



UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
TELECOMUNICAÇÕES

MARCOS MYNSSEM COUTO

Planejamento da cobertura rádio de um  
sistema de comunicações críticas para a cidade  
de Niterói

NITERÓI

2023

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E DE  
TELECOMUNICAÇÕES

MARCOS MYNSSEM COUTO

# Planejamento da cobertura rádio de um sistema de comunicações críticas para a cidade de Niterói

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações. Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

Orientador:

Prof. Dr. Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos

Coorientador:

Prof. Dr. Alberto Gaspar Guimarães

NITERÓI

2023

Ficha catalográfica automática - SDC/BEE  
Gerada com informações fornecidas pelo autor

C871p Couto, Marcos Mynssem  
Planejamento da cobertura rádio de um sistema de  
comunicações críticas para a cidade de Niterói / Marcos  
Mynssem Couto. - 2023.  
125 f.: il.

Orientador: Pedro Vladimir Gonzalez Castellanos.  
Coorientador: Alberto Gaspar Guimarães.  
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense,  
Escola de Engenharia, Niterói, 2023.

1. Segurança pública. 2. Comunicação crítica. 3.  
Planejamento rádio. 4. LTE. 5. Produção intelectual. I.  
Castellanos, Pedro Vladimir Gonzalez, orientador. II.  
Guimarães, Alberto Gaspar, coorientador. III. Universidade  
Federal Fluminense. Escola de Engenharia.IV. Título.

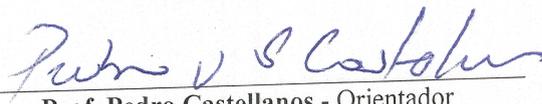
CDD - XXX

MARCOS MYNSSEM COUTO

PLANEJAMENTO DA COBERTURA RÁDIO DE UM SISTEMA DE  
COMUNICAÇÕES CRÍTICAS PARA A CIDADE DE NITERÓI

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para a Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações.  
Área de concentração: Sistemas de Telecomunicações.

BANCA EXAMINADORA



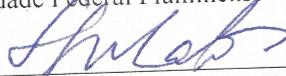
**Prof. Pedro Castellanos** - Orientador  
Universidade Federal Fluminense - UFF



**Prof. Dr. Alberto Gaspar Guimarães** - Coorientador  
Universidade Federal Fluminense - UFF



**Prof. Dr. Victor Fernandes**  
Universidade Federal Fluminense - UFF



**Profa. Dra. Leni Joaquim de Matos**  
Universidade Federal Fluminense - UFF



**Prof. Dr. Carlos V. Rodriguez Ron**  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - PUC-Rio

Niterói  
(fevereiro/2023)

*À minha família*

# Agradecimentos

Em primeiríssimo lugar, eu agradeço ao meu maior apoio: a minha mãe Paula Fernanda dos Santos Mynssem por sempre (indiscutivelmente sempre) estar ao meu lado em todas as situações de angústia, dúvida, medo, cansaço, desmotivação, assim como nos momentos de alegria, confiança, esperança e animação. Obrigado por ser meu maior exemplo na vida, por ser uma mulher forte e independente, que buscou diariamente tornar os dias dos seus filhos os melhores possíveis apesar de todos os obstáculos.

Quero agradecer também ao meu querido irmão Rafael Mynssem que não se conteve em ser só meu irmão, mas como também uma figura paterna na construção do meu caráter e que, sem sombra de dúvidas, sem seu apoio eu não estaria escrevendo esse agradecimento. Você é um grande homem!

Um agradecimento em especial à minha querida avó Edilza Maria pela grandiosa doçura e por seu sempre presente sorriso nas situações mais adversas.

Não existe a menor condição de eu escrever estes agradecimentos sem que eu lembrasse do meu amado avô José Paulo Mynssem que literalmente foi o melhor homem que eu já conheci. Tive sorte de poder crescer com seu exemplo ao meu lado. Queria muito poder te abraçar.

Agradeço à Prefeitura de Niterói que através da Fundação Euclides da Cunha de Apoio Institucional à UFF financiou com recursos do projeto FEC 4457, Edital PDPA-FEC/Prefeitura de Niterói este trabalho.

Por último, mas não menos importante, aos meus orientadores, em que sem seus auxílios eu não seria capaz de escrever este trabalho. Agradeço pela dedicação e pela disponibilização do tempo em que poderia estar com a sua família, porém optou em me ajudar a completar esse trabalho de final de mestrado.

*Marcos Mynssem Couto*

*“O preço da liberdade é a eterna vigilância.”*

*Thomas Jefferson*

# Resumo

Neste trabalho apresenta-se uma proposta de planejamento rádio em 4G/LTE, no qual são estabelecidas localidades no município de Niterói para a instalação de eNodeBs, que irão proporcionar cobertura, com capacidade de transmissão de dados adequada, para um *Sistema de Comunicações Críticas* (SCC) privado a ser implantado na cidade em apoio a agências estatais que atuam na segurança pública e na contenção de danos após desastres. É feito um uso extensivo do *software* de simulação computacional Atoll/Forsk para a definição da distribuição das eNodeBs, e para um estudo e análise de atendimento, por parte da rede proposta, da demanda de tráfego prevista no uso do SCC. São realizadas simulações de Monte Carlo de uso do sistema, considerando situações de rotina, eventos públicos de grande aglomeração, e ocorrências inopinadas de alta gravidade, obtendo-se resultados comparativos entre o tráfego demandado e a capacidade do SCC.

**Palavras-chave:** Segurança Pública, Comunicação Crítica, Planejamento Rádio, LTE.

# Abstract

This work presents a proposal for radio planning employing 4G/LTE technology, in which locations are established in the city of Niterói for the installation of eNodeBs, which will provide coverage, with adequate data transmission capacity, for a private *Critical Communication System* (CCS) to be implemented in support of state agencies that work in public safety and disaster relief. Extensive use is made of the Atoll/Forsk, a computational simulation platform, for the definition of the distribution of eNodeBs, and for a study and analysis of absorption, by the proposed network, of the expected traffic demand in the use of the CCS. Monte Carlo simulations of the system use are carried out, considering routine situations, public events of great crowding, and unannounced occurrences of high severity, obtaining comparative results between the traffic demanded and the capacity of the CCS.

**Keywords:** Public Protection, Critical Communications, Radio Planning, LTE.

# Lista de Figuras

2.1	Evolução das gerações de sistemas de comunicações móveis [12]. . . . .	7
2.2	Representação de células em formato hexagonal. . . . .	7
2.3	Tipos de células. . . . .	8
2.4	Duplexação: FDD e TDD [13] . . . . .	9
2.5	Modelo para cálculo da perda por difração por gume de faca. . . . .	11
2.6	Arquitetura da rede LTE [44]. . . . .	19
2.7	Camadas de protocolos na interface rádio do LTE [51]. . . . .	20
2.8	Estrutura e mapeamento dos canais LTE presentes no <i>downlink</i> e <i>uplink</i> . .	21
2.9	Estrutura dos blocos de recursos nos domínios do tempo e da frequência para prefixo cíclico normal. . . . .	22
2.10	Exemplo de alocação de recursos no UL [56]. . . . .	24
2.11	Método de alocação de frequência ( <i>Soft Fractional Frequency Reuse</i> ) para sistemas celulares. . . . .	29
2.12	Evolução dos padrões de serviços 3GPP de missão crítica [66]. . . . .	32
3.1	Processo de planejamento da rede rádio [77]. . . . .	35
3.2	Ganhos e perdas em um sistema rádio sem fio. . . . .	36
3.3	Uma célula com melhor cobertura de <i>downlink</i> do que o <i>uplink</i> [82]. . . . .	40
3.4	Fluxograma geral do planejamento de capacidade. . . . .	42
4.1	Levantamento das áreas prioritárias para cobertura de sinal em fase inicial.	49
4.2	Caminho Niemeyer, carnaval 2018 . . . . .	51
4.3	Vila Ipiranga, Fonseca. . . . .	53
4.4	Morro do Estado. . . . .	53

---

4.5	Dispositivos (UEs) utilizados na RCC. . . . .	54
5.1	Sequência de etapas na simulação da rede LTE pelo Atoll. . . . .	59
5.2	Proposta de localização das antenas. . . . .	61
5.3	Exemplo de mapa de terreno digital. . . . .	63
5.4	Análise pontual do perfil de terreno. . . . .	64
5.5	Fluxograma da proposta de metodologia de dimensionamento rádio de uma rede LTE. . . . .	66
6.1	Comparação da perda pelo modelo Okumura-Hata. . . . .	69
6.2	Cobertura parcial (27,1%) do município de Niterói. . . . .	70
6.3	Cobertura por SINR PDSCH. . . . .	71
6.4	Cobertura por SNR PUSCH. . . . .	71
6.5	Regiões de borda das células. . . . .	72
6.6	Vazão demandada e entregue em rotina (Centro) 5+5MHz: a) <i>Downlink</i> (DL) e b) <i>Uplink</i> (UL). . . . .	73
6.7	Histograma da carga de tráfego em rotina (Centro) 5+5MHz: a) DL e b) UL. . . . .	73
6.8	Vazão demandada e entregue em rotina (Barreto) 5+5MHz: a) DL e b) UL. . . . .	74
6.9	Histograma da carga de tráfego em rotina (Barreto) 5+5MHz: a) DL e b) UL. . . . .	74
6.10	Vazão demandada e entregue em rotina (Fonseca) 5+5MHz: a) DL e b) UL. . . . .	75
6.11	Histograma da carga de tráfego em rotina (Fonseca) 5+5MHz: a) DL e b) UL. . . . .	75
6.12	Vazão demandada e entregue em rotina (Icaraí) 5+5MHz: a) DL e b) UL. . . . .	75
6.13	Histograma da carga de tráfego em rotina (Icaraí) 5+5MHz: a) DL e b) UL. . . . .	76
6.14	Vazão demandada e entregue em rotina (Piratininga – CISP) 5+5MHz: a) DL e b) UL. . . . .	76
6.15	Histograma da carga de tráfego em rotina (Piratininga – CISP) 5+5MHz: a) DL e b) UL. . . . .	76

---

6.16	Vazão demandada e entregue em rotina (Piratininga – Praia) 5+5MHz: a) DL e b) UL. . . . .	77
6.17	Histograma da carga de tráfego em rotina (Piratininga – Praia) 5+5MHz: a) DL e b) UL. . . . .	77
6.18	Localização da área – Caminho Niemeyer . . . . .	78
6.19	Vazão demandada e entregue em Evento público de grande impacto – Caminho Niemeyer 5+5MHz: a) DL e b) UL. . . . .	79
6.20	Histograma da carga de tráfego em Evento público de grande impacto – Caminho Niemeyer 5+5MHz: a) DL e b) UL. . . . .	79
6.21	Vazão demandada e entregue em Evento público de grande impacto – Caminho Niemeyer 10+10MHz: a) DL e b) UL. . . . .	80
6.22	Histograma da carga de tráfego em Evento público de grande impacto – Caminho Niemeyer 10+10MHz: a) DL e b) UL. . . . .	80
6.23	Célula rebocável ( <i>Cell-on-Wheels</i> – CoW) [103]. . . . .	81
6.24	Localização da área – Vila Ipiranga. . . . .	82
6.25	Localização da área – Morro do Estado. . . . .	82
6.26	Vazão demandada e entregue em Morro do Estado 5+5MHz: a) DL e b) UL. . . . .	83
6.27	Histograma da carga de tráfego em Morro do Estado 5+5MHz: a) DL e b) UL . . . . .	83
6.28	Vazão demandada e entregue em Vila Ipiranga 5+5MHz: a) DL e b) UL. . . . .	83
6.29	Histograma da carga de tráfego em Vila Ipiranga 5+5MHz: a) DL e b) UL . . . . .	84
6.30	Vazão demandada e entregue em Morro do Estado 10+10MHz: a) DL e b) UL. . . . .	85
6.31	Histograma da carga de tráfego em Morro do Estado 10+10MHz: a) DL e b) UL. . . . .	85
6.32	Vazão demandada e entregue em Vila Ipiranga 10+10MHz: a) DL e b) UL. . . . .	85
6.33	Histograma da carga de tráfego em Vila Ipiranga 10+10MHz: a) DL e b) UL. . . . .	86

---

6.34	Vazão demandada e entregue em Morro do Estado 10+10MHz, redução 40% de agentes: a) DL e b) UL. . . . .	86
6.35	Histograma da carga de tráfego em Morro do Estado 10+10MHz, redução 40% de agentes: a) DL e b) UL. . . . .	87
6.36	Vazão demandada e entregue em Vila Ipiranga 10+10MHz, redução 40% de agentes: a) DL e b) UL. . . . .	87
6.37	Histograma da carga de tráfego em Vila Ipiranga 10+10MHz, redução 40% de agentes: a) DL e b) UL. . . . .	87
6.38	Vazão demandada e entregue em rotina (Centro) 5+5MHz, em 800MHz: a) DL e b) UL. . . . .	88
6.39	Histograma da carga de tráfego em rotina (Centro) 5+5MHz, em 800MHz: a) DL e b) UL. . . . .	89
6.40	Vazão demandada e entregue em rotina (Centro) 5+5MHz, em 700MHz: a) DL e b) UL. . . . .	89
6.41	Histograma da carga de tráfego em rotina (Centro) 5+5MHz, em 700MHz: a) DL e b) UL. . . . .	89
6.42	Histograma da carga de tráfego em Vila Ipiranga 10+10MHz, em 700MHz: a) DL e b) UL. . . . .	90
6.43	Vazão demandada e entregue em Vila Ipiranga 10+10MHz, em 800 MHz: a) DL e b) UL. . . . .	90
6.44	Histograma da carga de tráfego em Vila Ipiranga 10+10MHz, em 800MHz: a) DL e b) UL. . . . .	91
6.45	Vazão demandada e entregue em Vila Ipiranga 10+10MHz, em 700 MHz: a) DL e b) UL. . . . .	91

# Lista de Tabelas

2.1	Parâmetros padrões para os modelos Okumura-Hata e Cost-Hata. . . . .	10
2.2	Banda de frequência especificada pelo 3GPP, larguras de canal e esquema de duplexação correspondente. . . . .	16
2.3	Relação entre largura de banda e número de blocos de recurso. . . . .	22
2.4	Mapeamento entre CQI, SINR e MCS em 5MHz [59]. . . . .	27
2.5	QoS Class Identifier. . . . .	28
2.6	Comparação técnica entre várias tecnologias de rádio digital troncalizado [64] . . . . .	31
3.1	Valores típicos de desvio padrão para margem de sombreamento [80]. . . . .	37
4.1	Densidade de usuários da GM por região. . . . .	49
4.2	Densidade de usuários da DC por região. . . . .	50
4.3	Densidade de usuários da GM por região – Caminho Niemeyer. . . . .	52
4.4	Densidade de usuários por região crítica. . . . .	53
5.1	Definição dos serviços e perfil de tráfego para rotina e desastres [75]. . . . .	58
5.2	Localização das eNodeBs. . . . .	61
5.3	Parâmetros gerais de transmissão/recepção. . . . .	62
5.4	Parâmetros de rede por setor. . . . .	63
6.1	Verificação dos casos mais críticos em 5+5MHz. . . . .	84
6.2	Avaliação do percentil para carga de tráfego. . . . .	90

# Lista de Abreviaturas e Siglas

<b>3GPP</b>	<i>Third Generation Partnership Project</i> . . . . .	1
<b>ACK</b>	<i>Acknowledgment</i> . . . . .	18
<b>AMC</b>	<i>Adaptive Modulation and Coding</i> . . . . .	xvi
<b>ANATEL</b>	<i>Agência Nacional de Telecomunicações</i> . . . . .	15
<b>ARQ</b>	<i>Automatic Repeat Request</i> . . . . .	17
<b>BLER</b>	<i>Block Error Rate</i> . . . . .	17
<b>BS</b>	<i>Base Station</i> . . . . .	26
<b>CA</b>	<i>Carrier Aggregation</i> . . . . .	15
<b>CC</b>	<i>Comunicações Críticas</i> . . . . .	30
<b>CCS</b>	<i>Critical Communication System</i> . . . . .	vi
<b>CISP</b>	<i>Centro Integrado de Segurança Pública</i> . . . . .	3
<b>CoW</b>	<i>Cell-on-Wheels</i> . . . . .	81
<b>CQI</b>	<i>Channel Quality Indicator</i> . . . . .	23
<b>DC</b>	<i>Defesa Civil</i> . . . . .	45
<b>DL</b>	<i>Downlink</i> . . . . .	viii
<b>DMR</b>	<i>Digital Mobile Radio</i> . . . . .	1
<b>DTM</b>	<i>Digital Terrain Model</i> . . . . .	62
<b>eNodeB</b>	<i>Evolved Node B</i> . . . . .	2
<b>EPC</b>	<i>Evolved Packet Core</i> . . . . .	18
<b>EPS</b>	<i>Evolved Packet System</i> . . . . .	18
<b>FCC</b>	<i>Federal Communications Commission</i> . . . . .	79
<b>FDD</b>	<i>Frequency Division Duplex</i> . . . . .	8
<b>FEC</b>	<i>Forward Error Correction</i> . . . . .	18
<b>GM</b>	<i>Guarda Civil Municipal</i> . . . . .	45

<b>HARQ</b>	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i> . . . . .	17
<b>ICIC</b>	<i>Inter-Cell Interference Coordination</i> . . . . .	28
<b>IMT-A</b>	<i>International Mobile Telecommunications-Advanced</i> . . . . .	14
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol</i> . . . . .	18
<b>ITU</b>	<i>International Telecommunication Union</i> . . . . .	1
<b>ITU-R</b>	<i>ITU Radiocommunication Sector</i> . . . . .	14
<b>LB</b>	<i>Link Budget</i> . . . . .	36
<b>LTE</b>	<i>Long-Term Evolution</i> . . . . .	2
<b>MAC</b>	<i>Media Access Control</i> . . . . .	17
<b>MAPL</b>	<i>Maximum Allowed Path Loss</i> . . . . .	36
<b>MCDData</b>	<i>Mission Critical Data</i> . . . . .	31
<b>MCPTT</b>	<i>Mission Critical Push-To-Talk</i> . . . . .	31
<b>MCS</b>	<i>Modulation and Coding Scheme</i> . . . . .	17
<b>MCVideo</b>	<i>Mission Critical Video</i> . . . . .	31
<b>MIMO</b>	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i> . . . . .	15
<b>NAK</b>	<i>Negative Acknowledgment</i> . . . . .	18
<b>NQQ</b>	<i>Plano Estratégico Niterói que Queremos</i> . . . . .	2
<b>ODS</b>	<i>Objetivos de Desenvolvimento Sustentável</i> . . . . .	2
<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> . . . . .	16
<b>OFDMA</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> . . . . .	14
<b>ONU</b>	<i>Organização das Nações Unidas</i> . . . . .	2
<b>PCI</b>	<i>Physical Cell Identifier</i> . . . . .	29
<b>PDPA</b>	<i>Programa de Desenvolvimento de Projetos Aplicados</i> . . . . .	2
<b>PDSCH</b>	<i>Physical Downlink Shared Channel</i> . . . . .	23
<b>PHY</b>	<i>Camada Física</i> . . . . .	19
<b>PMR</b>	<i>Private/professional Mobile Radio</i> . . . . .	1
<b>PPDR</b>	<i>Public Protection and Disaster Relief</i> . . . . .	1
<b>PS</b>	<i>Packet Switch</i> . . . . .	18
<b>PTT</b>	<i>Push-to-Talk</i> . . . . .	8

<b>PUSCH</b>	<i>Physical Uplink Shared Channel</i> . . . . .	24
<b>P25</b>	<i>Project 25</i> . . . . .	1
<b>QCI</b>	<i>QoS Class Identifier</i> . . . . .	27
<b>QoS</b>	<i>Quality of Service</i> . . . . .	24
<b>RB</b>	<i>Resource Block</i> . . . . .	24
<b>RCC</b>	<i>Redes de Comunicações Críticas</i> . . . . .	16
<b>RLC</b>	<i>Radio Link Control</i> . . . . .	17
<b>RNC</b>	<i>Radio Network Controller</i> . . . . .	18
<b>RSRP</b>	<i>Reference Signal Receive Power</i> . . . . .	25
<b>SCC</b>	<i>Sistema de Comunicações Críticas</i> . . . . .	v
<b>SC-FDMA</b>	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i> . . . . .	15
<b>SEOP</b>	<i>Secretaria de Ordem Pública</i> . . . . .	45
<b>SINR</b>	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i> . . . . .	23
<b>SLP</b>	<i>Serviço Limitado Privado</i> . . . . .	16
<b>TBS</b>	<i>Transport Block Size</i> . . . . .	23
<b>TCCA</b>	<i>The Critical Communications Association</i> . . . . .	1
<b>TDD</b>	<i>Time Division Duplex</i> . . . . .	8
<b>TETRA</b>	<i>Terrestrial Trunked Radio</i> . . . . .	1
<b>TM</b>	<i>Transmission Mode</i> . . . . .	17
<b>TTI</b>	<i>Transmission Time Interval</i> . . . . .	24
<b>UE</b>	<i>User Equipment</i> . . . . .	9
<b>UFF</b>	<i>Universidade Federal Fluminense</i> . . . . .	2
<b>UL</b>	<i>Uplink</i> . . . . .	viii
<b>USGS</b>	<i>United States Geological Survey</i> . . . . .	64
<b>USIM</b>	<i>User Service Identity Module</i> . . . . .	18
<b>VoIP</b>	<i>Voice Over IP</i> . . . . .	57

