIYA, A.; KUMAR, S. Performance analysis of resource scheduling techniques in homogeneous and heterogeneous small cell lte-a networks. **Wireless Personal Communications**, v. 112, 06 2020. Citado na página 46.
- 52 GOMEZ, K. et al. A comparative study of scheduling disciplines in 5g systems for emergency communications. In: **1st International Conference on 5G for Ubiquitous Connectivity**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 40–45. Citado na página 46.
- 53 INZILLO, V.; RANGO, F. D.; QUINTANA, A. A. Mobility beamforming prediction and a round robin scheduling in a directional mac for manet. In: **2018 11th IFIP Wireless and Mobile Networking Conference (WMNC)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–7. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 65.
- 54 RAHEEM, R. et al. Performance evaluation of mobile users served by fixed and mobile femtocells in lte networks. **Journal of Networking Technology**, v. 7, p. 16–33, 03 2016. Citado 2 vezes nas páginas 48 e 73.
- 55 CHAN, P. W. C. et al. The evolution path of 4g networks: Fdd or tdd? **IEEE Communications Magazine**, v. 44, n. 12, p. 42–50, 2006. Citado na página 50.
- 56 DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKOLD, J. **4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband**. Elsevier Science, 2011. ISBN 9780123854902. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=DLbsq9GD0zMC>>. Citado na página 50.
- 57 HAYKIN, S. **Communication Systems**. 5th. ed. [S.l.]: Wiley Publishing, 2009. ISBN 0471697907. Citado na página 52.
- 58 JAIN, R.; CHIU, D.; HAWK, W. A quantitative measure of fairness and discrimination for resource allocation in shared computer systems. **CoRR**, cs.NI/9809099, 1998. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/cs/9809099>>. Citado na página 54.
- 59 MCKNIGHT, P. E.; NAJAB, J. Mann-whitney u test. In: _____. **The Corsini Encyclopedia of Psychology**. John Wiley & Sons, Ltd, 2010. p. 1–1. ISBN 9780470479216. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/9780470479216.corpsy0524>>. Citado 2 vezes nas páginas 55 e 56.
- 60 Wikipedia contributors. **YAML — Wikipedia, The Free Encyclopedia**. 2022. [Online; accessed 16-December-2022]. Disponível em: <<https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=YAML&oldid=1121852571>>. Citado na página 56.
- 61 CAI, X.; LANGTANGEN, H. P.; MOE, H. On the performance of the python programming language for serial and parallel scientific computations. **Sci. Program.**, v. 13, p. 31–56, 01 2005. Citado na página 57.
- 62 SIOMINA, I. Radio network planning and resource optimization : Mathematical models and algorithms for umts, wlans, and ad hoc networks. In: . [S.l.: s.n.], 2007. Citado na página 82.

- 63 DALE, S. Heuristics and biases: The science of decision-making. **Business Information Review**, v. 32, p. 93–99, 06 2015. Citado na página 85.
- 64 DU, D.; HWANG, F. **Computing In Euclidean Geometry (2nd Edition)**. World Scientific Publishing Company, 1995. (Lecture Notes Series On Computing). ISBN 9789814501637. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=_tHsCgAAQBAJ>. Citado na página 86.
- 65 DOUGHERTY, E. R. **Digital image processing methods**. [S.l.]: Marcel Dekker, Inc., 1994. Citado na página 86.
- 66 Citado na página 89.
- 67 ITU-R P.1546-1. Method for point-to-area predictions for terrestrial services in the frequency range 30 MHz to 3000 MHz. **International Telecommunication Union, Geneva.**, 2003. Citado na página 90.
- 68 RODRIGUES, C. F. F.; LOVISOLO, L.; PERES, F. d. A. Receivers behavior in a isdb-t's single frequency network. **SET International Journal of Broadcast Engineering**, v. 2, p. 44–54, 07 2016. Citado na página 91.
- 69 WANG, S. et al. **Wireless Communication Network Technology And Evolution**. World Scientific Publishing Company, 2022. ISBN 9789811245077. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=aQhqEAAAQBAJ>>. Citado na página 93.
- 70 AGGARWAL, C.; REDDY, C. **DATA CLUSTERING Algorithms and Applications**. [S.l.: s.n.], 2013. Citado 3 vezes nas páginas 94, 95 e 96.
- 71 KAPTEYN, A. Utility and economics. **De Economist**, v. 133, p. 1–20, 01 1985. Citado na página 102.
- 72 SANDRONI, P. **Dicionário de economia do século XXI**. Record, 2016. ISBN 9788501094261. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=yCDfCwAAQBAJ>>. Citado na página 102.
- 73 RAPPA, M. A. The utility business model and the future of computing services. **IBM Systems Journal**, v. 43, n. 1, p. 32–42, 2004. Citado na página 102.
- 74 KOKKU, R. et al. Nvs: A substrate for virtualizing wireless resources in cellular networks. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 20, n. 5, p. 1333–1346, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 102 e 104.
- 75 SCHWARZ, S.; MEHLFUHRER, C.; RUPP, M. Throughput maximizing multiuser scheduling with adjustable fairness. In: **2011 IEEE International Conference on Communications (ICC)**. [S.l.: s.n.], 2011. p. 1–5. Citado na página 103.
- 76 LAN, T. et al. An axiomatic theory of fairness in network resource allocation. In: **2010 Proceedings IEEE INFOCOM**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–9. Citado na página 103.