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Contextualização . . . . .	2
1.1.1	Motivação . . . . .	2
1.1.2	Plano NQQ e Edital PDPA . . . . .	2
1.1.3	Potenciais benefícios de um SCC para Niterói . . . . .	3
1.1.4	Por que foi escolhida a tecnologia LTE . . . . .	3
1.2	Objetivos alcançados . . . . .	4
1.3	Estrutura da dissertação . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Conceitos sobre Comunicações Móveis e Comunicações Críticas</b>	<b>6</b>
2.1	Comunicações móveis . . . . .	6
2.1.1	Evolução dos padrões . . . . .	6
2.1.2	Por que células? . . . . .	7
2.1.3	Aspectos da transmissão: duplexação e diferenciação <i>uplink / down-link</i> . . . . .	8
2.1.4	Aspectos de propagação no canal sem-fio móvel . . . . .	9
2.1.4.1	Modelo de perda por espaço livre . . . . .	9
2.1.4.2	Modelos de propagação Okumura-Hata e Cost-Hata . . . . .	10
2.1.4.3	Perda por difração – Modelo gume de faca . . . . .	11
2.1.4.4	Sombreamento . . . . .	12
2.1.4.5	Perdas por penetração e pelo corpo humano . . . . .	13
2.2	3GPP . . . . .	13

---

2.3	Tecnologia LTE . . . . .	14
2.3.1	IMT-Advanced, LTE, LTE-A e LTE-A Pro . . . . .	14
2.3.2	Bandas alocadas pelo 3GPP/ITU . . . . .	15
2.3.3	Tecnologias de transmissão inovadoras do LTE . . . . .	16
2.3.3.1	OFDMA (e SC-FDMA) . . . . .	16
2.3.3.2	Técnica de múltiplas antenas . . . . .	17
2.3.3.3	Modulação e codificação adaptativa ( <i>Adaptive Modulation and Coding</i> (AMC)) . . . . .	17
2.3.3.4	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i> (HARQ) . . . . .	17
2.3.3.5	Arquitetura de rede totalmente baseada em pacotes (IP) . . . . .	18
2.3.4	Arquitetura de rede . . . . .	18
2.3.5	Camadas de protocolo na interface rádio . . . . .	19
2.3.6	Estrutura de canais . . . . .	20
2.3.7	Recursos rádio no downlink . . . . .	21
2.3.7.1	Estrutura de quadro e seus blocos de recursos físicos (PRB - <i>Physical Resource Blocks</i> ) . . . . .	21
2.3.7.2	Alocação de recursos . . . . .	23
2.3.8	Recursos rádio no <i>uplink</i> (SC-FDMA) . . . . .	24
2.3.8.1	Estrutura de quadro e seus blocos de recursos físicos . . . . .	24
2.3.8.2	Alocação de recursos . . . . .	24
2.3.9	Procedimentos na camada física e escalonamento ( <i>scheduling</i> ) . . . . .	24
2.3.10	SINR e RSRP . . . . .	25
2.3.11	Indicador de qualidade do canal (CQI) . . . . .	26
2.3.11.1	O que é? / Para que serve? . . . . .	26
2.3.11.2	Tabela de CQI (CQI x modulação x taxa do código x eficiência) . . . . .	26
2.3.12	Indicador de classe de QoS (QCI) para LTE . . . . .	27

---

2.3.13	Coordenação de interferência intercelular (ICIC) . . . . .	28
2.3.14	Identificador da célula física (PCI) . . . . .	29
2.4	Comunicações críticas . . . . .	30
2.4.1	Principais características . . . . .	30
2.4.1.1	Definição . . . . .	30
2.4.1.2	Tecnologias legadas . . . . .	30
2.4.1.3	Padronização 3GPP e emprego da tecnologia LTE para Comunicações Críticas . . . . .	31
2.4.1.4	Principais sistemas no mundo . . . . .	33
2.4.2	Aplicações típicas em comunicações críticas . . . . .	33
2.4.3	Caracterização do tráfego de dados em situações críticas . . . . .	33
<b>3</b>	<b>Conceitos sobre Planejamento Rádio de uma Rede LTE</b>	<b>35</b>
3.1	Processo de planejamento da rede rádio . . . . .	35
3.2	<i>Link budget</i> e planejamento de cobertura . . . . .	36
3.2.1	Objetivos do <i>link budget</i> . . . . .	36
3.2.2	Componentes importantes do <i>link budget</i> . . . . .	37
3.2.2.1	Confiabilidade de cobertura de sombreamento log-normal . . . . .	37
3.2.2.2	Análise do ruído de fundo e sensibilidade do receptor . . . . .	38
3.2.2.3	Perdas e ganhos associados a equipamentos da rede . . . . .	38
3.2.2.4	Classificação do cenário de operação . . . . .	39
3.2.3	Considerações sobre o <i>link budget</i> . . . . .	40
3.3	Planejamento de capacidade . . . . .	41
3.3.1	Conceituação e objetivos . . . . .	41
3.3.2	Fatores que impactam a capacidade no LTE . . . . .	41
3.3.3	Etapas do cálculo de capacidade . . . . .	42
<b>4</b>	<b>Condições Operacionais das Agências PPDR de Niterói</b>	<b>44</b>

---

4.1	Introdução . . . . .	44
4.2	Identificação das agências PPDR de Niterói . . . . .	44
4.2.1	Guarda Municipal . . . . .	45
4.2.2	Defesa Civil . . . . .	45
4.2.3	Centro Integrado de Segurança Pública . . . . .	45
4.3	Cenários para atuação PPDR . . . . .	46
4.4	Estudo de casos na cidade de Niterói . . . . .	47
4.4.1	Atuação em rotina . . . . .	48
4.4.1.1	Descrição do cenário operacional das agências . . . . .	48
4.4.1.2	Quantidade de usuários operacionais . . . . .	48
4.4.2	Evento público de grande impacto . . . . .	50
4.4.2.1	Descrição do cenário operacional das agências . . . . .	50
4.4.2.2	Quantidade de usuários operacionais . . . . .	51
4.4.3	Eventos inopinados catastróficos . . . . .	52
4.4.3.1	Descrição do cenário operacional das agências . . . . .	52
4.4.3.2	Quantidade de usuários operacionais . . . . .	52
4.5	Dispositivos utilizados . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Planejamento de Dimensionamento do SCC para Niterói</b>	<b>56</b>
5.1	Introdução . . . . .	56
5.2	Simulador Atoll-Forsk . . . . .	56
5.3	Definição dos serviços/aplicações PPDR e suas características . . . . .	57
5.4	Simulação de Monte Carlo . . . . .	59
5.5	Determinação das localizações das eNodeBs . . . . .	60
5.6	Características dos terminais, eNodeB e interface aérea. . . . .	62
5.7	Mapa digital de terreno . . . . .	62
5.8	Mapa de tráfego de densidade de perfil de usuário . . . . .	64

---

5.9	Metodologia . . . . .	65
<b>6</b>	<b>Simulações, Resultados e Análises</b>	<b>67</b>
6.1	Introdução . . . . .	67
6.2	Faixa de 700 x faixa de 800 MHz para segurança pública . . . . .	68
6.3	Resultados para a faixa de 700 MHz . . . . .	69
6.3.1	Cenário 1 (atuação em rotina) . . . . .	69
6.3.1.1	Análise da área de serviço . . . . .	69
6.3.1.2	Análise do MCS pela SINR . . . . .	70
6.3.1.3	Região de borda da célula . . . . .	71
6.3.1.4	Vazão e demanda por eNodeB . . . . .	72
6.3.2	Cenário 2 (evento público de grande impacto – Caminho Niemeyer) em 700 MHz . . . . .	78
6.3.2.1	Análise da área de serviço . . . . .	78
6.3.2.2	Vazão e demanda por eNodeB com 5+5 MHz . . . . .	78
6.3.2.3	Vazão e demanda por eNodeB com 10+10 MHz . . . . .	78
6.3.3	Cenário 3 (evento inopinado catastrófico) em 700 MHz . . . . .	81
6.3.3.1	Análise da área de serviço . . . . .	81
6.3.3.2	Vazão e demanda por eNodeB com 5+5MHz . . . . .	82
6.3.3.3	Vazão e demanda por eNodeB com 10+10MHz . . . . .	84
6.3.3.4	Vazão e demanda por eNodeB com 10+10MHz e redução de usuários . . . . .	86
6.4	Resultados para a faixa de 800 MHz . . . . .	87
<b>7</b>	<b>Conclusão e Trabalhos Futuros</b>	<b>92</b>
7.1	Conclusão . . . . .	92
7.2	Trabalhos futuros . . . . .	93



# Capítulo 1

## Introdução

Redes de comunicação sempre tiveram muita importância para órgãos do Estado encarregados de proporcionar segurança pública e contenção de danos, tais como: Polícia Rodoviária, Militar, Civil; SAMU; Corpo de Bombeiros; Defesa Civil; entre outros. Essas instituições são especializadas em lidar com situações de emergência tanto naturais como as causadas pelo homem. Diversas ações necessitam de coordenação fornecida através de meios de comunicação utilizados por essas instituições: controle de tumulto, combate a incêndio, controle de trânsito, deslizamento de terra, enchente, ou qualquer outra situação que dependa de ações rápidas e eficientes.

Durante muitos anos, três tecnologias de comunicação digital (*Terrestrial Trunked Radio* (TETRA), *Digital Mobile Radio* (DMR) e *Project 25* (P25)) foram as mais empregadas por agências atuantes no cenário denominado de proteção pública e mitigação de desastres (*Public Protection and Disaster Relief* (PPDR)) no mundo. Estes padrões são chamados de *Private/professional Mobile Radio* (PMR), e foram concebidos na década de 90. Classificados como tecnologias de banda estreita, atuam, principalmente, em serviços centrados em voz, e para aplicações que demandam baixa taxa de dados [1].

Dada a importância e a complexidade de uma rede com estas características, a comunidade atuante na área de telecomunicações tem definido, para estes sistemas, características gerais, escopos, requisitos de desempenho, abrangência, dentre outros aspectos, em documentos oficiais dos órgãos como a *International Telecommunication Union* (ITU) [2] e o *Third Generation Partnership Project* (3GPP) [3]. Além disso, organizações foram constituídas (*The Critical Communications Association* (TCCA) é o principal exemplo) reunindo representantes de órgãos estatais, da academia e de empresas, com o propósito de liderarem a discussão de soluções, padronizações e apresentação de tendências para esta área.

Nesse contexto, o padrão de tecnologia celular *Long-Term Evolution* (LTE), usualmente denominado de padrão 4G de telefonia móvel, proporciona uma plataforma que atende aos objetivos atuais de aplicações em comunicações críticas [4], pois aproveita as diversas vantagens desse sistema banda larga [5], além de ter sido amplamente implementado e testado por empresas e agências governamentais do mundo todo, proporcionando economia de escala e possibilidade de aproveitamento de infraestrutura das redes comerciais.

## 1.1 Contextualização

### 1.1.1 Motivação

Motivado pela importância de redes de comunicações para as agências PPDR, nesta dissertação é realizado um estudo, com auxílio de simulação computacional, da cobertura e capacidade de tráfego de um SCC para o município de Niterói, baseado na tecnologia 4G/LTE. No desenvolvimento do texto, serão definidos os sítios e tipos de *Evolved Node Bs* (eNodeBs) a serem empregados, a determinação do contexto de uso do sistema (geografia do município, recursos e desempenho do sistema, situações excepcionais de emprego, etc.) e uso extensivo de um *software* de simulação para obtenção dos resultados. Neste sentido, esta dissertação dará contribuição significativa ao projeto intitulado “Sistema de Comunicações Críticas para o município de Niterói”, aprovado no edital PDPA/FEC, ao servir de base para uma futura implementação e garantir o melhor caminho para expansão da rede.

### 1.1.2 Plano NQQ e Edital PDPA

A *Universidade Federal Fluminense* (UFF) e a Fundação Euclides da Cunha, em conjunto com a Prefeitura Municipal de Niterói, tornaram público, por via do Edital *Programa de Desenvolvimento de Projetos Aplicados* (PDPA), a seleção de projetos aplicados (pesquisa e extensão) coordenados por pesquisadores e/ou extensionistas vinculados à UFF, em consonância com o *Plano Estratégico Niterói que Queremos* (NQQ)–2033 e com os *Objetivos de Desenvolvimento Sustentável* (ODS) da Agenda 2030 da *Organização das Nações Unidas* (ONU). O edital PDPA tem como objetivos:

- Promover soluções relacionadas aos desafios prioritários do município nas diferentes Áreas de Resultado que integram o Plano Estratégico Niterói que Queremos-2033;

- Propor a resolução de problemas públicos concretos da cidade de Niterói, de forma a contribuir de forma efetiva e inovadora para o desenvolvimento socioeconômico sustentável das diversas regiões do município;
- Estimular a associação e a sinergia entre os pesquisadores e extensionistas da Universidade Federal Fluminense e os gestores públicos da Prefeitura Municipal de Niterói.

### 1.1.3 Potenciais benefícios de um SCC para Niterói

Ao se inserir um SCC no contexto de apoio a algumas recentes realizações da prefeitura de Niterói, por exemplo o *Centro Integrado de Segurança Pública (CISP)*, é possível afirmar que esta dissertação tem grande potencial para trazer importantes benefícios às operações PPDR no município, contribuindo significativamente para o Plano Estratégico de Niterói na área Organizada e Segura [6]. Os serviços prestados com auxílio de um SCC moderno, confiável e adequado para uso em diversos cenários à cidade de Niterói, assegurará proteção que abrangerá cidadãos, propriedades, meio ambiente e outros valores essenciais para a manutenção da estabilidade da sociedade.

### 1.1.4 Por que foi escolhida a tecnologia LTE

Nos dias atuais a tecnologia de comunicação móvel encontra-se na quinta geração, com o desenvolvimento e implementação da tecnologia denominada de 5G NR (5G *New Radio*), que incorpora um conjunto grande de técnicas modernas de transmissão e de concepção de rede. O 5G NR vem aos poucos ganhando espaço comercial, tendo sido padronizado e desenvolvido nos últimos 10 anos para atingir níveis de desempenho significativamente superiores à tecnologia considerada de 4<sup>a</sup> geração, representada pelo LTE e suas evoluções (*LTE-Advanced* e *LTE-Advanced Pro*) [7].

Entretanto, o LTE ainda é o padrão dominante nas redes comerciais e privadas mundo a fora. Ou seja, embora o 5G NR apresente desempenho superior, por questões de planejamento econômico/operacional por parte das operadoras, sua implementação ainda é lenta, gradual, e por enquanto restrita a centros densamente urbanizados. Na realidade, é válido afirmar que esta situação foi observada em todas as migrações tecnológicas ocorridas na telefonia móvel.

E por que considerar o LTE nesta dissertação, uma vez que esta tecnologia não representa o estágio tecnológico atual de comunicações móveis? A principal razão é que

esta dissertação tem como pano de fundo principal a implementação de um sistema de comunicações críticas, com características de desempenho e de viabilidade econômica atualmente considerados pelos principais atores deste ecossistema. E é possível afirmar que as principais redes de comunicações críticas, implementadas em países como Estados Unidos, Coreia do Sul, Reino Unido e outros, adotam, hoje, o LTE como tecnologia base para a implementação de seus sistemas de comunicações críticas [8]. Isto é explicado pelo fato de que o LTE apresenta características de desempenho (taxa de transmissão, eficiência espectral, confiabilidade, segurança, latência etc) que atendem às demandas das principais aplicações consideradas em missões críticas e, também importante, é uma tecnologia que tem fator de escala extremamente favorável, com custo de equipamentos de rede, de rádio, e de terminais bem menores quando comparados aos custos associados ao 5G NR [9].

Pelas razões anteriormente expostas, o SCC/Niterói foi proposto para o edital PDPA considerando o uso do LTE, e esta dissertação, que possui grande relevância para o desenvolvimento deste projeto, está alinhado a esta escolha.

## 1.2 Objetivos alcançados

Como parte do planejamento celular, o uso de ferramentas para simulação e otimização de redes foi considerado para auxiliar na sua concepção (em questões de análise de dimensionamento, configuração etc) considerando parâmetros previamente coletados, tanto em cenários de baixa atividade como em cenários de grande emergência, cujo tráfego acentuado exige resiliência e desempenho do sistema.

A partir dos estudos e simulações, sítios apropriados para instalação de eNodeBs foram identificados no contexto desta dissertação, que devem proporcionar a cobertura desejada em um SCC a ser implementada em Niterói.

Além disso, foi feita uma análise da demanda estimada no uso da rede, considerando cenários de rotina e de uso extremo dos meios de comunicações, e uma extensa quantidade de simulações mostrou a capacidade da rede proposta em atender à demanda projetada quando recursos, tais como espectro e células rebocáveis, são adequadamente considerados.

## 1.3 Estrutura da dissertação

A presente dissertação está estruturado em um total de sete Capítulos. Além desta parte introdutória, onde contextualizamos a dissertação e apresentamos os objetivos alcançados, temos:

No Capítulo 2 são apresentados os conceitos de comunicações móveis e comunicações críticas necessários para a modelagem do planejamento celular a fim de atingir a cobertura e capacidade almejadas.

Ao longo do Capítulo 3 são mostradas algumas características, e técnicas para planejamento celular, com foco no dimensionamento da rede, tanto para o *downlink* como para o *uplink*.

No Capítulo 4 são apresentadas as principais agências de segurança pública e mitigação de danos de Niterói, e suas condições operacionais que servem de base para o planejamento supracitado.

O Capítulo 5 faz uma descrição do uso do simulador no desenvolvimento do planejamento celular: seus parâmetros de entrada, detalhes sobre o processamento das informações, e seus possíveis resultados de saída. No fim, apresenta uma estrutura (*framework*) adotada para dimensionamento da rede.

O Capítulo 6 compreende o estudo de caso realizado, abordando o projeto que consiste no dimensionamento de cobertura e capacidade de uma rede de acesso sem fio para prover serviços de comunicações críticas banda larga no município de Niterói, na frequência de 700 MHz, com discussão de aproveitamento dos resultados para a faixa de 800 MHz.

Por último, no Capítulo 7, conclusões são feitas a partir dos resultados relevantes do estudo e possíveis desdobramentos futuros são apontados.

# Capítulo 2

## Conceitos sobre Comunicações Móveis e Comunicações Críticas

### 2.1 Comunicações móveis

#### 2.1.1 Evolução dos padrões

As comunicações móveis, ao longo das últimas décadas, têm encarado um aumento enorme na demanda por um alto tráfego de dados, conduzindo-os para uma constante evolução de seus sistemas. Partindo de iniciativas regionais, a tarefa de desenvolver tecnologias móveis percorreu um longo caminho, tornando-se cada vez mais complexa [10], cuja frente de trabalho foi tomada por organizações de desenvolvimento de padrões globais, sendo a principal delas a 3GPP [3].

Redes de telefonia móveis são diferenciadas entre si por especificações técnicas alcançadas, onde há grandes lacunas de qualidade e capacidade separando-as, chamadas de “geração”, tal como “primeira geração”, “segunda geração”, etc. Inicialmente, um padrão tecnológico caro para somente alguns usuários selecionados, até os sistemas adotados em massa pela maior parte da população mundial.

A telefonia móvel se inicia na primeira geração, no começo da década de 80, composta por diversos padrões de sistemas analógicos ao redor do globo (e.g., NMT, AMPS e TACS), como mostrado na Figura 2.1. Centrados principalmente em voz, seus equipamentos eram volumosos; os padrões eram incompatíveis por natureza entre si; e a qualidade de voz era comumente inconsistente, com *cross-talk* entre usuários sendo um problema habitual. Por sua vez, a quarta geração é composta, essencialmente, pelo LTE, um padrão universal, capaz de atender serviços de dados em alta taxas e com baixa latência [11].

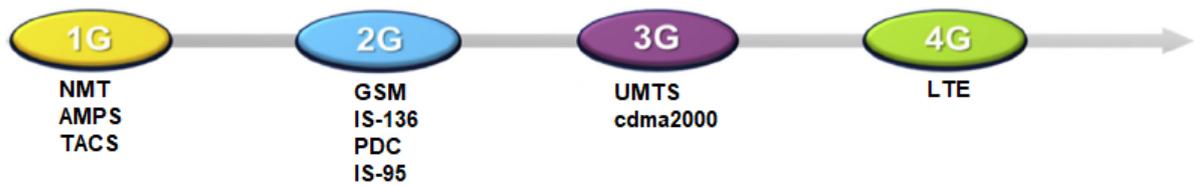


Figura 2.1: Evolução das gerações de sistemas de comunicações móveis [12].

### 2.1.2 Por que células?

Por definição, célula é uma área geográfica delimitada, coberta por uma estação base, conhecida como eNodeB no LTE, onde um número razoável de usuários são acomodados e usada para transmitir voz e dados.

A ideia básica da concepção de comunicação celular surge da necessidade de reuso de recursos escassos. Ao invés de um único transmissor de alta potência com grande cobertura geográfica, as células são dispostas em padrões específicos, como exemplificado na Figura 2.2, cobrindo um número grande de usuários ao se reutilizar faixas de frequências, evitando o congestionamento espectral, e transmitindo a uma baixa potência.



Figura 2.2: Representação de células em formato hexagonal.

O tamanho de uma célula varia de dezenas de metros a dezenas de quilômetros, dependendo da tecnologia de acesso implementada, da potência de transmissão da estação, do número de usuários atendidos, da topografia do terreno, e da densidade urbana.

Uma rede de comunicação móvel celular, na prática, é composta por células com formatos quaisquer na qual algumas áreas não alcançam o nível mínimo de sinal para se estabelecer conexão. A Figura 2.3 destaca os casos a serem considerados: o hexágono, um

modelo artificial, é o mais simplificado e prático, onde não há superposição nem áreas sem cobertura; o caso circular, que apresenta transmissão omnidirecional, porém com áreas sobrepostas; e o caso real com células de formatos quaisquer.

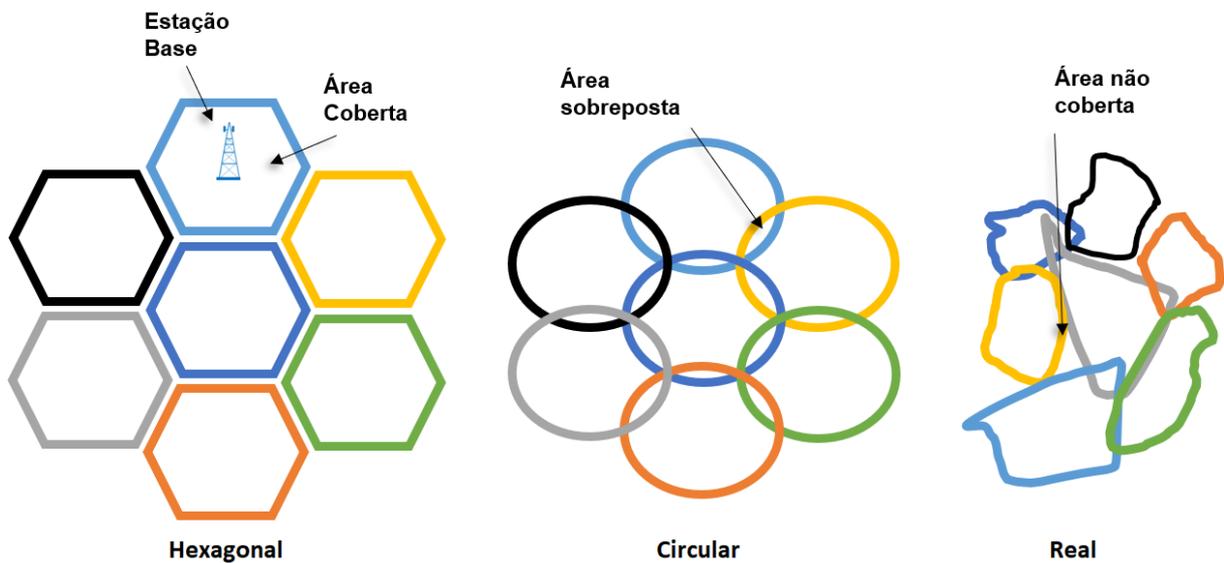


Figura 2.3: Tipos de células.

### 2.1.3 Aspectos da transmissão: duplexação e diferenciação *uplink* / *downlink*

Em sistemas de comunicação móvel é necessário transmitir ou receber dados em ambas direções (duplexação). Logo, o sistema deve operar em um meio de duas vias. Há dois tipos de esquema para alcançar esse objetivo [13]:

- *Half-duplex*: caracterizado por apenas uma direção de transmissão por vez. Por este esquema, uma pessoa pode falar num determinado momento, e todos os participantes ouvirão o discurso. Comum em redes de comunicações críticas, aplicado em comunicações do tipo *Push-to-Talk* (PTT), onde cada usuário pode se comunicar ao pressionar um botão no dispositivo, semelhante a *walkie-talkies*;
- *Full-duplex*: cada participante da comunicação pode transmitir e receber ao mesmo tempo, é um caminho de duas vias simultaneamente. Há dois tipos de comunicação *duplex* com suporte total pelo LTE, disponibilizado a partir do *Release 8* do 3GPP, *Frequency Division Duplex* (FDD) e *Time Division Duplex* (TDD) (Figura 2.4) [14].
  - Duplexação por divisão de tempo, ou TDD, é a aplicação de divisão de tempo multiplexado para separar os sinais de envio (UL) e recepção (DL), cada um

em um *slot* de tempo na mesma faixa de frequência. Apesar de transmitir em tempos diferentes, ele emula uma comunicação *full-duplex* através de um enlace de comunicação *half-duplex*.

- Duplexação por divisão de frequência, ou FDD, é a aplicação de divisão de frequência multiplexado para separar os sinais de DL e UL, onde a estação base transmite em uma frequência e o equipamento do usuário (*User Equipment* (UE)) em uma diferente, com uma banda de guarda separando-as.

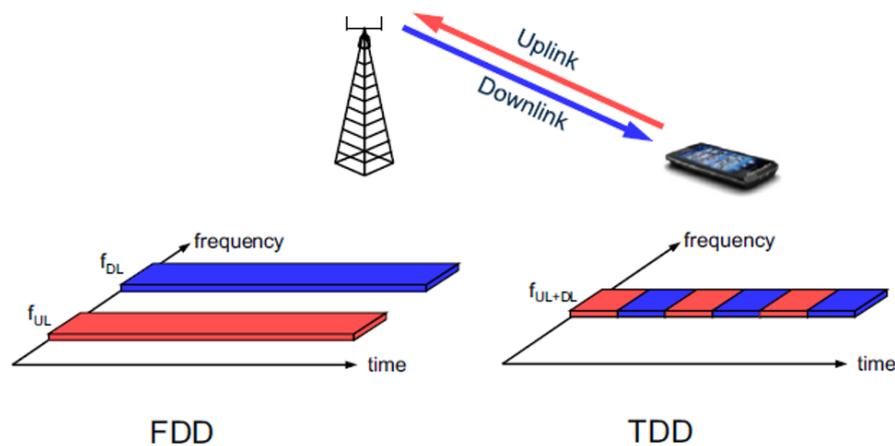


Figura 2.4: Duplexação: FDD e TDD [13]

Neste trabalho será considerada a transmissão no modo FDD, para que esteja alinhado com a regulamentação no Brasil de uso de faixa espectral para comunicações críticas [15].

## 2.1.4 Aspectos de propagação no canal sem-fio móvel

### 2.1.4.1 Modelo de perda por espaço livre

O espaço livre indica um meio espacial ideal, uniforme e isotrópico. Quando as ondas eletromagnéticas são transmitidas neste meio, nenhuma reflexão, refração, espalhamento ou absorção ocorre. As perdas de propagação são causadas apenas pela distribuição da energia no alargamento da frente de onda. A perda de propagação pelo modelo de espaço livre é dada pela Equação 2.1 [16].

$$PL(dB) = 32,45 + 20\log(d) + 20\log(f) \quad (2.1)$$

onde  $d$  é a distância entre as antenas transmissora e receptora, em km; e  $f$  é a frequência do sinal transmitido, em MHz.

### 2.1.4.2 Modelos de propagação Okumura-Hata e Cost-Hata

A fórmula base de Hata [17] descreve empiricamente a perda de caminho como uma função da frequência, distância do receptor-transmissor e alturas da antena para um ambiente urbano. Esta fórmula é válida para ambientes urbanos planos e altura da antena móvel de 1,5 m, em longas distâncias (de 1 até 20 km). A perda de caminho ( $L_u$ ) neste modelo é calculada (em dB) da seguinte forma:

$$L_u = A_1 + A_2 \log(f) + A_3 \log(h_{Tx}) + (B_1 + B_2 \log(h_{Tx}) + B_3 h_{Tx}) \log(d) + C_m \quad (2.2)$$

onde  $f$  é a frequência (MHz);  $h_{Tx}$  é a altura da antena do transmissor acima do solo (m);  $d$  é a distância entre o transmissor e o receptor (km); o parâmetro  $C_m$  é definido como 0 dB, para o meio urbano, suburbano ou rural, e 3 dB para área metropolitana no modelo Cost-Hata; e os parâmetros  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_3$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  e  $B_3$  apresentam valores padrão propostos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Parâmetros padrões para os modelos Okumura-Hata e Cost-Hata.

Parâmetros	Okumura-Hata	Cost-Hata
	$150 < f \leq 1500$ MHz	$1500 < f < 2000$ MHz
$A_1$	69,55	49,30
$A_2$	26,16	33,90
$A_3$	-13,82	-13,82
$B_1$	44,90	44,90
$B_2$	-6,55	-6,55
$B_3$	0	0

Conforme descrito acima, a fórmula Hata é válida para ambiente urbano e altura da antena receptora de 1,5m. Para outro ambientes e alturas de antenas móveis, fórmulas corretivas devem ser aplicadas.

- Para áreas urbanas:  $L_{model1} = L_u - a(h_{Rx})$
- Para áreas suburbanas:  $L_{model1} = L_u - a(h_{Rx}) - 2(\log(\frac{f}{28}))^2 - 5,4$
- Para áreas rurais quasi-abertas:  $L_{model1} = L_u - a(h_{Rx}) - 4,78(\log(f))^2 + 18,33\log(f) - 35,94$
- Para áreas rurais abertas:  $L_{model1} = L_u - a(h_{Rx}) - 4,78(\log(f))^2 + 18,33\log(f) - 40,94$

$a(h_{Rx})$  é uma correção para uma altura da antena receptora diferente de 1,5 m.

- Para cidades pequenas ou rurais:  $a(h_{Rx}) = (1,1 \log(f) - 0,7)h_{Rx} - (1,56 \log(f) - 0,8)$
- Para cidades grandes:  $a(h_{Rx}) = 3,2(\log(11,75h_{Rx}))^2 - 4,97$

Quando a altura da antena do receptor é igual a 1,5 m,  $a(h_{Rx})$  está perto de 0 dB, independentemente da frequência.

### 2.1.4.3 Perda por difração – Modelo gume de faca

A difração pode ser entendida a partir do princípio de Huygens de que cada ponto de uma frente de onda pode ser considerado a fonte de uma onda esférica. Onde existe uma obstrução entre o transmissor e a antena receptora, há ondas secundárias que são geradas através da obstrução.

O cálculo da difração é baseado nas recomendações ITU 526-5 [18]. em que um método geral é apresentado para avaliar as perdas por difração (em dB) de um ou mais obstáculos do tipo gume de faca na linha de visada. O procedimento adotado no estudo verifica se um gume de faca obstrui a primeira zona de Fresnel construída entre o transmissor e o receptor (Figura 2.5). A perda por difração,  $J(v)$ , depende do parâmetro de obstrução ( $v$ ), que corresponde à razão entre a altura da obstrução ( $h$ ) e o raio da zona de Fresnel ( $R$ ).

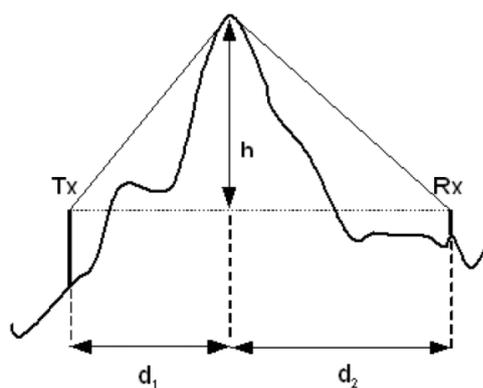


Figura 2.5: Modelo para cálculo da perda por difração por gume de faca.

$$R = \sqrt{\frac{c_0 n d_1 d_2}{f(d_1 + d_2)}} \quad (2.3)$$

onde  $n$  é o índice da zona de Fresnel,  $c_0$  é a velocidade da luz ( $2,99792 \times 10^8$  m/s),  $f$  é a frequência em Hz,  $d_1$  é a distância do transmissor ao obstáculo em m e  $d_2$  é a distância do obstáculo ao receptor em m.

Temos,

$$v = \frac{h}{r} \quad (2.4)$$

$$r = \frac{R}{\sqrt{2}} \quad (2.5)$$

$h$  é a altura da obstrução (altura do topo do obstáculo ao eixo Tx-Rx).

Consequentemente,

Para o método com 1 gume de faca, se  $v \geq -0,7$ :

$$J(v) = 6,9 + 20 \log(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + (v - 0,1)) \quad (2.6)$$

Senão,  $J(v) = 0$

O método é aplicado, do transmissor ao receptor, para todos os obstáculos, individualmente, no perfil do relevo. Apenas a perda pelo gume com maior valor de  $v$  é adotada.

#### 2.1.4.4 Sombreamento

No deslocamento do receptor, este pode sofrer uma queda do sinal devido a obstruções naturais ou feitas pelo homem, neste caso esta queda ou desvanecimento é percebido por longos metros e pode ser classificado como um desvanecimento em larga escala. Ele reflete as condições que podem variar quando alguém vira uma esquina, se move para trás de um grande edifício ou entra em um edifício [19]. Variações em grande escala causadas por sombreamento de obstáculos seguem uma distribuição log-normal; o que significa que, quando os níveis de potência de sombreamento são medidos em dB, eles seguem uma distribuição gaussiana. Consequentemente, os efeitos de sombreamento são geralmente incorporados às estimativas de perda de caminho pela adição de uma variável aleatória Gaussiana de média zero,  $\mu = 0$ , com desvio padrão  $\sigma$ :  $N(\mu = 0, \sigma)$ , onde  $\sigma$  é frequentemente estimado por medidas empíricas. Os valores comumente aceitos para  $\sigma$  estão entre 6 dB e 12 dB.

#### 2.1.4.5 Perdas por penetração e pelo corpo humano

A perda corporal indica a perda gerada pelo bloqueio e absorção de sinal quando uma antena está próxima ao corpo humano. A perda de corpo depende da posição do terminal: para uma antena eNodeB montada a uma altura de dezenas de metros, a perda corporal pode ser ignorada (0 dB); para dispositivos móveis, a perda corporal deve ser considerada e, neste caso, é de cerca de 3 dB na faixa de frequência a ser utilizada na dissertação [20].

Por sua vez, a perda por penetração indica a atenuação do sinal rádio de um terminal móvel para uma estação base, ou vice-versa, devido à obstrução por uma construção quando o terminal encontra-se em ambientes internos (*indoor*). Nestas condições, para que um receptor mantenha as comunicações, o sinal deve ser suficientemente forte. A perda de penetração varia de 5 dB a 40 dB [21]. Se não houver dados reais de testes de campo disponíveis, são adotados valores típicos para cada cenário. Para os casos que serão estudados nesta dissertação, não é considerada perda por penetração, porque todos os receptores encontram-se em ambientes externos *outdoor*.

## 2.2 3GPP

O 3GPP é uma organização no ramo de telecomunicações formada em 1998 que agrupa associações a fim de desenvolver padronização para as comunicações móveis. Essa parceria é formada por 7 corpos principais: ETSI, ARIB, TTC, TTA, CCSA, ATIS e TSDSI [22, 23, 24, 25, 26, 27, 28].

O 3GPP foi primeiramente criado para produzir especificações para o sistema móvel baseado no GSM/EDGE já em um estágio avançado. Entre os seus trabalhos mais eminentes de padronização estão as especificações para o LTE/LTE-*Advanced*/LTE-*Advanced Pro*, 5G NR, 3G UMTS e o GSM/GPRS/EDGE.

Especificações são desenvolvidas, aprimoradas e aprovadas em reuniões. Depois de organizadas por parceiros, são transpostas em documentos chamados *Releases*, cuja primeira versão, estabelecida em 2000, é conhecida como *Release 99*; e a atual versão é conhecida como *Release 17*.

Hoje, as tecnologias do 3GPP são amplamente implementadas no mundo, com aproximadamente 95% dos dispositivos ativos com assinatura em alguma tecnologia desenvolvida por essa instituição em 2019 [29].

Entre os parceiros do 3GPP, há os chamados representantes de mercado, cujo papel

é fornecer conselhos mercadológicos a respeito do consenso em determinadas áreas. Tais representantes não têm qualquer capacidade ou autoridade para definir ou publicar padrões dentro do escopo do 3GPP, tanto nacionalmente como regionalmente. Entre os mais relevantes estão a TCCA e APCO [30, 31], cujo enfoque é representar todas as tecnologias de comunicação crítica móvel e suas aplicações complementares, atendendo a demanda da indústria, desde de usuários finais, e operadores de rede ao redor do mundo.

## 2.3 Tecnologia LTE

Segundo o 3GPP, a tecnologia LTE foi desenvolvida, inicialmente, de modo a cumprir os seguintes requisitos [32]:

- suporte a várias larguras de banda 1,4; 3; 5; 10; 15; 20 MHz;
- utilização de modulação adaptativa (QPSK, 16 QAM e 64 QAM);
- *downlink*: até 100 Mbps;
- *uplink*: até 50 Mbps;
- suporte a SIMO e MIMO 2x2 e 4x4;
- aumento da eficiência espectral (cerca de 2-4 vezes superior à tecnologia precedente);
- baixa latência ( $< 10$  ms); e
- suporte para utilizadores com alta mobilidade (até 350 km/h).

### 2.3.1 IMT-Advanced, LTE, LTE-A e LTE-A Pro

Uma série de esforços, iniciada em 2003, para ampliar o tráfego de dados nas redes de celulares após o 3G levou ao projeto *International Mobile Telecommunications-Advanced* (IMT-A) da *ITU Radiocommunication Sector* (ITU-R). O objetivo foi definir um conjunto de requisitos a ser obedecido para nortear o desenvolvimento da quarta geração de comunicação móvel [33].

O LTE, usualmente referido como 3.95G (pré-4G) por não alcançar os requisitos mínimos estipulados pelo IMT-A para uma rede de quarta geração, surgiu a partir das especificações do *Release 8* em 2008. Neste conjunto de documentos foi descrito como a parte de rádio do sistema poderia ser projetada. Ao dispor de técnicas como o *Orthogonal*

*Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) no DL e o *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) no UL, além de modulação adaptativa de até 64QAM, foi possível alcançar picos de taxas de dados teóricos de até 100 Mbps no DL e 50 Mbps no UL para um canal de 20MHz [34].

O *Release 10* do 3GPP, em 2011, propôs uma melhora significativa na capacidade da rede LTE existente. O sistema resultante é conhecido como *LTE-Advanced* (LTE-A ou 4G+). O objetivo principal foi atingir e até superar os requisitos do ITU-R, como descrito em [35]. Apesar de atender à grande maioria dos requisitos estipulados pelo IMT-A, não foi possível, por exemplo, entregar uma taxa de dados suficiente. Entretanto, o LTE-A é capaz de baixa latência (<10ms), taxas de 1 Gbps no DL e 500 Mbps no UL, retrocompatibilidade, agregação de portadora *Carrier Aggregation* (CA) em até 100 MHz e flexibilidade de espectro (1,4; 3; 5; 10; 15; 20 MHz) [36].

*LTE Advanced Pro* (LTE-A Pro), também conhecido como 4,5G ou pré-5G, é o nome dado para a tecnologia estabelecida a partir do *Release 13* do 3GPP, desenvolvido com base da melhora e otimização na performance do padrão anterior (*LTE Advanced*). Com latência menor que 2ms e suporte a taxas de *download* que excedem 3 Gbps e no *upload* 1,5 Gbps, ela incorpora diferentes técnicas, tal como modulação de alta ordem (256QAM), códigos turbo (*turbo codes*), *Multiple-Input Multiple-Output* (MIMO) massivo, *beamforming* e agregação de até 32 portadoras de 20MHz para bandas de até 640 MHz.

### 2.3.2 Bandas alocadas pelo 3GPP/ITU

Uma parte essencial em qualquer rede de comunicações móvel é a banda de frequência de operação alocada para determinada tecnologia de transmissão de dados. As especificações do 3GPP permitem o desenvolvimento do LTE em uma ampla variedade de bandas de espectro globalmente [37].

Como membro do ITU, o Brasil segue os princípios de padronização de frequência de acordo com o ITU-R da Região-2. A *Agência Nacional de Telecomunicações* (ANATEL) é responsável pela regulação do espectro de radiofrequência do país em atividades como planejamento, alocação e licenciamento.