- 77 LI, L.; SHAO, W.; ZHOU, X. A flexible scheduling algorithm for the 5th-generation networks. **Intelligent and Converged Networks**, v. 2, n. 2, p. 101–107, 2021. Citado na página 103.
- 78 GUO, T.; SUÁREZ, A. Enabling 5G RAN Slicing With EDF Slice Scheduling. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 68, n. 3, p. 2865–2877, 2019. Citado na página 104.
- 79 WU, C. et al. Analysis of edf scheduling for wireless sensor-actuator networks. In: **2014 IEEE 22nd International Symposium of Quality of Service (IWQoS)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 31–40. Citado na página 104.
- 80 RAVIV, L.-O.; LESHEM, A. Maximizing service reward for queues with deadlines. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 26, n. 5, p. 2296–2308, 2018. Citado na página 104.
- 81 PEHA, J.; TOBAGI, F. Cost-based scheduling and dropping algorithms to support integrated services. **IEEE Transactions on Communications**, v. 44, n. 2, p. 192–202, 1996. Citado na página 104.
- 82 NAVARRO-ORTIZ, J. et al. A survey on 5g usage scenarios and traffic models. **IEEE Communications Surveys Tutorials**, v. 22, n. 2, p. 905–929, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 104 e 125.
- 83 MELO, Y. V. L. et al. Evaluation of utility-based adaptive resource and power allocation for real time services in ofdma systems. In: **2014 International Telecommunications Symposium (ITS)**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 1–5. Citado na página 107.
- 84 3GPP TR 38.913 R14. Study on scenarios and requirements for next generation access technologies. **ETSI, France.**, 2017. Citado na página 125.
- 85 HAENGGI, M. Link modeling with joint fading and distance uncertainty. In: **2006 4th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks**. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–6. Citado na página 125.
- 86 PESSOA, A. M. et al. A spatially consistent gaussian process for dual mobility in the 3d space. **IEEE Wireless Communications Letters**, v. 9, n. 11, p. 1803–1807, 2020. Citado na página 125.
- 87 PESSOA, A. M. et al. A positive semidefinite autocorrelation function for modeling 3d gaussian processes. **IEEE Transactions on Vehicular Technology**, v. 70, n. 2, p. 1941–1945, 2021. Citado na página 125.
- 88 GE, X. et al. 5g ultra-dense cellular networks. **IEEE Wireless Communications**, v. 23, 12 2015. Citado na página 125.
- 89 DHILLON, H. S.; KOUNTOURIS, M.; ANDREWS, J. G. Downlink MIMO hetnets: Modeling, ordering results and performance analysis. **IEEE Transactions on Wireless Communications**, v. 12, n. 10, p. 5208–5222, 2013. Citado na página 125.

90 GIBSON, J. **Mobile Communications Handbook**. CRC Press, 2017. (Electrical Engineering Handbook). ISBN 9781138072442. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=i3utswEACAAJ>>. Citado 2 vezes nas páginas 136 e 137.

91 BERRY, F. et al. **Introduction to Wireless Systems**. Pearson Education, 2008. ISBN 9780132797221. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=JXvO6ceY-uEC>>. Citado na página 137.

8 Apêndice

8.1 SISO e MIMO

Em um sistema SISO, ou *Single-Input Single-Output*, a comunicação se dá entre uma única antena na transmissão e uma única antena na recepção. Sistemas de telecomunicações contemporâneos podem explorar, além de diversidade no tempo e frequências (ver Seções 2.5 e 2.6), a diversidade espacial utilizando sistemas SISO, ou *Multiple-Input Multiple-Output*. Isso traz diversos benefícios em comparação com os sistemas SISO embora envolva uma maior complexidade. A Figura 8.1 ilustra os quatro paradigmas da transmissão e recepção usados nos sistemas de transmissão atuais.