Anteriormente ocupada pela TV aberta analógica no Brasil, a faixa de 700 MHz passou a ser usada pelas operadoras para serviços de comunicação móvel após liberação do espectro através do leilão de licenças em 2014. Vale ressaltar que, conforme o Artigo 3º da resolução 625 da ANATEL [38], publicada em 11/11/2013, a faixa de radiofrequências de

703 MHz a 708 MHz e 758 MHz a 763 MHz, referente a banda 28 estabelecida pelo 3GPP (Tabela 2.2), é destinada ao *Serviço Limitado Privado* (SLP), em aplicações de segurança pública, defesa nacional e infraestrutura, em caráter primário. À época, esta iniciativa seguia uma tendência global de regulamentação do espectro para *Redes de Comunicações Críticas* (RCC) de “faixa larga”, aplicadas a cenários comumente denominados de PPDR [39]. Entretanto, recentemente, a ANATEL reavaliou a concessão do espectro para esta aplicação e alterou a destinação das subfaixas para as radiofrequências de 809 a 814 MHz e de 854 a 859 MHz – composição duplex de 5 + 5 MHz – na Resolução 757, de 8 de novembro de 2022 [15], referente à banda 27 estabelecida pelo 3GPP.

Tabela 2.2: Banda de frequência especificada pelo 3GPP, larguras de canal e esquema de duplexação correspondente.

Banda	Nome da banda	<i>Uplink</i> (MHz)	<i>Downlink</i> (MHz)	Largura de banda (MHz)	Duplexação	Canais com suporte (MHz)
27	SMR (800MHz)	807 a 824	852 a 869	2 x 17	FDD	1,4; 3; 5; 10
28	APAC 700 (700MHz)	703 a 748	758 a 803	2 x 45	FDD	3; 5; 10; 15; 20

É importante ressaltar que, embora esse marco legal tenha sido estabelecido há cerca de dez anos, verifica-se até os dias atuais embates institucionais no Brasil sobre a manutenção de uma banda de largura 10 MHz em 700 MHz com destinação PPDR [40], havendo grande “pressão” para o emprego comercial desse espectro devido às características favoráveis de propagação, principalmente em termos de alcance e penetração *indoor*. Ou seja, é possível afirmar que a faixa exclusiva para PPDR não é uma questão pacificada para importantes atores do setor de regulação do espectro de radiofrequências no país.

### 2.3.3 Tecnologias de transmissão inovadoras do LTE

#### 2.3.3.1 OFDMA (e SC-FDMA)

Na interface aérea do LTE, o esquema de transmissão de acesso múltiplo é baseado no *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM). Duas versões modificadas são utilizadas: OFDMA para o DL, e SC-FDMA para o UL. Ambas se baseiam nos mesmos princípios, mas apresentando algumas ligeiras diferenças que impactam na capacidade do *uplink* [41].

### 2.3.3.2 Técnica de múltiplas antenas

MIMO é um conjunto de técnicas baseadas no uso de múltiplas antenas na transmissão (*input*) e/ou na recepção (*output*), em combinação com processamento de sinais. Esta técnica pode ser usada para melhorar a performance do sistema, incluindo melhoria na capacidade (aumento de taxa de dados por célula), ou melhoria na cobertura (células mais largas), sem largura de banda adicional e sem aumento na potência de transmissão. Proporciona eficiência espectral mais alta e confiabilidade do enlace, explorando o comportamento de propagação em múltiplos caminhos.

Neste projeto, o sistema MIMO em LTE irá explorar os seguintes Modos de Transmissão (*Transmission Modes* (TMs)): diversidade espacial (TM2) e multiplexação espacial (TM4), ambos previstos pelo 3GPP [42].

### 2.3.3.3 Modulação e codificação adaptativa (AMC)

O LTE implementa a modulação e codificação adaptativa para aproveitar as variações das condições do canal rádio no tempo e frequência. No caso de boa condição do canal, melhores taxas de transmissão são possíveis, portanto é atribuído ao usuário um esquema de modulação de ordem mais alto – tal como 64 QAM – e codificação com alta taxa (códigos turbo de 3/4); por outro lado, quando o canal está em um estado ruim, para se evitar perda de pacotes, é utilizado constelações menores – por exemplo QPSK – e códigos de correção de erros de baixa taxa (códigos turbo 1/3). O conjunto modulação e codificação é chamado de *Modulation and Coding Scheme* (MCS).

Para otimizar o uso de recursos, o AMC geralmente visa manter uma Taxa de Erro de Bloco (*Block Error Rate* (BLER)) da ordem de 10%, enquanto confia no *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ) para fornecer uma taxa de erro de pacote significativamente menor que 1% para a subcamada *Radio Link Control* (RLC). Esse alvo BLER relativamente alto permite que o sistema use MCS alto, aproveitando ao máximo a capacidade do enlace.

### 2.3.3.4 *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ)

Apesar do LTE utilizar esquemas de codificação e modulação adaptativa, é sempre possível que alguns pacotes de dados transmitidos não sejam recebidos corretamente. Portanto, o LTE implementa na sua camada *Media Access Control* (MAC) a técnica de gerenciamento de erro HARQ, que combina o protocolo de retransmissão *Automatic Repeat Request*

(ARQ) e uma técnica de *Forward Error Correction* (FEC).

O HARQ utiliza um codificador turbo para adicionar redundância aos bits de informação possibilitando que o receptor possa recuperar o dado original enviado [43]. Caso o dado não esteja corrompido, o HARQ adota o ARQ enviando uma mensagem de *Acknowledgment* (ACK) para notificação de integridade. Caso contrário, é enviado um *Negative Acknowledgment* (NAK), então o dado não pôde ser decodificado corretamente. Entretanto, à medida que a taxa de retransmissão aumenta, a qualidade do serviço cai, respectivamente, o que pode ser visto diretamente pela qualidade experimentada pelo usuário.

### 2.3.3.5 Arquitetura de rede totalmente baseada em pacotes (IP)

Diferentemente dos padrões anteriores, o LTE foi projetado exclusivamente como uma rede de comutação de pacotes (*Packet Switch* (PS)) fim a fim baseada em arquitetura *Internet Protocol* (IP) com possibilidade de retrocompatibilidade. Tal infraestrutura requer menos nós de interação e uma estrutura hierárquica mais simples para a rede, conseqüentemente acarreta em custos e latência menores.

## 2.3.4 Arquitetura de rede

A arquitetura de rede LTE, chamada de *Evolved Packet System* (EPS), é representada em blocos por seus principais componentes na Figura 2.6. Definida a partir do *Release 8*, a EPS é composta pelo equipamento do usuário, o E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) e o *Evolved Packet Core* (EPC).

O UE, aparelho que os usuários utilizam para conectar a rede, consiste de duas entidades principais: o dispositivo móvel (*terminal equipment*), e um cartão *User Service Identity Module* (USIM), cujo objetivo é armazenar a informação necessária fornecida pelo operador para procedimentos de identificação e autenticação.

A E-UTRAN, composta de apenas um componente, o evolved Node B (eNodeB ou eNB), é responsável, principalmente, por gerenciar aspectos da comunicação de rádio na interface aérea (interface Uu), e outras funções de controle, a qual eram contidos originalmente no *Radio Network Controller* (RNC) em gerações passadas [45].

O EPC – o núcleo da rede – é responsável por funções não relacionadas à rede de acesso, porém necessárias para providenciar uma rede de banda larga móvel completa. Esta dissertação foca na interface aérea do LTE, portanto o detalhamento das funciona-

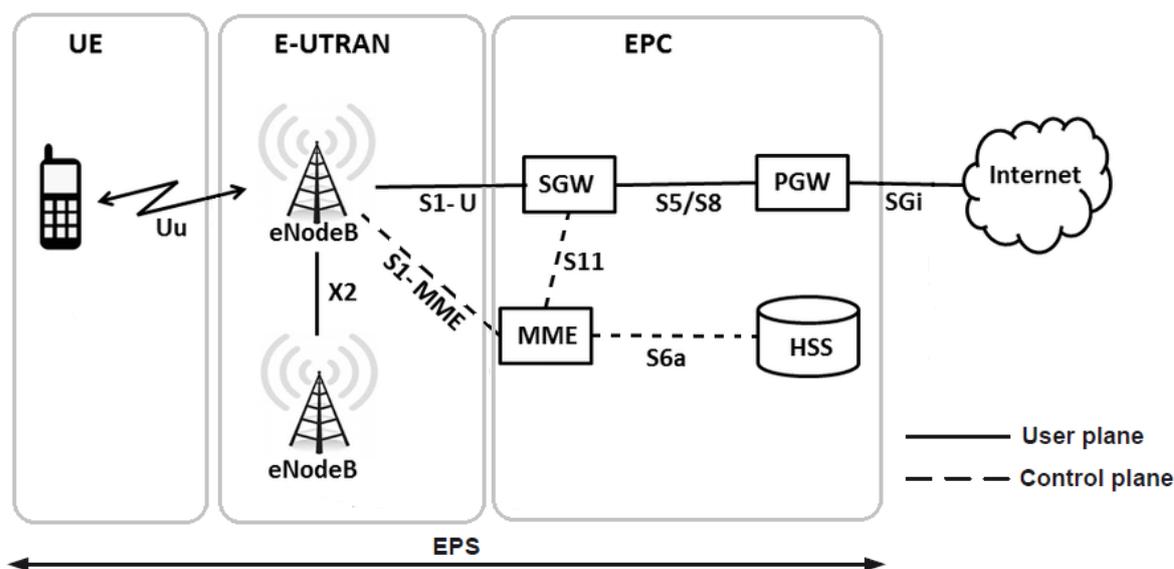


Figura 2.6: Arquitetura da rede LTE [44].

lidades dos principais subcomponentes do EPC podem ser encontrados na documentação TS23.401 do 3GPP [46].

### 2.3.5 Camadas de protocolo na interface rádio

A interface rádio (ou interface aérea) de uma rede sem fio é a interface entre o dispositivo móvel e a estação base, portanto, no caso do LTE, é localizado entre a eNodeB e o UE (ilustrado na Figura 2.7). Como em outros padrões de comunicação, a interface rádio do LTE é projetada com base em uma pilha de protocolos, a qual pode ser dividida em plano de controle (*control plane*), que lida com a sinalização entre nós; e plano de usuário (*user plane*), que lida com o tráfego de dados de interesse do usuário. As camadas relevantes para o planejamento rádio da rede estão listadas:

- MAC é responsável pelo escalonamento (*scheduling*) dos recursos na interface aérea tanto no UL quanto no DL, uma das funcionalidades mais importantes da pilha. É responsável também por satisfazer a QoS demandada pelo serviço do usuário e realizar correção de erro através do HARQ [47].
- *Camada Física* (PHY) lida com questões relacionadas à transmissão/recepção de dados, por exemplo: técnicas de múltiplas antenas, codificação/decodificação, modulação/demodulação, mapeamento do sinal para os recursos físicos apropriados de tempo-frequência, medições de canal, entre outros [48, 49, 50]. A camada física usa blocos de recursos para transmitir informações codificadas em binário no formato

QPSK, 16QAM ou 64QAM para o meio físico.

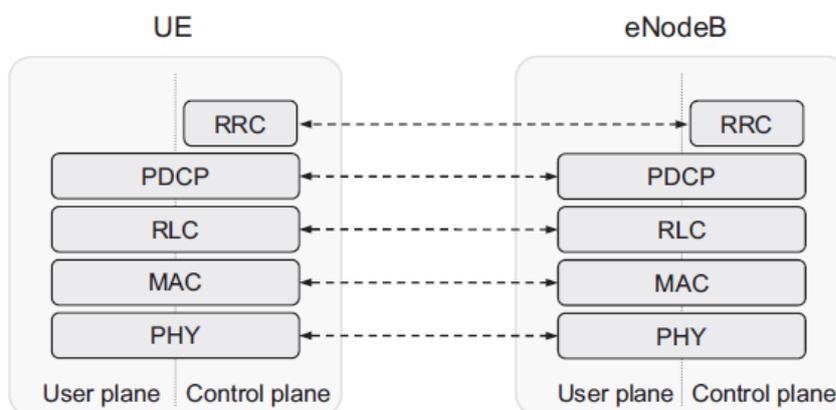


Figura 2.7: Camadas de protocolos na interface rádio do LTE [51].

### 2.3.6 Estrutura de canais

Os fluxos de informações entre as diferentes camadas de protocolos são conhecidos como canais. Estes canais na interface rádio do sistema LTE podem ser dividido em três tipos: canais lógicos, de transporte e físicos, que são distintos pelo tipo de informação nas quais carregam e pela forma nas quais a informação é processada, a fim de apoiar de forma eficiente várias classes de serviços de QoS. O mapeamento desses canais é mostrado na Figura 2.8. Para fins de dimensionamento da interface aérea da rede, focaremos nossa atenção em parte dos canais físicos e dos sinais físicos [52]:

- *Physical Downlink Shared Channel* (PDSCH): canal de dados úteis compartilhado usado para transmissão *unicast* de dados de usuário já escalonados na direção de DL.
- *Physical Downlink Control Channel* (PDCCH): este canal carrega as informações de escalonamento do *uplink* e informa o UE sobre alocação de recursos, além de solicitação de HARQ, etc.
- *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH): similar ao PDSCH, porém contém os dados de transmissão dos usuários na direção de UL.
- *Physical Uplink Control Channel* (PUCCH): este canal transporta HARQ para as transmissões de *downlink*, bem como solicitações de escalonamento e relatórios de indicadores de qualidade de canal (CQI) medidos pelo UE.

- *Cell-specific reference signal* (RS): pesquisa de células e aquisição inicial, medições de qualidade de canal de *downlink*, estimativa de canal de *downlink* para demodulação/detecção coerente no UE e detecção do MIMO.

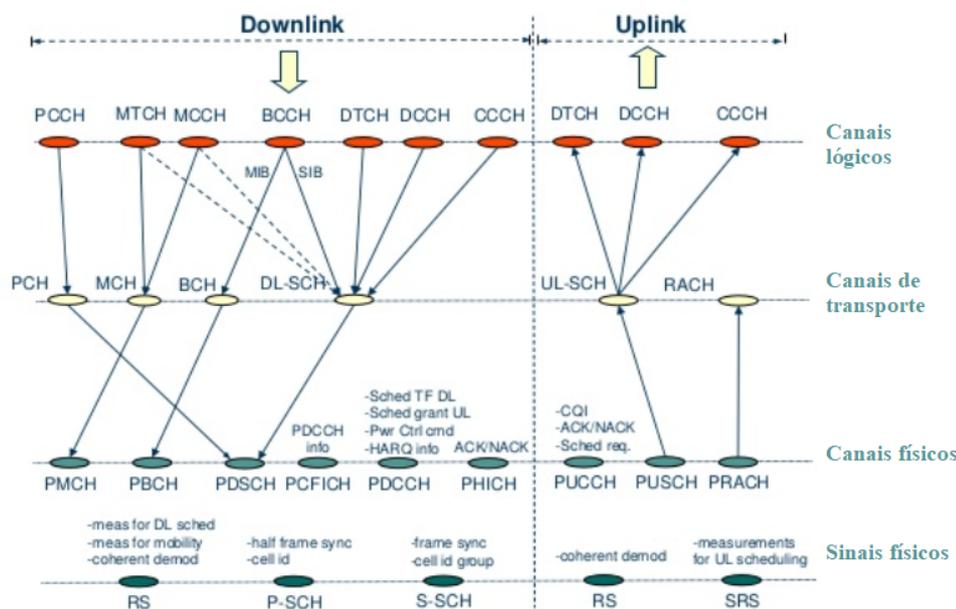


Figura 2.8: Estrutura e mapeamento dos canais LTE presentes no *downlink* e *uplink*.

Os canais físicos estão dispostos entre os diferentes níveis da camada física. Um canal físico corresponde a um conjunto de recursos no tempo-frequência usados para uma transmissão vinda do canal de transporte. Se distinguem por como são mapeados em símbolos e usados por subportadoras no OFDMA através do escalonamento dinâmico em blocos de recursos.

## 2.3.7 Recursos rádio no downlink

### 2.3.7.1 Estrutura de quadro e seus blocos de recursos físicos (PRB - *Physical Resource Blocks*)

A representação de dados no tempo e frequência no LTE é mapeada em um sistema de coordenadas, chamada de grade de recursos (*resource grid*) (Figura 2.9). A coordenada  $x$  de um elemento da grade de recursos indica a posição de um símbolo OFDM no tempo. Por sua vez, a coordenada  $y$  indica a frequência da subportadora OFDM. O elemento de recurso (*resource element - RE*), a menor estrutura de modulação, possui apenas uma subportadora ( $\Delta f = 15$  kHz) no domínio da frequência e um símbolo no domínio do tempo [53]. Cada RE geralmente carrega dois, quatro ou seis bits de canal físico, dependendo se

o esquema de modulação é QPSK, 16QAM ou 64QAM, que apresentam menor e maior eficiência espectral, respectivamente.

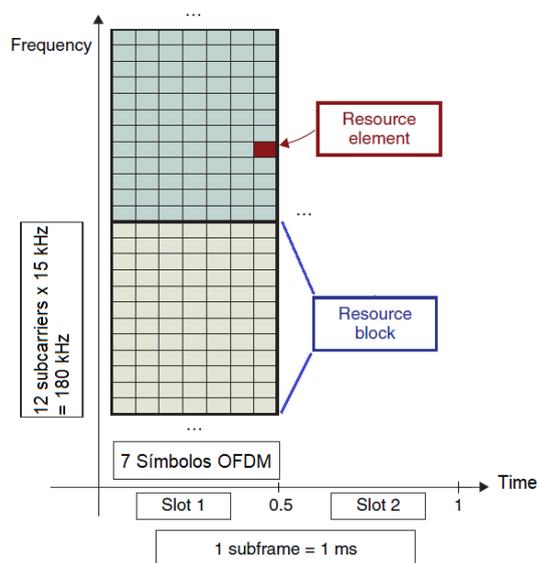


Figura 2.9: Estrutura dos blocos de recursos nos domínios do tempo e da frequência para prefixo cíclico normal.

O LTE trabalha com blocos de recursos (*resource blocks* – RB) que são matrizes bidimensionais de recursos que podem ser utilizadas para transmissão da informação. Ocupam uma largura de banda de 180 kHz, o que corresponde a 12 subportadoras por bloco, com um espaçamento de 15 kHz na frequência e 0,5 ms no tempo, entre portadoras, o que corresponde a 7 símbolos OFDM a cada *time-slot* (Figura 2.9) no caso de um prefixo cíclico normal [54]. As atuais especificações do LTE, para o modo FDD, suportam canais de diferentes larguras de banda, como se apresenta na Tabela 2.3, variando de 1,4 a 20 MHz. Pode-se notar que o número de RB é proporcional à largura de banda. A definição de um bloco de recursos é importante porque representa a menor unidade que o escalonador, da camada MAC, pode atribuir a um usuário.

Tabela 2.3: Relação entre largura de banda e número de blocos de recurso.

Largura de Banda [MHz]	1,4	3	5	10	15	20
Nº RB	6	15	25	50	75	100

Alternativamente existe uma grade de recursos para o prefixo cíclico estendido, que usa seis símbolos por *slot* em vez de sete.

Ao nível da atribuição de recursos rádio, a distribuição de RB a diferentes UE é bastante flexível, tanto no domínio do tempo como no domínio da frequência, o que proporciona uma grande vantagem face às tecnologias precedentes, no sentido em que é

possível realizar ajustes minuciosos para utilizar de uma forma mais eficaz os recursos rádio disponíveis.

### 2.3.7.2 Alocação de recursos

Quem permite os ajustes ao nível da frequência e do tempo é o indicador de qualidade de canal (*Channel Quality Indicator (CQI)*). Ele contém informações reportadas pelo UE para a eNodeB com objetivo de indicar uma taxa de transmissão de DL adequada, isto é, um valor que indica o MCS. O CQI está relacionado diretamente ao parâmetro *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio (SINR)* na recepção.

O CQI determina o MCS, e o MCS determina a quantidade de bits que serão transportados/transmitidos – carga útil alocada –, no bloco de transporte (*Transport Block Size (TBS)*). Pode-se calcular, portanto, a vazão em bits/s (taxa de transmissão) de uma célula para um específico MCS da seguinte maneira:

$$Vazão(bps) = \frac{TBS(bits)}{subframe} \times \frac{n^\circ de TB}{subframe} \times \frac{1000subframes}{s} \quad (2.7)$$

O número de TB/*subframe* depende do modo de transmissão (MIMO) definido pelo 3GPP. Para o modo TM2, seu valor é 1; por outro lado, no modo TM4, seu valor é aproximadamente 2.

O dimensionamento do DL, através do *Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)*, portanto a atribuição de carga útil (*payload*) ou TBS, segue a seguinte sequência:

1. Selecione o CQI desejado na Tabela 3 (difere por vendedor);
2. Identifique o MCS;
3. Utilize a Tabela 7.1.7.1-1 do TS136.213 [55] para identificar o índice de TBS ( $I\_TBS$ ) para o MCS identificado no passo 2;
4. Utilize a Tabela 7.1.7.2.1-1 do TS136.213 [55] para, utilizando o número de RB adequado na banda permitida, identificar o TBS correspondente.

O número encontrado será o TBS por 1 ms (1 subframe) para uma antena.

## 2.3.8 Recursos rádio no *uplink* (SC-FDMA)

### 2.3.8.1 Estrutura de quadro e seus blocos de recursos físicos

Enquanto o DL permite alocação distribuída de *Resource Blocks* (RBs), o UL do LTE exige uma alocação contígua de RBs no domínio da frequência que podem ser alocados a um determinado usuário devido às restrições impostas pelo SC-FDMA [56, 57], como ilustrado na grade de recursos da Figura 2.10. O SC-FDMA também impõe um limite no número máximo de usuários que podem ser escalonados por vez e ordena que o usuário use um único MCS com base em seus piores RBs – ou seja, RB com menor SINR – dentro de um determinado *Transmission Time Interval* (TTI) (1 ms).

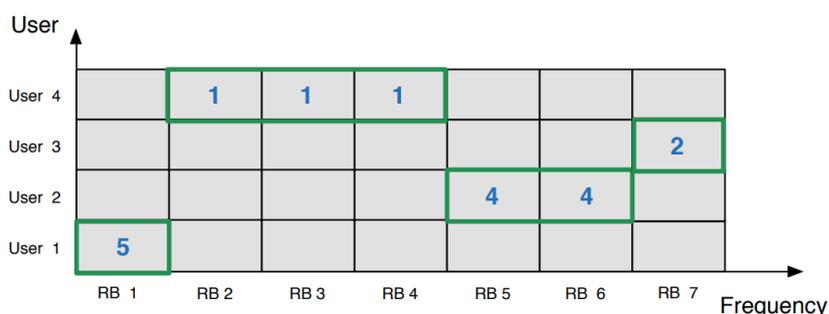


Figura 2.10: Exemplo de alocação de recursos no UL [56].

### 2.3.8.2 Alocação de recursos

O procedimento de cálculo para o UL, através do *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH), utilizado no projeto básico é igual ao efetuado para o DL, excetuando-se o uso da Tabela 8.6.1-1 do TS36.213 [55] no passo 3.

## 2.3.9 Procedimentos na camada física e escalonamento (*scheduling*)

*Scheduling* (escalonamento) no LTE é umas das funcionalidades da camada MAC. A tarefa do escalonador é determinar dinamicamente um conjunto de RBs – o menor recurso que o escalonador pode alocar para um terminal transmitir. Ou seja, é o método de atribuição inteligente de recursos a uma determinada atividade, onde é fornecida a cada UE uma certa quantidade de recursos de rádio no domínio do tempo e da frequência. A determinação da quantidade de recursos alocados para cada UE é feita de acordo com as prioridades dos serviços, a condição do canal, o parâmetro *Quality of Service* (QoS) e demandas de

vazão de cada dispositivo selecionados pelos escalonadores. Aqui estão alguns exemplos de algoritmos de escalonamento da camada MAC:

- *Round Robin* (RR): o objetivo deste método é alocar recursos igualmente aos usuários – quantidade total de recursos divididos pelo número total de usuários na célula.
- *Proportional Fair* (PF): o PF utiliza a informação de qualidade do canal para realizar uma alocação justa de recursos entre os diversos UEs. Por exemplo, em uma situação com dois UEs ativos, mas onde um deles transmite com quatro vezes a velocidade da outra, o escalonador PF irá alocar quatro vezes mais PRBs para o UE com a mais baixa taxa, de forma que a taxa de transmissão seja aproximadamente equivalente. Na prática, os usuários que estão na borda do alcance da estação rádio base consomem mais recursos do que estão nas proximidades, pois o escalonador PF vai forçar uma alocação mais “justa”.
- *Proportional Demand* (PD): o objetivo desse método é alocar recursos para usuários proporcionalmente com sua demanda de vazão. Em outras palavras, as vazões por usuários com alta demanda são maiores do que com baixa demanda.
- *MAX C/I*: o objetivo desse método é alcançar a maior vazão agregada por célula. Isso é feito alocando o máximo de recursos possíveis para atender dispositivos com condição alta de  $C/(I+N)$

Para todos os métodos de escalonamento, os recursos são alocados até atender a demanda de vazão máxima de todos os usuários ou até o escalonador esgotar os recursos.

### 2.3.10 SINR e RSRP

SINR e *Reference Signal Receive Power* (RSRP) são medidas principais da potência do sinal e qualidade de redes LTE modernas:

- RSRP é a potência média linear dos elementos de recurso (RE) que transportam sinais de referência (RS) específicos da célula em toda a largura de banda. O RSRP faz um trabalho melhor ao medir a potência do sinal de um setor específico, excluindo potencialmente o ruído e a interferência de outros setores. Os níveis de RSRP para sinal utilizável geralmente variam de cerca de -75 dBm perto de um local de célula LTE a -120 dBm na borda da cobertura LTE. O RSRP dá uma noção da força do

sinal que recebe da rede, mas não é uma indicação clara de quão boa é a qualidade do sinal [58].

- SINR é a razão entre nível de sinal recebido e a soma de todas as interferências e ruídos. É usado para expressar melhor a relação entre as condições de rádio e a taxa de transferência (vazão). Por exemplo, pode ser usado para calcular o valor CQI. Aqui, o SINR necessário significa o nível mínimo de SINR necessário para decodificar o sinal LTE. A SINR é uma função da potência do sinal recebido,  $S$ ; a interferência entre células e setores adjacentes,  $I$ ; e a potência de ruído térmico,  $N$  (Equação 2.8).

$$SINR = \frac{S}{I + N} \quad (2.8)$$

### 2.3.11 Indicador de qualidade do canal (CQI)

#### 2.3.11.1 O que é? / Para que serve?

O CQI é um número que define a modulação e a taxa de código mais eficientes em que a BLER do canal que está sendo analisado não excede 10% nas condições reais de rádio. Os índices reportados da estação base (*Base Station* (BS)) para o UE são derivados da qualidade do sinal transmitido. O CQI aceita apenas valores discretos entre 0 e 15: o índice 0 indica que o UE não recebe um sinal LTE utilizável e que o canal é inoperável; e o índice 15 corresponde à situação na qual a transmissão atinge seu pico de vazão. O índice de CQI do LTE é associado à medição da SINR do canal, e também pela capacidade de processamento de sinais do UE [42].

Portanto, para dimensionar adequadamente a rede, é preciso atribuir o CQI desejado nas regiões de interesse da célula, isto é, a indicação apropriada dos recursos alocados para o receptor em uma determinada distância do transmissor.

#### 2.3.11.2 Tabela de CQI (CQI x modulação x taxa do código x eficiência)

Como mencionado anteriormente, o principal critério para o UE determinar o valor CQI é o SINR. O mapeamento exato, entretanto, entre o SINR medido e o CQI pode variar um pouco dependendo de cada fabricante dos equipamentos receptores, porém, em geral, a relação entre CQI e SINR é semelhante. Cada fabricante mantém sua própria tabela de mapeamento, mas, na maioria dos casos, os fornecedores não abrem essas tabelas em

público. Portanto, é utilizada uma tabela genérica (Tabela 2.4) [59] para a determinação do CQI.

Tabela 2.4: Mapeamento entre CQI, SINR e MCS em 5MHz [59].

CQI	SINR (dB)	Modulação	Bits /símbolo	MCS	Taxa de codificação	Bits úteis /símbolo
1	-6,5	QPSK	2	0	0,076	0,1523
2	-4	QPSK	2	1	0,12	0,2344
3	-2,6	QPSK	2	2	0,19	0,3770
4	-0,1	QPSK	2	5	0,3	0,6016
5	1	QPSK	2	7	0,44	0,8770
6	3	QPSK	2	9	0,59	1,1758
7	6,6	16QAM	4	12	0,37	1,4766
8	10	16QAM	4	14	0,48	1,9141
9	11,4	16QAM	4	16	0,6	2,4063
10	11,8	64QAM	6	20	0,45	2,7305
11	13	64QAM	6	23	0,55	3,3223
12	13,8	64QAM	6	25	0,65	3,9023
13	15,6	64QAM	6	27	0,75	4,5234
14	16,8	64QAM	6	28	0,85	5,1152
15	17,6	64QAM	6	29	0,93	5,5547

### 2.3.12 Indicador de classe de QoS (QCI) para LTE

Para garantir que o tráfego em redes LTE seja tratado adequadamente, é necessário um mecanismo para classificar os diferentes tipos de classes, com cada classe tendo parâmetros de QoS apropriados para o tipo de tráfego, ou seja, as características de QoS do pacote transmitido no LTE. Caracteriza-se pelo tipo de recurso (taxa de bits garantida (*Guaranteed Bit Rate* – GBR) ou não garantida (n-GBR)), prioridade, atraso de pacote e taxa de erro de pacote. Esse mecanismo geral é chamado *QoS Class Identifier* (QCI) (Tabela 2.5).

O QCI é estratificado a partir da faixa de classe de 1 a 9, através da conexão lógica entre entidades da rede (PDN-GW e o UE). É importante ressaltar que a partir do *Release* 12 (TS 23.203) do 3GPP, 4 QCIs adicionais (65, 66, 69, 70) foram definidos para serviços aplicados à segurança pública como o PTT.

Tabela 2.5: QoS Class Identifier.

QCI	Tipo de recurso	Prior.	Atraso máximo de pacote	Taxa de erro de pacote	Serviços de exemplo
1	GBR	2	100ms	$10^{-2}$	Conversação por voz
2	GBR	4	150ms	$10^{-3}$	Vídeo conversacional ( <i>streaming</i> ao vivo)
3	GBR	3	50ms	$10^{-3}$	Jogos em tempo real
4	GBR	5	300ms	$10^{-6}$	Vídeo não conversacional ( <i>streaming</i> com <i>buffer</i> )
5	n-GBR	1	100ms	$10^{-6}$	Sinalização IMS
6	n-GBR	6	300ms	$10^{-6}$	Vídeo ( <i>streaming</i> com <i>buffer</i> ), TCP (www, email, chat, ftp)
7	n-GBR	7	100ms	$10^{-3}$	Voz, Vídeo ( <i>streaming</i> ao vivo), jogos interativos
8	n-GBR	8	300ms	$10^{-6}$	Vídeo ( <i>streaming</i> com <i>buffer</i> ), TCP (www, email, chat, ftp)
9	n-GBR	9	300ms	$10^{-6}$	Vídeo ( <i>streaming</i> com <i>buffer</i> ), TCP (www, email, chat, ftp)
65	GBR	0.7	75ms	$10^{-2}$	MCPTT
66	GBR	2	100ms	$10^{-2}$	non-MCPTT
69	n-GBR	0.5	60ms	$10^{-6}$	sinalização MCPTT
70	n-GBR	5.5	200ms	$10^{-6}$	Serviços do QCI 6 aplicados à missão crítica

### 2.3.13 Coordenação de interferência intercelular (ICIC)

A localização do terminal mais crítica para alocação de recursos da rede encontra-se na borda das células, quando o nível de interferência é mais alto e, portanto, o valor de SINR é mais baixo. Porém, uma sobreposição suficiente nas áreas de borda é necessária para garantir um nível de serviço suficientemente alto e uma baixa taxa de queda de chamadas.

A presença de um algoritmo *Inter-Cell Interference Coordination* (ICIC) visa mitigar a interferência entre células adjacentes e setores do mesmo sítio. Como esse método aloca recursos espectrais para as bordas das células, melhora-se o desempenho nos limites da área de cobertura, em contrapartida diminui-se a banda disponível. Sem reutilização de frequência, o fato das células vizinhas usarem os mesmos blocos de recursos leva a alta interferência e baixa qualidade de sinal nas bordas das células.

Há diversos tipos de algoritmos ICIC que podem ser utilizados no planejamento: *Time-switched FFR*, *Hard FFR*, *Soft FFR*, e *Partial Soft FFR* [60] são alguns exemplos usando a reutilização de frequência fracionária (FFR).

No *soft FFR* (Figura 2.11), algoritmo considerado neste planejamento, parte do espectro de frequência, cujo tamanho do bloco é livre, está associado a usuários do centro da célula. Os demais blocos de frequência atendem apenas os usuários localizados na borda da célula. As bordas das células vizinhas são cobertas por diferentes blocos de recursos complementares para evitar interferências.

Dois parâmetros são relevantes a serem consideradas na execução do algoritmo *soft FFR*:

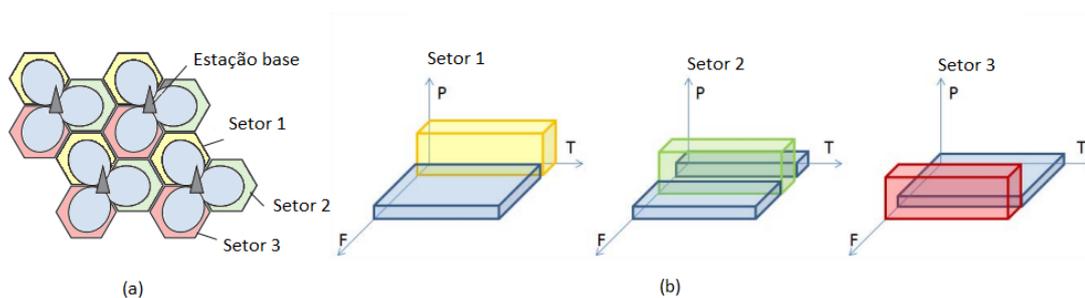


Figura 2.11: Método de alocação de frequência (*Soft Fractional Frequency Reuse*) para sistemas celulares.

- *Cell-edge power boost* (DL) (dB): No *soft FFR*, os blocos de recursos borda de célula de DL podem ser transmitidos com maior potência do que outros. Isto é, a razão da potência transmitida nos blocos de recursos de borda de célula em relação à potência transmitida em blocos de recursos do centro de célula.
- *Cell edge margin* (dB): A diferença máxima entre a perda de caminho do segundo melhor servidor (célula vizinha) e a perda de caminho do melhor servidor a ser considerado na borda da célula. Tal diferença estabelece a borda da célula, região a ser atribuída uma fração de frequência.

Vale ressaltar que se nenhuma configuração de quadro foi definida para uma célula usando ICIC estático, o Atoll – software de simulação adotado no estudo – considera que os blocos de frequência do grupo 0, 1 e 2 correspondem ao primeiro, segundo e terceiro 1/3 do número total de blocos de frequência, respectivamente.

### 2.3.14 Identificador da célula física (PCI)

O ID da célula física (*Physical Cell Identifier* (PCI)) é o identificador, único e inteiro, de 0 a 503, de uma célula na camada física. Os PCIs são agrupados em 168 grupos de IDs de células únicos (chamados IDs SSS), variando de 0 a 167; com cada grupo contendo 3 identidades únicas (chamadas IDs PSS), variando de 0 a 2 [61]. Cada célula, portanto, transmite uma sequência pseudoaleatória correspondente ao seu PCI para ser reconhecida pelos usuários. Como esta propriedade é limitada a 504 valores, é preciso ser reaproveitada na rede. Se a atribuição de PCI for mal planejada, o risco de conflitos de rede é alto. Quando a rede aqui proposta for estabelecida, será necessário implementar um mecanismo de atribuição de PCI, de acordo com a definição mostrada na Equação 2.9 [62].

$$PCI = 3 \times ID\ SSS + ID\ PSS \quad (2.9)$$

## 2.4 Comunicações críticas

### 2.4.1 Principais características

#### 2.4.1.1 Definição

Uma missão é crítica quando sua falha compromete a vida de um ou mais seres humanos, ou coloca em risco outros fatores importantes para a sociedade ou a economia [63]. Agências de proteção pública e socorro em desastres, frequentemente empregadas em missões críticas, não podem correr o risco de ter falhas na transmissão de voz e dados, ou ligações espionadas por terceiros. Nesses casos, qualquer pequena degradação do suporte de comunicação aos agentes em campo pode provocar consequências de grande impacto. *Comunicações Críticas* (CC) devem ser efetivas, rápidas, confiáveis, seguras e interoperáveis quando for possível. A eficiência de uma operação de emergência é dependente da troca de informações em tempo real.

#### 2.4.1.2 Tecnologias legadas

Durante muitos anos, três tecnologias de comunicação digital (TETRA, DMR e Project 25) foram as mais empregadas por agências PPDR no mundo, chamadas de *land mobile radio* (LMR) ou *private mobile radio* (PMR), entretanto foram concebidas na década de 90 e com adoção não unificada entre diferentes forças no mundo. Classificadas como tecnologias de banda estreita (Tabela 2.6), atuam, principalmente, em serviços centrados em voz, e aplicações que demandam baixa taxa de dados [1].

A LMR é um sistema de comunicação de rádio bidirecional que permite aos usuários compartilharem a mesma faixa de frequência de comunicação entre si. As redes LMR são operadas principalmente em bandas de VHF ou UHF, e são essenciais para a operação bem-sucedida em aplicações de segurança pública de missão crítica [65]. As faixas de frequência, neste sistema, são troncalizados, atribuídas de forma não estática e dedicada a grupos de usuários. No entanto, eles são atribuídos a um conjunto de frequências e estão disponíveis para os usuários acessarem quando necessário. Essas frequências são geralmente controladas e gerenciadas por um equipamento específico conhecido como controlador central. Os usuários de rádio no sistema de rádio troncalizado são normalmente

Tabela 2.6: Comparação técnica entre várias tecnologias de rádio digital troncalizado [64]

	Terrestrial Trunked Radio (TETRA)	Project 25 (P25)	Digital Mobile Radio (DMR)
Padronização	ETSI	APCO-25	ETSI
Método de acesso	TDMA	FDMA (fase 1) TDMA (fase 2)	TDMA
Esquema de modulação	$\frac{\pi}{4}$ DQPSK	H-DQPSK /H-CPM	4FSK
Largura de banda por canal	25 KHz	12,5 KHz	12,5 KHz
Nº de <i>slots</i> de tempo por canal	4	2	2
Taxa de dados máx. por canal	28,8 kbps	9,6 kbps	9,6 kbps

atribuídos a grupos de conversação (em vez de bandas de frequência). Além disso, cada banda de frequência disponível é atribuída dinamicamente a um grupo de conversação por um período específico de tempo para permitir que os usuários neste grupo se comuniquem uns com os outros. No sistema troncalizado, os usuários ociosos continuam ouvindo o mesmo canal compartilhado chamado canal de controle, que normalmente é usado para sinalizar a transmissão para todos os dispositivos de comunicação do sistema. Sempre que um usuário em um determinado grupo de conversa pressiona um botão *Push-to-Talk* (PTT), a mensagem de solicitação será gerada automaticamente e enviada a um controlador central via canal de controle. Essa mensagem geralmente contém identificação (ID), grupo de conversação e uma solicitação de atribuição de canal de voz. Assim, todos os usuários neste grupo de conversação serão conseqüentemente comutados para um dos canais de voz disponíveis em um conjunto de frequências.

#### 2.4.1.3 Padronização 3GPP e emprego da tecnologia LTE para Comunicações Críticas

A evolução dos serviços de missão crítica (MCX) ocorreu a partir do *Release 13* com o suporte dos principais serviços, principalmente *Mission Critical Push-To-Talk* (MCPTT), *Mission Critical Data* (MCData) e *Mission Critical Video* (MCVideo). A evolução posterior ocorreu por meio do interfuncionamento com sistemas legados (LMR) e da expansão para outras indústrias verticais que dependem de comunicações críticas, como Ferrovias (*Railways*) (Figura 2.12) [66].

Introduzido no *Release 13*, o MCPTT oferece suporte a serviços de comunicação de voz entre um par de usuários ou um grupo de vários usuários, com recursos como chamadas em grupo e chamadas privadas. Além de fornecer comunicações dentro de grupos

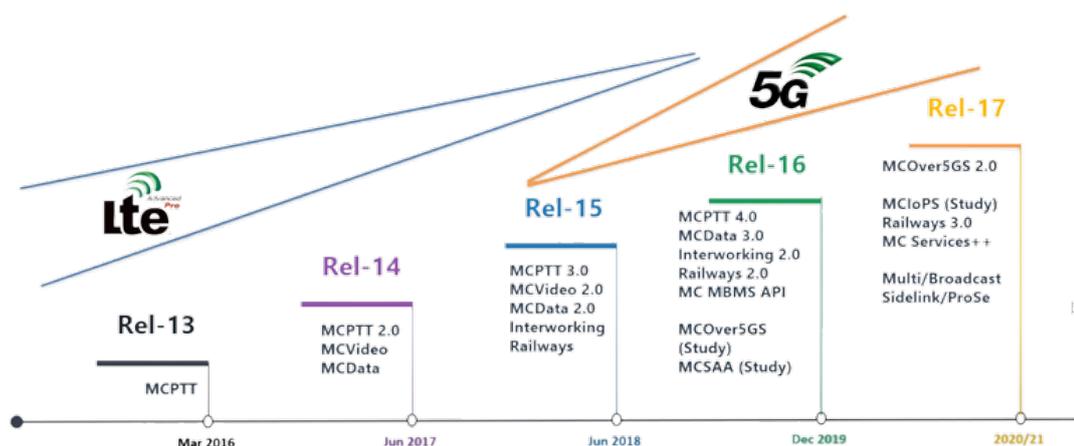


Figura 2.12: Evolução dos padrões de serviços 3GPP de missão crítica [66].

pré-definidos, o MCPTT também permite que os administradores meschem vários grupos ou usuários em tempo real para um tratamento eficaz dos incidentes relatados por voz [67]. Introduzido no *Release* 14, o MCDData oferece funcionalidades de mensagens, distribuição de arquivos e *streaming* de dados, o que permite que os usuários de segurança pública possam compartilhar mensagens de comando pré-configuradas e relatar instantaneamente fotos e vídeos do incidente relatado para a sala de controle, o que ajuda a aumentar a consciência situacional e a melhorar a tomada de decisões entre os despachantes. Também introduzido no *Release* 14, o MCVideo permite que os usuários de segurança pública aproveitem os recursos de comunicação de vídeo, incluindo chamadas de vídeo em grupo e privadas. O MCVideo suporta transmissão em tempo real de vídeo, o que ajuda os despachantes a tomar decisões precisas; e permite que os usuários marquem suas comunicações de vídeo como “emergência” para elevar a prioridade da comunicação [68].