Em um sistema SISO através de um canal com desvanecimento plano e sujeito a ruído Gaussiano aditivo, um canal AWGN (*Additive White Gaussian*

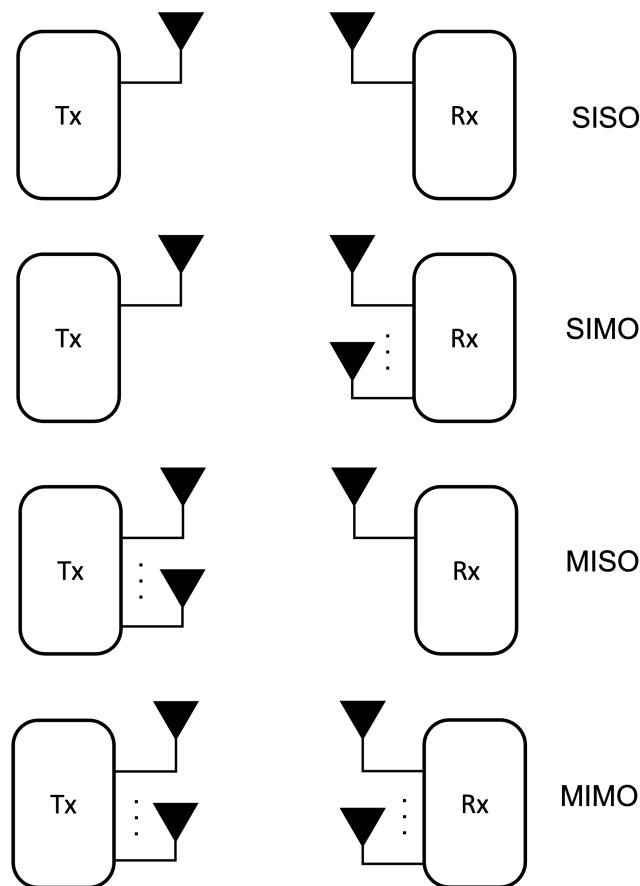


Figura 8.1: Ilustração e comparativo dos sistemas SISO (*Single-Input Single-Output*), SIMO (*Single-Input Multiple-Output*), MISO (*Multiple-Input Single-Output*) e MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*).

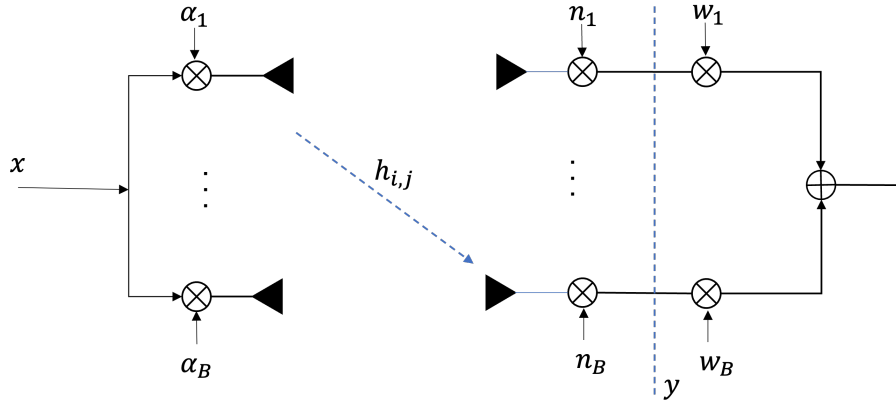


Figura 8.2: Diagrama de um canal MIMO para um sistema com *beamforming*. Com α sendo o vetor de precodificação e \mathbf{w} o vetor de combinação.

Noise) o sinal recebido no instante k é $y(k) = hx(k) + n(k)$, com onde $x(k)$ é o sinal transmitido, $n = N(0, \sigma^2)$ o ruído e h (90) o ganho de canal. A razão sinal-ruído, SNR, em função h é

$$\text{SNR} = \frac{\mathbb{E}\{|x(k)|^2\}}{\mathbb{E}\{|n(k)|^2\}} |h^2| = \frac{P_t}{\sigma^2} |h^2|, \quad (8-1)$$

onde P_t é a potência média transmitida. A Capacidade do canal de Shannon é

$$C(h) = \log_2(1 + \text{SNR}) = \log_2 \left(1 + \frac{P_t}{\sigma^2} |h^2| \right) \quad (8-2)$$