Sistemas LMR são amplamente implantados há mais de duas décadas por agências de segurança pública em todo o mundo. Portanto, substituir a tecnologia legada por padrões de serviços MCX baseados em 3GPP é um processo que pode levar alguns anos (por exemplo, devido a contratos de longo prazo e orçamento) [66]. Sob essas condições, os sistemas legados continuam existindo e, portanto, a interoperabilidade baseada em entre os sistemas LMR e LTE é considerada um recurso fundamental por muitas agências de segurança pública. A implantação de soluções de interfuncionamento facilitaria a transição de tecnologia legada para tecnologia moderna e reduziria custos. O 3GPP concluiu a padronização de interfuncionamento com sistemas LMR como parte do *Release* 16, fornecendo uma estrutura para as funcionalidades básicas necessárias para interfuncionamento de serviços MCPTT e MCDData com sistemas LMR legados [69].

Os avanços na tecnologia 5G, juntamente com futuros lançamentos de recursos de

aplicativos baseados em 3GPP, trarão novos benefícios para o setor de comunicações críticas. Simplificando, a conectividade de alta velocidade e ultraconfiável com latência extremamente baixa permitirá que os serviços MCX sejam mais sofisticados, confiáveis e inteligentes. Apesar do avanço do 5G, o mercado está focado no desenvolvimento de equipamentos 4G MCX, e ainda não há equipamentos 5G MCX disponíveis no mercado, apenas o começo de sua padronização.

#### 2.4.1.4 Principais sistemas no mundo

O uso de redes privadas sem-fio, normalmente governamentais, para emprego no cenário PPDR é de grande interesse no mundo todo. Há relevantes associações de âmbito mundial (TCCA [30], APCO [31]), que congregam a indústria de equipamentos, operadoras e pesquisadores, trabalhando em prol da padronização e desenvolvimento dessas redes. Dada a importância dessa questão, muitos países realizaram esforços para criarem redes de comunicação crítica em âmbito nacional, garantindo a interoperabilidade entre as diversas agências e padronização de equipamentos e de procedimentos. Os casos de maior destaque são a rede norte-americana FirstNet [70], a britânica ESN [71], e a sul-coreana Safe-Net [72], ambas baseadas na tecnologia LTE.

### 2.4.2 Aplicações típicas em comunicações críticas

As RCC possuem requisitos para aplicações e de desempenho que as diferenciam das redes comerciais [73, 63]. Serviços como PTT, criação de grupos, possibilidade de comunicação direta entre terminais (sem uso de eNodeB), comunicação entre agentes e centrais de despachos, controle (priorização) e coordenação das comunicações são exemplos das demandas exigidas para essas redes, e que não são contempladas nas tecnologias usuais de redes sem fio.

### 2.4.3 Caracterização do tráfego de dados em situações críticas

Um pré-requisito para realização de uma análise de RF é um modelo de tráfego que caracterize as transmissões de voz, dados e vídeo na rede. Motivados, principalmente, pela necessidade de estimar a quantidade de espectro de rádio necessária para PPDR de banda larga, várias organizações na Europa criaram uma lista de aplicativos com base em sua experiência operacional atual e sua visão de práticas de trabalho futuras. Esses estudos envolveram agências governamentais PPDR e foram liderados pelo *Radio Communication*

*Experts Group* (RCEG) sob os auspícios da *Law Enforcement Working Party* (LEWP), um grupo de trabalho preparatório do Conselho da União Europeia (EU) que participa nos processos legislativos da EU na área da aplicação da lei [74].

Após discussões com os representantes dos estados membros da EU, uma lista de solicitações foi consolidada, chamada Matriz de Solicitações LEWP/ETSI (referida como a “Matriz LEWP/ETSI”, disponível publicamente como um arquivo formato XLS [75]). A Matriz LEWP/ETSI constitui uma caixa de ferramentas de aplicações PPDR a serem utilizadas individualmente ou em diferentes combinações conforme as demandas da situação operacional atendida. O escopo da matriz inclui aplicativos de dados móveis de banda estreita e banda larga: dados de localização, multimídia, download de informações operacionais, *upload* de informações operacionais, consulta a banco de dados online, entre outros. Esses aplicativos não estão vinculados a nenhuma tecnologia específica. Para cada aplicação, a Matriz LEWP/ETSI captura os seguintes requisitos/características:

- Taxa de transferência: fornece uma estimativa aproximada e qualitativa da taxa de transferência relativa necessária para que o aplicativo forneça a qualidade de serviço adequada;
- Uso: fornece uma estimativa do número de vezes que um determinado aplicativo é usado por mês e por usuário;
- Usuários: estimativa do número relativo de usuários de uma determinada aplicação em um cenário operacional típico de PPDR;
- Mobilidade: indica se o aplicativo é usado em movimento ou de posições fixas;
- Fatores de correção de capacidade de dados necessária dependente fortemente do tipo de cenário operacional: operações do dia a dia, grandes eventos de emergência/públicos e cenários de desastres.

# Capítulo 3

## Conceitos sobre Planejamento Rádio de uma Rede LTE

### 3.1 Processo de planejamento da rede rádio

O principal objetivo do planejamento da rede de rádio é fornecer uma solução econômica e eficiente para as localidades das antenas da rede de rádio em termos de cobertura, capacidade e qualidade [76].

O processo de planejamento (Figura 3.1) da rede de rádio começa com a coleta dos requisitos de rede de capacidade, cobertura e qualidade. Essas entradas são, então, utilizadas para fazer os planos teóricos de cobertura e capacidade. A definição de cobertura inclui a definição de áreas de cobertura, probabilidade de serviço e intensidade de sinal relacionada. A definição da capacidade requer o conhecimento do perfil do assinante e do tráfego na região a ser atendida, da disponibilidade das faixas de frequência e do desempenho dos equipamentos associados à rede.



Figura 3.1: Processo de planejamento da rede rádio [77].

O processo de pré-planejamento resulta nos planos teóricos de cobertura e capacidade. Embora um dos objetivos do planejamento de cobertura seja estabelecer o número mínimo de locais de antenas para produzir a cobertura necessária, é necessário o equilíbrio (*trade-off*) entre cobertura e capacidade, pois os requisitos de capacidade média da célula podem necessitar do aumento no número de sítios de antenas. Candidatos ao local, através do *site survey*, são procurados e um desses candidatos é, então, selecionado com base nas

entradas do planejamento de transmissão. Após a seleção do local, a atribuição do canal de frequência para cada célula é feita de forma que cause o mínimo de interferência e a qualidade desejada seja mantida [76]. A alocação de frequência é baseada na SINR célula-a-célula e setor-a-setor. Planos de parâmetros são feitos para cada um dos sítios, contendo um conjunto de parâmetros para cada célula usada no lançamento inicial da rede, otimização futura e expansão. O plano de rádio final consistiria nos planos de cobertura, estimativas de capacidade, planos de interferência, planos de conjunto de parâmetros e planos de frequência [77].

## 3.2 *Link budget* e planejamento de cobertura

### 3.2.1 Objetivos do *link budget*

O cálculo de enlace (*Link Budget* (*Link Budget* (LB))) é uma das principais etapas realizadas no planejamento celular. O objetivo é identificar a perda de caminho máxima permitida (*Maximum Allowed Path Loss* (MAPL)) entre transmissor e receptor, através de um balanço de potência, conforme ilustrado Figura 3.2, para que os usuários alocados nas bordas das células tenham condições de utilizar o sistema com qualidade minimamente desejável. A partir da MAPL, é calculado o raio da célula considerando diferentes morfologias de terreno (urbano denso, urbano, suburbano etc) baseado em um modelo de propagação apropriado.

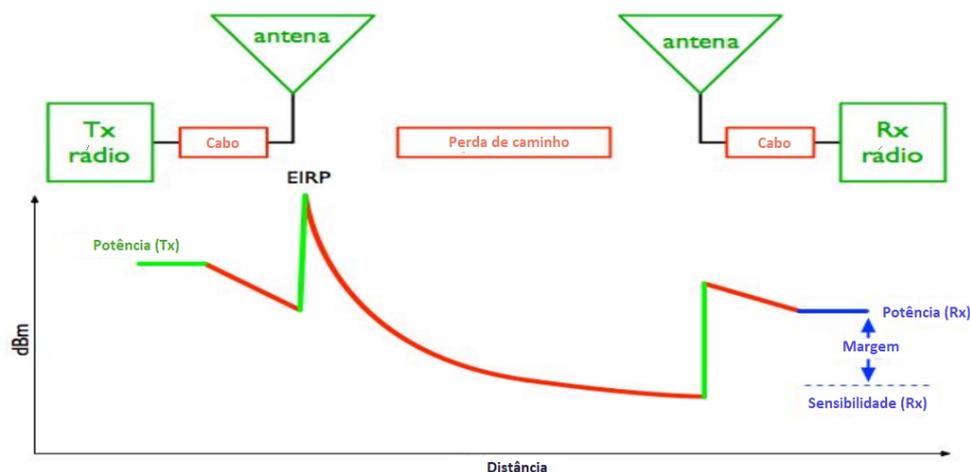


Figura 3.2: Ganhos e perdas em um sistema rádio sem fio.

### 3.2.2 Componentes importantes do *link budget*

#### 3.2.2.1 Confiabilidade de cobertura de sombreamento log-normal

O *link budget* fornece o nível de potência média do transmissor ao receptor, e deve considerar efeitos aleatórios sobre a potência do sinal, tal como o sombreamento (do inglês *shadowing*), também denominado de desvanecimento de larga escala [78].

A margem de sombreamento é calculada para uma determinada probabilidade de cobertura na borda da célula. Esta probabilidade corresponde à confiabilidade da cobertura que se deseja alcançar nesta região. Por exemplo, uma probabilidade de cobertura razoável da extremidade da célula de 95% (valor recomendado para comunicações críticas [79]) significa que os usuários ali localizados receberão um nível de sinal adequado durante 95% do tempo, em média. A distribuição gaussiana (em dB) com média zero e com desvio padrão, que depende do cenário considerado, conforme mostrado na Tabela 3.1, é usada para realizar o cálculo da confiabilidade na borda da célula.

Tabela 3.1: Valores típicos de desvio padrão para margem de sombreamento [80].

Cenário	Desvio padrão do desvanecimento lento (dB)	Margem para 95% de cobertura (dB)
Urbano denso	10	20
Urbano	8	16
Suburbano	6	12
Rural	6	12

A fórmula para cálculo da probabilidade de cobertura ( $P_m$ ) é dado pela Equação 3.1 [78].

$$P_m = 1 - Q\left(\frac{M_s}{\sigma}\right) \quad (3.1)$$

onde  $M_s$  é a margem de potência que deve ser considerada no LB devido ao efeito do sombreamento.

Logo a  $M_s$  pode ser obtida através da Equação 3.2.

$$M_s = Q^{-1}(1 - P_m) \times \sigma \quad (3.2)$$

Por sua vez, a função Q é expressa por:

$$Q(z) = \int_z^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{\left(\frac{-y^2}{2}\right)} dy \quad (3.3)$$

### 3.2.2.2 Análise do ruído de fundo e sensibilidade do receptor

Supondo que a largura de banda de operação do receptor seja  $Bw$  (em MHz), e a figura de ruído seja  $N_f$  (em dB), o nível de ruído equivalente do receptor é obtido através da Equação 3.4:

$$N_o = -174 + 10\log(Bw) + N_f(\text{em dB}) \quad (3.4)$$

Se a razão da portadora-interferência ( $C/I$ ) mínima (em dB) do sistema de recepção para um esquema de modulação específico (MCS) é  $(C/I)m$ , então a sensibilidade teórica de recepção do eNodeB é a dada pela Equação 3.5.

$$S_o = N_o + (C/I)m \quad (3.5)$$

O nível de ruído afeta diretamente a sensibilidade de recepção do eNodeB, ou seja, quando o nível de ruído aumenta em 1 dB, a sensibilidade de recepção do eNodeB aumenta em 1 dB.

Para o LTE, a sensibilidade é calculada por subportadora ( $\Delta f = 15000\text{Hz}$ ) em vez de toda a alocação de canal como no GSM, WCDMA ou WiMAX, porque é a largura de banda básica que precisa ser demodulada em cada UE.

O ruído Johnson-Nyquist (térmico), por sua vez, é aproximadamente branco, o que significa que sua densidade espectral de potência à temperatura ambiente é constante em todo o espectro de frequência, no valor de  $-174 \text{ dBm/Hz}$ .

### 3.2.2.3 Perdas e ganhos associados a equipamentos da rede

Para garantir um enlace confiável, o nível de potência disponível para o receptor deve ser maior do que o necessário para um nível mínimo de recepção. Portanto é necessário a consideração de todos fatores de ganhos e perdas envolvidos nesse sistema [81]:

- Perdas de conectores e cabos: como os cabos e conectores são usados na transmissão de energia, as perdas incorridas devido ao seu uso devem ser levadas em considera-

ção. Os valores de atenuação dos cabo são geralmente mencionados em perda (dB) por 100m. As perdas do conector são geralmente menores do que 0,1dB;

- Ganho de antena: as antenas utilizadas nas eNodeBs e nos UEs têm níveis de ganho significativamente diferentes. A antena da UEs tem um ganho menor, da ordem de 0dBi, por se tratar de antenas omnidirecionais; enquanto o ganho da antena da eNodeBs tem valores de 15 a 21dBi, com feixes direcionais e normalmente apontados para um setor específico. Esses ganhos podem ser aumentados usando diferentes técnicas, como diversidade de antenas (tanto no UL quanto no DL);
- Sensibilidade do receptor: é definida como o nível de sinal mais fraco que um receptor consegue distinguir do ruído. Uma eNodeB é um equipamento mais robusto, portanto apresenta valores mais favoráveis de sensibilidade quando comparada ao UE.

#### 3.2.2.4 Classificação do cenário de operação

No *link budget*, a distância máxima (raio da célula) que um sinal emitido percorre com o mínimo de qualidade, calculada a partir de um modelo de propagação apropriado, depende das características do cenário de cobertura. Para esta análise, portanto, as áreas-alvo de cobertura são classificadas em diferentes morfologias: áreas metropolitanas ou urbanas densas, urbanas, suburbanas e rurais. A descrição das características dessas áreas é mostrada abaixo [17]:

- Áreas metropolitanas/urbano denso: neste cenário, os edifícios estão densamente distribuídos, e a altura média excede os 30 m. Em certas áreas, essas edificações são distribuídas em ordem, cuja a distância entre elas é estreita. A distância média entre edifícios é de cerca de 10 m a 20 m. A maioria das ruas que não são avenidas principais são estreitas. Essas áreas são densamente povoadas.
- Urbano: neste cenário, a altura média dos edifícios é de cerca de 20 m, onde a distância média entre os edifícios é semelhante às suas alturas médias. Essas áreas contêm um certa quantidade de espaços abertos e vegetação.
- Suburbano: neste cenário, a altura média dos edifícios é de cerca de 10 m. Os edifícios estão espalhados e a distância média entre eles é de 30 a 50 m. As ruas são largas. Tais áreas podem conter muita vegetação e muitos espaços abertos.

- Rural: nesse cenário, os edifícios são escassos e a altura média dos edifícios é de cerca de 5 m. Tais áreas tendem a conter vastos espaços abertos, campos, vegetação e estradas.

### 3.2.3 Considerações sobre o *link budget*

O LB é um cálculo teórico e não garante, em princípio, a capacidade nem a confiabilidade da cobertura de um sistema real, pois pressupõe um relevo uniforme, terreno simples e localizações de sítios ideais. A simulação do sistema – com auxílio de um *software* específico –, por sua vez, cobre a distribuição detalhada do relevo, a localização real do sítio, o tipo de terreno e a distribuição dos usuários. Portanto, o LB serve como uma estimativa inicial. O raio de cobertura calculado é usado como referência para a etapa posterior de simulação da rede e de *site survey*.

A perda de caminho máxima permitida é calculada baseada no nível mínimo que se deseja de SINR para a borda da célula. O menor valor de MAPL nas direções DL e UL é convertido em raio de célula, utilizando um modelo de propagação apropriado na área de atuação.

Um exercício de dimensionamento completo deve considerar a direção UL, além da DL, e encontrar um equilíbrio entre eles. Uma célula que atinge um raio maior no DL em comparação com o UL, ou vice-versa, é considerada desequilibrada e resultaria em desempenho indesejável. A Figura 3.3 mostra um projeto de rede baseado em LB no DL, mas não correspondido pelo UL; os usuários na área azul têm boa recepção da célula no DL, mas não conseguem estabelecer conexões no UL. Esse desequilíbrio ocorre devido, principalmente, ao fato de que a potência transmitida total do UE é menor que a da eNodeB, visto as limitações técnicas de um dispositivo móvel (e.g., potência de transmissão de 23 dBm para o UE Cat 4).

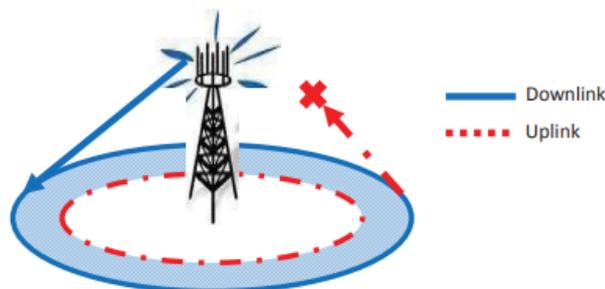


Figura 3.3: Uma célula com melhor cobertura de *downlink* do que o *uplink* [82].

Portanto, o raio estimado para o UL sempre será menor que o do DL. Logo a decisão

do raio da célula e, por conseguinte, o número de células, deve se basear no UL.

## 3.3 Planejamento de capacidade

### 3.3.1 Conceituação e objetivos

O estudo da capacidade se baseia no dimensionamento dos recursos da rede para atender a um número de usuários conectados. Ele surge da necessidade de atender corretamente a demanda por serviços, evitando que usuários tenham seu acesso à rede negado ou que tenham qualidade de serviço abaixo do esperado.

### 3.3.2 Fatores que impactam a capacidade no LTE

É essencial que sejam considerados adequadamente os fatores que afetam diretamente a capacidade, podendo impactar a oferta de serviços/aplicações da rede e suas demandas de pico em curto prazo. Em geral, os seguintes atributos são os principais fatores que afetam a vazão fornecida aos usuários da rede.

- Banda de frequência operacional: as características de propagação e penetração do sinal determinarão o número de sítios que precisam ser construídos para cobrir a área designada, e isso depende diretamente da banda de frequências empregada;
- Largura de banda: há uma relação direta entre o espectro disponível e a capacidade da célula;
- A cobertura pelo RSRP: é um indicador importante de um bom nível de serviço no que se refere à taxa de transferência. Embora a interferência entre células não seja refletida pelo nível RSRP, ainda é um forte indicador do nível de desempenho da rede;
- Interferência: é um dos principais contribuintes para a degradação da capacidade na borda da célula. A vazão por usuário diminuirá conforme o número de usuários na célula aumenta devido ao compartilhamento de recursos em células e setores adjacentes. O controle de interferência ICIC é o fator mais importante na proteção da capacidade da célula;
- SINR: a necessidade de alto SINR para alcançar um alto rendimento no enlace, e a tecnologia de modulação adaptativa é perfeita para atender a tal exigência;

- Potência do transmissor: o impacto é especialmente óbvio para os usuários na borda da célula, pois a eNodeB provavelmente precisará alterar a alocação do MCS devido à potência do rádio e à qualidade percebida pelo usuário da borda da célula. A probabilidade dos usuários da borda da célula superarem a interferência das células vizinhas também dependerá muito da potência do transmissor de rádio instalado e disponível no local da célula;
- Aplicação da técnica MIMO: é um recurso crítico do ponto de vista de planejamento, pois pode melhorar a cobertura aumentando o SINR e/ou a capacidade;
- Características do UE: UEs de tecnologia inferior resultam em baixa eficiência de utilização de recursos, diminuindo assim a taxa de transferência geral da célula. Por exemplo. UE do tipo CAT-4 pode suportar no máximo 16QAM no *uplink*, isso afeta a taxa de transferência do UL do usuário;
- Modelo de tráfego: os aplicativos centrados em dados PPDR podem ter requisitos de taxa muito diferentes, proporcionando níveis variados de demanda na capacidade de uma rede móvel de banda larga. A estimativa da carga na rede para cada uma dessas aplicações é necessária para o dimensionamento da infraestrutura e ativos de espectro.

### 3.3.3 Etapas do cálculo de capacidade

O objetivo do dimensionamento da capacidade é obter a vazão suportada na rede com base na largura de banda disponível e nas condições do canal de cada usuário. Um resumo de alto nível para o processo de planejamento de capacidade e requisitos de entrada é mostrado na Figura 3.4.

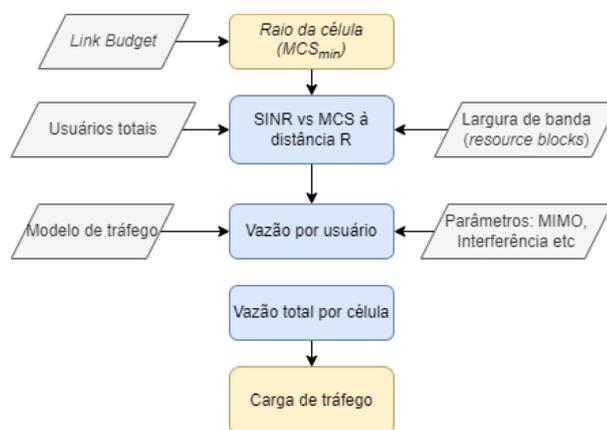


Figura 3.4: Fluxograma geral do planejamento de capacidade.

Após o cálculo do LB para obtenção do MAPL, e por conseguinte, o estabelecimento do raio da célula baseado no menor valor MCS para a borda da célula, é investigada a relação SINR a distâncias discretas  $R$  associadas aos índices MCS no interior da célula. A partir dos usuários associados a esses MCS e com a banda total disponível (RBs disponíveis), é atribuído uma vazão de dados para cada usuário ativo – em uso dos recursos rede. Realiza-se então o somatório do consumo de todos os usuários, logo obtendo-se a vazão total por célula. Caso a vazão total demandada supere os recursos disponíveis da rede, ocorre a saturação de uso desses recursos, sendo necessário, portanto, reavaliar o planejamento de cobertura da rede, alterando os seus parâmetros.

# Capítulo 4

## Condições Operacionais das Agências PPDR de Niterói

### 4.1 Introdução

Para atender às demandas dos órgãos de PPDR da cidade de Niterói, se fez necessário a coleta de dados junto aos agentes públicos, além de um estudo geográfico do município, procurando entender o que os agentes de campo e os controladores buscam quando estão em serviço, e, por fim propor uma solução em termos de rede de comunicações. No planejamento dessa dissertação, inclui-se, portanto, a previsão de coleta desses dados, que devem ser aproveitados pelo projeto de SCC para Niterói.

Segundo o levantamento feito junto aos órgãos envolvidos, pôde-se levantar as agências PPDR de Niterói que seriam potenciais clientes da rede; suas atividades que são desenvolvidas diariamente; áreas de interesse passíveis de atendimento da RCC; distribuição de usuários atuando nas regiões de Niterói; áreas críticas baseadas na recorrência, no impacto às vidas e no impacto ao patrimônio; aplicações esperadas a serem entregues pela rede de banda larga; áreas de sombra da rede comercial e tecnologias de comunicação legada utilizadas. Por questões de confidencialidade os textos integrais dos questionários não serão disponibilizados nesta dissertação.

### 4.2 Identificação das agências PPDR de Niterói

Neste tópico são descritos os objetivos principais e as características básicas de atuação das agências pertencentes ao município de Niterói, e para as quais o SCC/Niterói deve ser projetado, em termos de funcionalidades e capacidades.

### 4.2.1 Guarda Municipal

A *Guarda Civil Municipal* (GM) é o principal órgão que o município de Niterói possui para atuação na segurança pública, na proteção do patrimônio, no patrulhamento preventivo e controle e coordenação do trânsito viário. É vinculada à *Secretaria de Ordem Pública* (SEOP) e suas principais atribuições são [83]:

- Proteção da população e prevenção à violência;
- Vigilância às instalações do município e ao patrimônio público; através do monitoramento e do patrulhamento preventivo permanente;
- Segurança viária;
- Integração com os demais órgãos de segurança pública em ações conjuntas;
- Segurança escolar por meio de ações preventivas.

### 4.2.2 Defesa Civil

A *Defesa Civil* (DC) do município executa ações preventivas, de socorro, assistenciais e recuperativas destinadas a evitar ou minimizar os impactos de desastres para a população, devendo ser apta a reestabelecer a normalidade social na cidade em um curto prazo de tempo. É órgão da Secretaria Municipal de Defesa Civil e Geotecnia de Niterói, com as seguintes atribuições [84]:

- Ações preventivas, de socorro, assistenciais e recuperativas;
- Planejamento, promoção, articulação e execução da defesa permanente contra os desastres naturais, antropogênicos (causados pelo homem) ou mistos;
- Capacitação e treinamento da população para emergências e desastres;
- Ações de desenvolvimento sustentável e responsável da localidade.

### 4.2.3 Centro Integrado de Segurança Pública

O CISP, com sua base de operações localizada no bairro de Itaipu, é vinculado à SEOP e tem o propósito de monitorar, por meio de câmeras espalhadas na cidade, a ocorrência de irregularidades e delitos, e acionar as forças de segurança para pronta resposta. Reúne,

ainda, condições de integrar e coordenar os esforços de forças de segurança estaduais, federais e municipais, além do Corpo de Bombeiros, NitTrans e Defesa Civil, em operações de atuação conjunta desenvolvidas na cidade de Niterói. As operações tipicamente atribuídas ao CISP são [83]:

- Ações de inteligência para promover segurança pública;
- Monitoramento da cidade de Niterói;
- Promover a integração entre as diversas forças de segurança da cidade.

### 4.3 Cenários para atuação PPDR

Sob a perspectiva de uso de recursos de uma rede de comunicações para atuação PPDR, três cenários são normalmente considerados [85, 86]:

1. *Atuação de rotina;*
2. *Eventos públicos de grande impacto;*
3. *Eventos inopinados catastróficos (desastres).*

Em cada situação, há uma demanda específica em termos de recursos da rede, porque aspectos como quantidade de agentes por área, tipo de aplicação ou serviço (usualmente) empregado e taxa de utilização do terminal variam significativamente dependendo do cenário.

A *rotina* compreende as atividades diárias dos órgãos públicos previamente programadas no tempo e no espaço relacionadas à prevenção de acidentes e criminalidade. Na atuação de *rotina* as forças de segurança normalmente realizam patrulhamento ou operações que envolvem uma quantidade pequena de agentes (diligências, cumprimento de mandato judicial, atuações junto à comunidade etc). É um uso tempestivo e de baixa demanda da rede, sem picos de tráfego. A área a ser considerada é extensa, normalmente abrangendo toda a área metropolitana de uma cidade, onde há circulação de pessoas, regiões residenciais e zonas com alta probabilidade de incidentes/acidentes. Normalmente é necessário um planejamento celular para sua cobertura, com previsão de tamanhos de célula e nível de interferência intercelular, de acordo com o desempenho desejado para o escoamento do tráfego no *uplink* e *downlink*.

*Eventos públicos de grande impacto*, como por exemplo festas de réveillon, eventos esportivos com grande público, passeatas etc, têm em comum o fato de que devem lidar com uma grande concentração de pessoas em uma área limitada, sendo normalmente necessário o emprego de um grande número de agentes de várias origens (guarda municipal, agentes de controle de trânsito, policiais) para segurança e coordenação de circulação de pessoas e veículos no entorno do evento. Há previsibilidade em relação a esses eventos, então o planejamento da RCC para essa situação pode eventualmente empregar eNodeB rebocáveis e uso de infraestrutura adicional de rede de operadoras comerciais.

*Eventos inopinados catastróficos* são situações não rotineiras de grande comoção para a sociedade, podendo gerar perda de vidas e grande prejuízo financeiros. São as piores emergências para as quais a segurança pública deve se preparar. Em relação ao desempenho do sistema, é a situação na qual a rede atingirá seu pico de atividade, contido em uma pequena área. Na ocorrência de um desastre (deslizamento de encostas, desabamentos, alagamentos, acidentes em plantas industriais de grandes proporções etc) ou grave ameaça à ordem pública (ataques de facções criminosas, atos terroristas etc) a RCC deve ser rapidamente disponibilizada para emprego, com cobertura normalmente em uma área restrita, mas com grande densidade de agentes públicos e grande demanda de tráfego de serviços variados de voz e vídeo. Eventualmente a área a ser coberta é mal servida pelo planejamento estático da rede, sendo necessária a previsão de uso de células móveis e serviços DMO (*Direct-Mode operation*) [87], situação em que a eNodeB pode ser, eventualmente, prescindida.

## 4.4 Estudo de casos na cidade de Niterói

Além da descrição do cenário, parte essencial do trabalho é definir as atividades de operação das agências municipais envolvidas no projeto (Guarda Municipal e Defesa Civil). Nos questionários elaborados pela equipe e respondidos pelos responsáveis das agências, foram estabelecidos os cenários de empregos acima mencionados (*rotina, eventos de grande aglomeração e desastres*).

### 4.4.1 Atuação em rotina

#### 4.4.1.1 Descrição do cenário operacional das agências

Segundo o levantamento feito junto ao órgão envolvido, as atividades de rotina da GM envolvem: patrulhamento a pé, patrulhamento em viaturas, organização e controle de trânsito de pedestres e veículos, e proteção do patrimônio. Sua atuação mais relevante acontece onde há maior demanda de ocorrências, cujas áreas prioritárias abrangem os bairros do Centro, Icaraí, Piratininga, Fonseca e Barreto. A comunicação, atualmente, adotada pela GM, segue a seguinte ordem de prioridade: 1) rádios TETRA para comunicação de voz; e 2) os agentes utilizam seus próprios aparelhos com suas próprias operadoras, principalmente para troca de mensagens via *Whatsapp*.

Por sua vez, segundo o levantamento feito junto a Defesa Civil, suas atividades de rotina envolvem: vistorias técnicas geológicas, vistorias técnicas em edificações e monitoramento meteorológico. Todas as localidades do município são tratadas com a mesma relevância, porém, a prioridade das regiões está ligada ao número de solicitações de atendimento. Os bairros com maior número de atendimentos foram, em ordem decrescente: Fonseca, Icaraí, Centro, Jurujuba, Engenhoca, Barreto e Sapê. Nestes casos, os agentes utilizam seus próprios aparelhos com suas próprias operadoras. De forma geral, a comunicação, quando necessária, de agentes em campo e agentes na base operacional se dá via *WhatsApp* e chamada telefônica. As deficiências comumente encontradas pelos agentes em campo são a falta de cobertura em certos pontos e regiões e chamadas não completadas, com principal relevância geográfica para a Região Oceânica, seguida da Zona Norte.

A partir das interseções entre a necessidade da GM e DC, estabeleceu-se 5 regiões para atendimento em etapa inicial de planejamento de cobertura do município de Niterói (Figura 4.1): Centro, dividido entre região das barcas/terminal e suas áreas restantes; Icaraí, praia e ruas internas; Piratininga, região da praia e ao redor do CISP; Fonseca, Alameda São Boaventura e parte superior/inferior à alameda; e o bairro Barreto.

#### 4.4.1.2 Quantidade de usuários operacionais

Tarefa essencial do planejamento da rede é a investigação da distribuição dos usuários nas áreas geográficas (o que determina os serviços utilizados) e a previsão do uso (o que determina as futuras melhorias e custos adicionais). Nesta dissertação é considerada a distribuição de usuários em 5 regiões prioritárias em conjunto com a GM e a DC. Dentro dessas regiões há ainda a divisão por sub-regiões, cada uma com características próprias

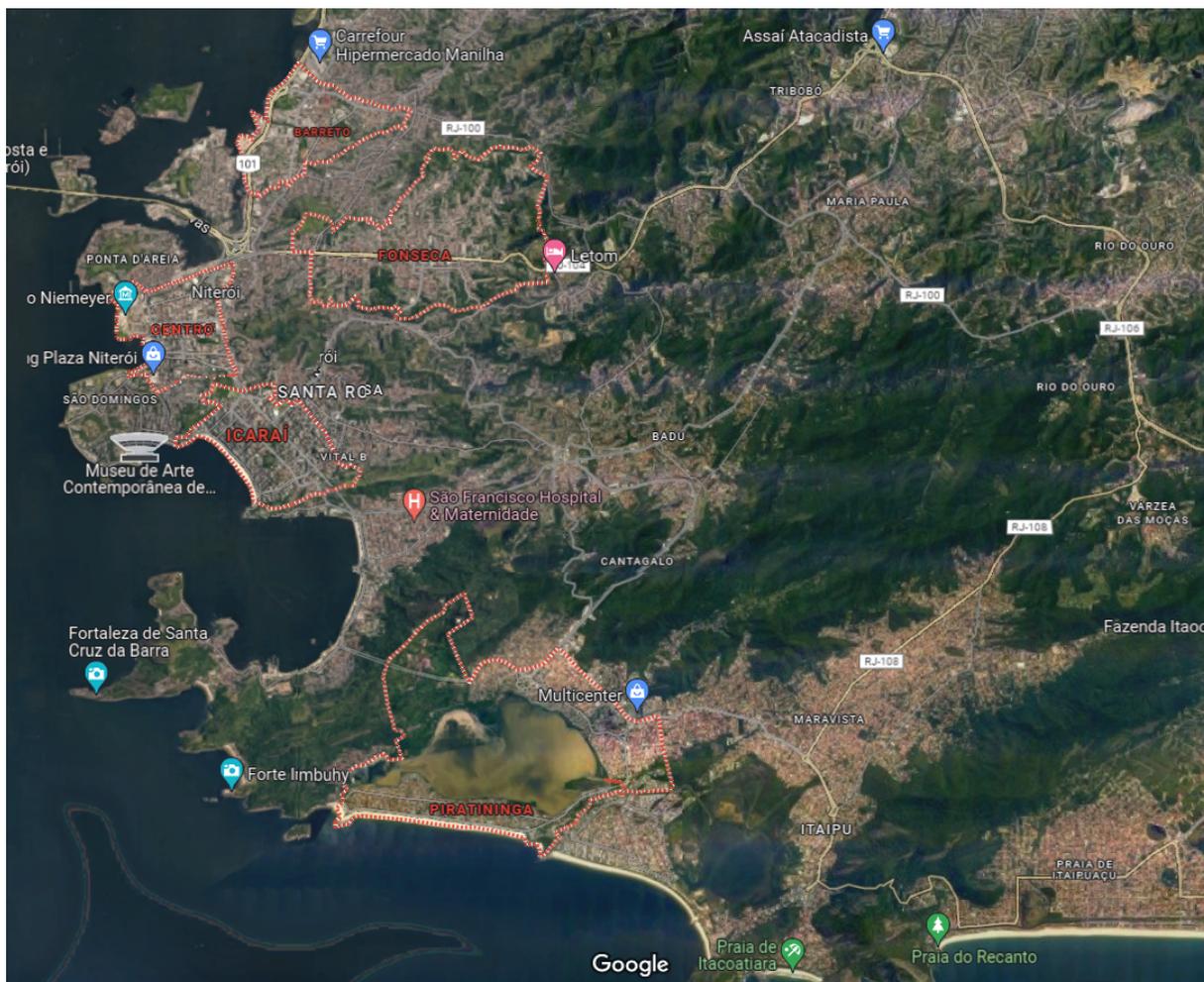


Figura 4.1: Levantamento das áreas prioritárias para cobertura de sinal em fase inicial.

mostradas nas Tabelas 4.1 e 4.2.

Tabela 4.1: Densidade de usuários da GM por região.

Região	Sub-região	Área (km <sup>2</sup> )	Nº de usuários (+10%)	Densidade de usuários [km <sup>2</sup> ] (+10%)
Centro	Barcas e terminal	0,607	30 (33)	49,42 (54,37)
	Restante	1,237	15 (16,5)	12,13 (13,34)
Fonseca	Al. São Boaventura	0,614	23 (25,3)	37,46 (41,21)
	Acima da alameda	2,058	9,5 (10,45)	4,62 (5,08)
	Abaixo da alameda	0,748	9,5 (10,45)	12,7 (13,97)
Piratininga	Praia	1,567	21 (23,1)	13,40 ( 14,74)
	Ao redor do CISP	2,248	64 (70,4)	28,47 (31,32)
Icaraí	Praia	0,436	18 (19,8)	41,28 (45,41)
	Restante	1,174	12 (13,2)	10,22( 11,24)
Barreto	Todo	1,46	80 (88)	54,79 (60,27)

Para a GM, são em média 282 (duzentos e oitenta e dois) agentes efetivos em atua-

Tabela 4.2: Densidade de usuários da DC por região.

Região	Sub-região	Área (km <sup>2</sup> )	Nº de usuários (+10%)	Densidade de usuários [km <sup>2</sup> ] (+10%)
Centro	Barcas e terminal	0,607	3 (3,3)	4,94 (5,44)
	Restante	1,237	5 (5,5)	4,04 (4,45)
Fonseca	Al. São Boaventura	0,614	2 (2,2)	3,26 (3,58)
	Acima da alameda	2,058	4 (4,4)	1,94 (2,14)
	Abaixo da alameda	0,748	2 (2,2)	2,67 (2,94)
Piratininga	Praia	1,567	3 (3,3)	1,92 (2,11)
	Ao redor do CISP	2,248	5 (5,5)	2,22 (2,45)
Icaraí	Praia	0,436	3 (3,3)	6,88 (7,57)
	Restante	1,174	5 (5,5)	4,26 (4,68)
Barreto	Todo	1,46	8 (8,8)	5,48 (6,03)

ção simultânea nessas 5 áreas consideradas prioritárias em rotina, cobrindo, aproximadamente, um total de 12,15  $km^2$ .

Em relação à DC, seu efetivo de agentes mobilizados nas áreas citadas, em média, é de quatro a doze agentes em campo de forma simultânea, distribuídos em atividades operacionais de ameaças/prevenção, por vezes ocorrências, além das atividades de capacitação, atividades administrativas, dentre outras.

#### 4.4.2 Evento público de grande impacto

Foi verificado junto às agências que o “Caminho Niemeyer” é o principal local de grande aglomeração na realização de eventos programados da cidade. Este local é um centro cultural (Figura 4.2) de grande valor arquitetônico projetados pelo renomado arquiteto Oscar Niemeyer, nos bairros litorâneos na cidade de Niterói. O complexo de obras se estende por 11  $km$  ao longo da orla da cidade, desde a Praça do Povo no Centro de Niterói, até a Estação do Catamarã no bairro de Charitas. A parte do Caminho Niemeyer localizada no bairro Centro será a área do foco de estudo.

##### 4.4.2.1 Descrição do cenário operacional das agências

Segundo informado pela diretoria do CISP, todas as formas de comunicações comerciais ficam indisponíveis durante eventos de grande aglomeração devido ao elevado número de usuários, e à falta de priorização para agentes de segurança pública. Portanto é essencial a implementação de uma rede de comunicação crítica de banda larga. Além disso, também é informado que o sistema legado TETRA não suporta todas as necessidades, como



Figura 4.2: Caminho Niemeyer, carnaval 2018

transmissão de vídeo, essenciais para traçar estratégias em tempo real.

As informações da GM para eventos públicos de grande impacto, indicam que a atuação compreende principalmente de “combate a criminalidade” e a “manutenção da ordem e patrimônio público”, envolvendo uma concentração de usuários em torno de uma área delimitada – correspondendo a uma situação de média mobilização de agentes.

A Defesa Civil atua auxiliando os demais órgãos na gestão destes eventos, não havendo na maior parte dos casos, a mobilização de agentes desse órgão nos locais específicos do evento. No entanto, estes agentes permanecem de prontidão e monitoramento para eventuais ações caso seja necessário. A comunicação entre a DC e os demais órgãos se dá principalmente por meio do aplicativo *WhatsApp* e chamadas telefônicas. Logo, não se considerou nesta dissertação a previsão de atuação da DC na região de interesse.

#### 4.4.2.2 Quantidade de usuários operacionais

Neste tipo de evento no Caminho Niemeyer, segundo informações da GM, são empregados cerca de 70 agentes deste órgão (Tabela 4.3). Por sua vez, como citado anteriormente, não se considera a atuação da DC.

Tabela 4.3: Densidade de usuários da GM por região – Caminho Niemeyer.

Região	Sub-região	Área (km <sup>2</sup> )	Nº de usuários (+10%)	Densidade de usuários [km <sup>2</sup> ] (+10%)
Centro	Caminho Niemeyer	0,099	70 (77)	707,07 (777,78)

### 4.4.3 Eventos inopinados catastróficos

#### 4.4.3.1 Descrição do cenário operacional das agências

Quais são as localidades mais “críticas” (em termos de probabilidade de ocorrência, extensão dos danos etc)? Segundo as informações da própria Defesa Civil, para eventos inopinados catastróficos, trata-se, principalmente, de “áreas de encostas com risco de deslizamento”, envolvendo uma concentração maior de usuários em torno de um pequena área para exercício da atividade – se refere a uma situação considerada de alta mobilização de agentes.