Já em um canal MIMO em visada direta, o sinal recebido pode ser escrito na forma $\mathbf{y}(k) = \mathbf{H}\mathbf{x}(k) + \mathbf{n}(k)$, onde $\mathbf{x}(k) = [x_1(k), x_2(k), \dots, x_n(k)]^T$ é o símbolo transmitido no instante k pela j -ésima antena, o vetor $\mathbf{y}(t) = [y_1(k), y_2(k), \dots, y_n(k)]$ representa as saídas das B antenas de recepção, e $\mathbf{n}(t) = [n_1(k), n_2(k), \dots, n_n(k)]$ é o vetor de amostras de ruído (90). Os elementos da matriz de canal \mathbf{H} correspondem aos ganhos de canal entre a j -ésima antena transmissora e a i -ésima antena receptora. A Equação (8-2) permite o ranqueamento dos elementos da matriz de canal (a quantidade de autovalores diferentes de zero) \mathbf{H} e a obtenção da correlação entre os seus elementos.

Para sistemas com *beamforming*, conforme ilustrado na Figura 8.2, com α como o ganho do arranjo de *beamforming*, define-se o vetor recebido para o caso particular do uso de um único feixe.

$$y(k) = \mathbf{H}\alpha x(k) + \mathbf{n}(k), \quad (8-3)$$

com a sendo o ganho do sistema de *beamforming* (90). E, a partir desta expressão, pode-se chegar a relação sinal-ruído máxima de um sistema MIMO

$$\text{SNR}_{\max} = \frac{P_t}{\sigma^2} \lambda_{\max}, \quad (8-4)$$

com λ_{\max} sendo o maior autovalor de $\mathbf{H}^H \mathbf{H}$ (o sobrescrito H refere-se à Hermitiana), o autovalor que maximiza (8-4), o ganho do canal MIMO (90). A capacidade de um sistema MIMO (SISO via MIMO) com *beamforming* é

$$C(\mathbf{H}) = \log_2 (1 + \text{SNR}) = \log_2 \left(1 + \frac{P_t}{\sigma^2} \lambda_{\max} \right), \quad (8-5)$$

com $C(\mathbf{H})$ em bits/s/Hz.

8.2

Antenas da Estação Rádio Base

Usualmente, as BSs, ou gNB, usam antenas setoriais, dividindo a área de cobertura em regiões angulares (setores) conforme os ângulos de abertura das antenas que provêm a cobertura (91). Desta forma, aumenta-se a capacidade, ao aumentar o ganho das antenas na direção dos UEs, usando antenas mais diretivas. Com isso, além de diminuir a interferência inter-celular, devido à geração de diagramas de radiação mais diretivos, divide-se melhor os recursos de rede, podendo-se usar os mesmos recursos de tempo e frequência em cada setor com menor interferência.

Nos sistemas atuais, para usar a tecnologia MIMO (*Multiple Input Multiple Output*), adota-se o AAS (*Active Antenna System*), que pode alterar o diagrama de radiação de uma antena formada como o arranjo de elementos irradiantes (em uma ou duas dimensões) ativamente, conforme a necessidade de cobertura e/ou alocação de recursos. Um diagrama esquemático dos componentes de um AAS é mostrado na Figura 8.3. Neste caso, usa-se, conjuntamente com o arranjo de elementos irradiantes, um ou múltiplos transceptores ligados à rede de acesso por rádio.

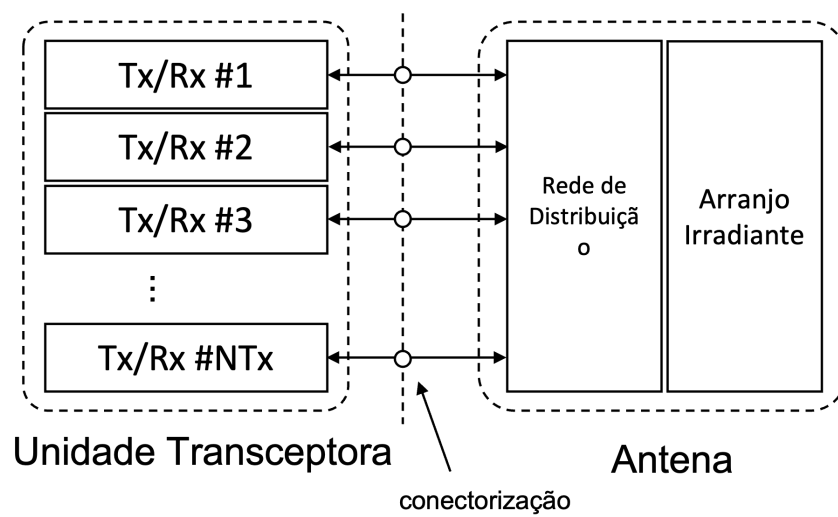


Figura 8.3: Desenho esquemático do conjunto transceptor e antena de um sistema MIMO usando AAS.