Segundo o Relatório Anual de 2021, elaborado pela DC, os maiores números de atendimentos no ano se deram nas regiões administrativas Norte e Praias da Baía. Importante citar que estes atendimentos são relativos, principalmente, a análises estruturais e a deslizamentos. O bairro mais atendido neste ano foi Fonseca, com mais de 300 registros. Cita-se ainda Icaraí, Centro, Jurujuba, Engenhoca, Barreto e Sapê com elevado número de atendimentos no ano. É importante ainda mencionar que o município apresenta, desde 2014, o Sistema de Alerta e Alarme por Sirenes da Defesa Civil, uma parceria entre a municipalidade e o governo estadual. Integram nesse sistema atualmente 37 sirenes e 46 pluviômetros posicionadas em diferentes comunidades da cidade.

Dentre as possíveis localidades citadas, foi selecionada para estudo a Vila Ipiranga, localizada na zona norte da cidade, no bairro da Fonseca, comunidade mais populosa no município de Niterói (Figura 4.3); e o Morro do Estado, a maior comunidade em termos territoriais (Figura 4.4). Fatores estes que impactam na criticidade dos cenários.

#### 4.4.3.2 Quantidade de usuários operacionais

Para a GM imagina-se um cenário semelhante ao verificado no desastre ocorrido no Morro do Bumba, em 2010 [88]. Nestes casos em específico, comumente são empregados os agentes do CAT (Coordenadoria de Ações Táticas), no qual o efetivo gira em média, atualmente, em torno de 30 (trinta) agentes, além do efetivo já empregado diariamente na área do evento de calamidade e de boa parte dos demais GMs de serviço aptos a serem

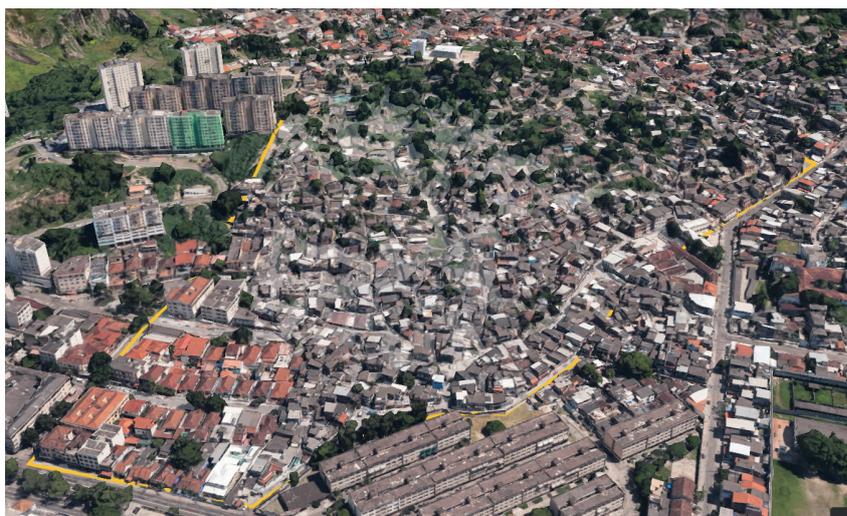


Figura 4.3: Vila Ipiranga, Fonseca.

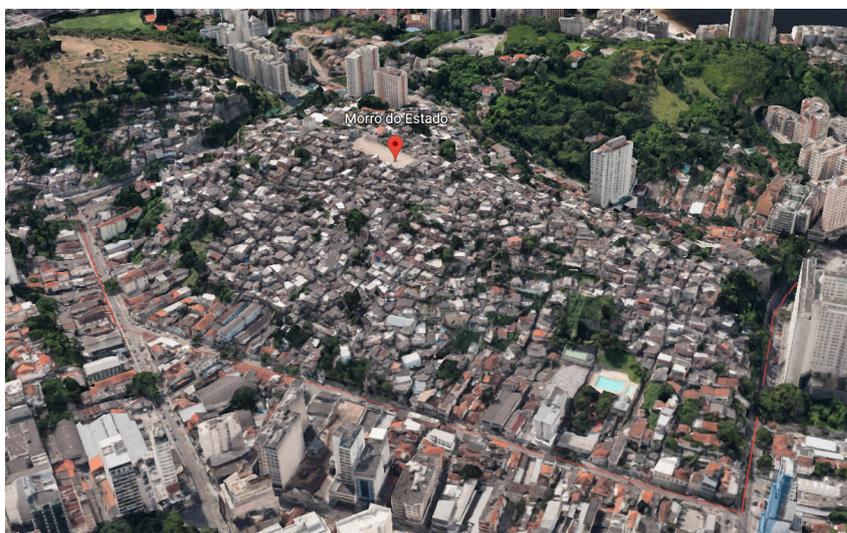


Figura 4.4: Morro do Estado.

empregados. Considerando todos os agentes, este número gira em torno de 100 a 115 ao redor da área crítica (Tabela 4.4).

Tabela 4.4: Densidade de usuários por região crítica.

Região	Sub-região	Agência	Área (km <sup>2</sup> )	Número de usuários (+10%)	Densidade de usuários [km <sup>2</sup> ] (+10%)
Morro do Estado	Morro do Estado	GM	0,195	107 (117,7)	551,5 (606,7)
	Morro do Estado	DC	0,195	40 (44)	206,1 (226,8)
Fonseca	Vila Ipiranga	GM	0,188	107 (117,7)	569,1 (626,0)
	Vila Ipiranga	DC	0,188	40 (44)	212,7 (234,0)

Se tratando de um emprego em evento envolvendo iminência de deslizamento de en-

costas (após fortes chuvas) e, possível desabamento/colapso de edificações, a DC aplica todo o efetivo da SMDCG (Secretaria Municipal de Defesa Civil e Geotecnia de Niterói) em ação na rua (aproximadamente 40 pessoas). O efetivo de agentes mobilizado pode variar segundo as proporções dos eventos ocorridos.

## 4.5 Dispositivos utilizados

Os rádios utilizados em missão crítica são dispositivos portáteis carregados por agentes em campo para se comunicar com outros agentes ou uma central. Diversas características destes equipamentos são identificados como importantes para o bom andamento das operações: o equipamento precisa ter resistência à queda, chuva e poeira; botões dedicados para acesso rádio de PTT, SOS e transmissão de vídeo; bateria removível, para garantir a continuidade da comunicação; e capacidade de comunicação em grupo. Muitos fornecedores, antecipando a migração para redes de segurança pública baseadas em banda larga, estão tornando seus produtos compatíveis com LTE (e, possivelmente, retrocompatível com tecnologias de banda estreita). No estudo, adotou-se as características de dispositivos reais e homologados pela ANATEL [89]:



Figura 4.5: Dispositivos (UEs) utilizados na RCC.

- O Mototrbo ION [90] (Figura 4.5a) é um dispositivo para uso contínuo em ambientes adversos e possui resistência a quedas. Ele atende às necessidades exclusivas das equipes de segurança pública ao oferecer recursos essenciais que os *smartphones* comuns não oferecem. Foi desenvolvido ergonomicamente para facilitar a operação com uma só mão através de um agarre não deslizante; com um botão PTT, emergência e vídeo dedicado; e seletor de grupo de conversação dedicado.

- A câmera corporal (*bodycam*) da Hikvision série DS-MH2311 (Figura 4.5b) é um sistema de gravação de vídeo, normalmente usado por agentes policiais para registrar suas interações com o público e coletar evidências de vídeo com gravação local ou em transmissão de vídeo para uma central em tempo real. É capaz de conexão LTE com a rede através do uso de um cartão USIM específico da RCC. Já é prevista a compra, através de licitação, pelo Governo do Estado do Rio de Janeiro, com disponibilização subsequente para a Guarda Municipal de Niterói.

# Capítulo 5

## Planejamento de Dimensionamento do SCC para Niterói

### 5.1 Introdução

O objetivo do planejamento celular é estabelecer a rede de rádio adequada em termos de cobertura do serviço, capacidade, QoS, custo, desempenho, utilização de frequências, e implantação de equipamentos. Para o planejamento desta rede, é necessário identificar as especificações, estudar a área em questão e criar um banco de dados com informação geográficas (SIG), analisar a população e perfil de uso na área de interesse, desenvolver uma metodologia apropriada, e, então, realizar simulações com as ferramentas apropriadas. Depois disso, os resultados da simulação estarão disponíveis para análise, seguida de implantações de células e testes de unidade [76, 77].

### 5.2 Simulador Atoll-Forsk

Nesta dissertação é utilizado o *software* Atoll da empresa Forsk [91] para simulação de emprego da rede nos cenários escolhidos. É uma ferramenta computacional normalmente empregada para planejamento e otimização de cobertura celular nas tecnologias de 2G a 5G, permitindo, através de simulações estocásticas de demanda de tráfego, a obtenção de análises do grau de saturação dos recursos da rede para um dado cenário estabelecido.

### 5.3 Definição dos serviços/aplicações PPDR e suas características

As RCCs para cenários PPDR possuem requisitos para aplicações e de desempenho que as diferenciam das redes comerciais [73, 63]. Os usuários de sistemas de comunicações críticas demandam recursos e capacidades específicas, as quais devem ser atendidas para o cumprimento de suas tarefas [92]. Serviços como PTT, criação de grupos, possibilidade de comunicação direta entre terminais (sem uso de eNodeB), comunicação entre agentes e centrais de despachos, controle (priorização) e coordenação das comunicações são exemplos das demandas exigidas para essas redes, e que não são contempladas nas tecnologias usuais de redes sem fio.

É necessária a definição dos serviços (ou aplicações) PPDR e suas respectivas características de tráfego e de prioridade de uso de recursos da rede que refletem as operações do dia a dia ou uma resposta a incidentes. As referências usadas nesta dissertação, nas situações estabelecidas, é a matriz LEWP/RCEG [75], também usada em outras análises de capacidade de RCC [86, 85]; e questionários respondidos pelas agências envolvidas. Com base nestas fontes de informações, são considerados os parâmetros de tráfego adequados para o simulador, presentes na Tabela 5.1.

São definidos os parâmetros: fator de atividade (UL e DL) para aplicações de voz (PTT e *Voice Over IP* (VoIP)), vazão média (UL e DL), acessos por hora, volume de dados por transmissão (UL e DL) e QCI com definição da prioridade dentro da classe correspondente. As seguintes observações são feitas [93]:

- O campo chamadas/hora tem um significado diferente dependendo do tipo de serviço:
  - No caso de um serviço de voz, quando multiplicado pela duração e normalizado por 3600 segundos (equivalente a 1 hora), obtém-se volume de tráfego de voz, medido em Erlangs, que é também a probabilidade de utilização do serviço.
  - No caso de um serviço de dados, quando multiplicado pelo volume de dados (kB/sessão de uso), e normalizado pela vazão média (definida para o serviço de dados) e 3600 segundos, produz a probabilidade de estar ativo (*bursting*) em cada direção (UL e DL).
- Por sua vez, o fator de atividade define a probabilidade de uso da rede na direção UL e/ou DL para um tipo de serviço.

As informações sobre o cálculo de probabilidade com maior detalhamento da interação entre os diferentes parâmetros estão dispostos no Guia de Referência Técnica do Atoll versão 3.3.2 [94].

Vale salientar que é admitido que os centros de comando móveis transmitem (UL) dois tráfegos de vídeo a taxas de até 768 kbps por fluxo de vídeo. Considera-se o tráfego do dispositivo de resposta imediata (ou seja, sem o vídeo da unidade de comando) para emular as operações normais do dia-a-dia e o modelo de tráfego completo (incluindo vídeo da unidade de comando) para emular o tráfego de resposta a incidentes.

Tabela 5.1: Definição dos serviços e perfil de tráfego para rotina e desastres [75].

Serviço	QCI	Vazão Média UL (kbps)	Vazão Média DL (kbps)	Fator de atividade DL	Fator de atividade UL	Chamadas /hora (rotina, evento e desastre)	Duração (s) (rotina, evento e desastre)	Volume UL (kByte)	Volume DL (kByte)
Comunicação no modo Push-to-Talk	1	26,9	26,9	0,6	0,6	10; 3; 3	10; 10; 10	-	-
Comunicação no modo chamada telefônica	1	26,9	26,9	0,6	0,6	1; 3; 3	80; 60; 60	-	-
Voz de um para muitos (grupos)	1	26,9	26,9	0,7	0,1	1; 6; 6	80; 60; 60	-	-
Voz entre agentes e comando	1	26,9	26,9	0,6	0,6	2; 2; 2	80; 80; 80	-	-
Envio/recebimento de vídeos ao vivo	6	768	768	-	-	1; 0,1; 0,1	-	5760	5760
Troca de mensagens de texto/áudio	8	800	800	-	-	2; 2; 2	-	500	500
Envio/recebimento de imagens	8	6400	6400	-	-	2; 2; 2	-	4000	4000
Texto/áudio de um para muitos (grupos)	8	1600	1600	-	-	2; 2; 2	-	1000	1000
Imagens de um para muitos (grupos)	8	6400	6400	-	-	2; 2; 2	-	4000	4000
Envio/recebimento de vídeos offline	8	640	640	-	-	1; 1; 1	-	5760	5760
Vídeo de um para muitos (grupos)	8	640	640	-	-	1; 1; 1	-	5760	5760
Acesso ao banco de dados	8	1333	6667	-	-	2; 0,2; 0,2	-	1000	5000
Navegação na internet	8	556	556	-	-	5; 1; 1	-	1000	1000
Mensagens entre agentes e comando	8	80	80	-	-	2; 2; 2	-	50	50
Imagens entre agentes e comando	8	6400	6400	-	-	2; 2; 2	-	4000	4000
Vídeos entre agentes e comando	8	640	640	-	-	1; 1; 1	-	5760	5760
Vídeo com unidade de comando	2	768	0	-	-	0; 0; 1	0; 0; 3600	2764800	0

## 5.4 Simulação de Monte Carlo

Os resultados de desempenho são obtidos com base em realizações (ou *snapshots*) do uso da rede, nas quais são produzidas (i.e., geradas aleatoriamente) a cada realização a distribuição geográfica dos usuários na região de cobertura com suas respectivas demandas de tráfego. Em função de diversos parâmetros configuráveis de rede, o *software*, então, determina os recursos alocados a cada usuário e a carga da célula resultante da soma dos acessos.

A sequência de processos básicos executados em uma realização da rede LTE no Atoll, considerando cada usuário na área de cobertura, está mostrada na Figura 5.1. Na conclusão da sequência mostrada, há o cálculo de vazão (etapa (5)), para transmissão no *uplink* e *downlink*, em uma dada aplicação, para um dado usuário, e os recursos consumidos considerando todos os usuários são somados para o cômputo global da carga da célula (etapa (6)).

Em particular, a determinação do índice MCS na etapa (3) é crítica para o estudo realizado nesta dissertação, pois impacta diretamente na eficiência espectral do enlace, sendo, portanto, decisivo na definição da quantidade de recursos da rede para a largura de banda disponível. A definição desse índice, por sua vez, depende dos valores de razão portadora-(ruído+interferência) ( $C/(I + N)$ ) do DL e do UL, obtidos respectivamente nas etapas (1) e (2).

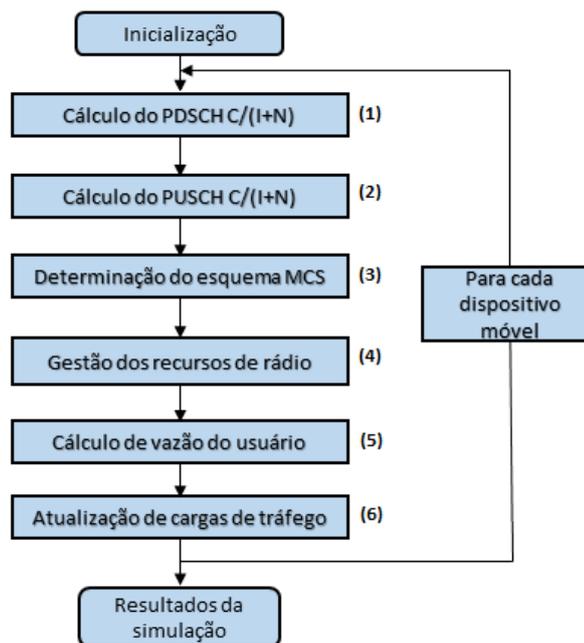


Figura 5.1: Sequência de etapas na simulação da rede LTE pelo Atoll.

## 5.5 Determinação das localizações das eNodeBs

Para atendimento de cobertura nas áreas de interesse dos cenários previamente definidos, é necessária a escolha das localizações das eNodeBs que serão a referência inicial no planejamento. Através do Mosaico (Sistema Integrado de Gestão e Controle do Espectro) [95] – plataforma da ANATEL que contém uma base de dados de cadastros de estações de radiodifusão – é possível extrair informações públicas sobre os dados técnicos da estação-base, geolocalização, entidade detentora da estação etc. A pesquisa e escolha das candidatas a localidades para instalação das eNodeBs foi baseada em uma sequência de critérios:

1. Uma vez que as áreas requeridas para cobertura são identificadas através das informações obtidas das agências, estas áreas deverão ter garantia de sinal efetivo por uma eNodeB;
2. Os critérios de priorização para escolha das eNodeBs são os seguintes: 1) locais com antenas de órgãos públicos (por exemplo, torres de rádio da polícia, bombeiros etc), 2) sítios celulares comerciais existentes, e 3) construção de novos sítios. Ou seja, sendo possível, considera-se vantajoso aproveitar estações já existentes, por critérios, principalmente, práticos e financeiros;
3. Certificar que o local não tenha obstáculos altos ao seu redor e tenha uma visão clara para o feixe principal; e evitar selecionar sítios em locais altos demasiadamente, pois pode provocar problemas com interferência descontrolada, acarretar falhas de *handover*, além de sombra na área próxima ou logo abaixo da eNodeB;
4. Minimizar o número de elementos na rede, visando à utilização de apenas 1 eNodeB por área de interesse. Caso haja saturação dos recursos da rede na localidade após a verificação da capacidade, adiciona-se novas eNodeBs para complementar o atendimento à região.

O resultado do processo de pesquisa do local contém os endereços, mapas, a altura do edifício/torre, coordenadas, configuração da antena (inclinação (*tilt*), azimute etc). As eNodeBs escolhidas e suas características são mostrados na Tabela 5.2 e na Figura 5.2. Esta dissertação utiliza a convenção de que uma estação-base é centrada no meio de uma célula com três setores controlados individualmente por uma antena, cada uma abrangendo atendimento em diferentes arcos.

A partir desta estimativa inicial das eNodeBs, cabe às simulações que serão realizadas no Capítulo 6 confirmar/validar se as localidades escolhidas atendem à necessidade dos

usuários nos cenários definidos, caso contrário deve-se retornar ao *Mosaico* e selecionar novos candidatos.

Tabela 5.2: Localização das eNodeBs.

Região	Latitude	Longitude	Operadora	Altura acima do solo (m)	Endereço
Centro	-22,89210	-43,120615	TIM S/A	45	R. São Pedro, 116
Fonseca	-22,981574	-43,087810	TIM S/A	30	Al. São Boaventura, 978
Piratininga (Praia)	-22,951806	-43,089111	TIM S/A	30	Av. Dr. Acúrcio Torres
Piratininga (CISP)	-22,946663	-43,06062	TIM S/A	33	R. Átila Nunes, 14
Piratininga (CISP) 2	-22,933833	-43,069639	TIM S/A	37,5	R. Dr Salomão Vergueiro da Cruz, 1286
Icaraí	-22,904957	-43,116364	TIM S/A	60	R. Domingues de Sá, 224
Barreto 1	-22,869111	-43,103611	TIM S/A	31	R. Gen. Castrioto, 12
Barreto 2	-22,859389	-43,10114	TIM S/A </td <td>35</td> <td>R. Gen. Castrioto, 557</td>	35	R. Gen. Castrioto, 557



Figura 5.2: Proposta de localização das antenas.

## 5.6 Características dos terminais, eNodeB e interface aérea.

Uma vez definidas as localidades iniciais das eNodeBs, é necessário realizar um conjunto de simulações para validá-las. Nessas simulações é essencial uma definição dos parâmetros iniciais da rede, que também devem ser validados. As Tabelas 5.3 [96, 79] e 5.4 mostram as características das eNodeBs, do equipamento do usuário (UE) e da interface aérea consideradas em todas as simulações realizadas.

Na definição do UE foi considerada a categoria 4 (CAT 4) [90], o que está de acordo com as especificações de terminais LTE atualmente comercializados para emprego em missões críticas. Para a direção de DL, uma configuração de duas antenas de transmissão na estação base e duas antenas de recepção no terminal móvel (2×2 MIMO), enquanto 2x1 é considerada no UL devido à limitação dos dispositivos móveis adotados.

Tabela 5.3: Parâmetros gerais de transmissão/recepção.

Parâmetro	<i>Downlink</i>	<i>Uplink</i>
Faixa de transmissão FDD (MHz)	758-763	703-708
Pot. de transmissão UE (dBm)	–	23
Categoria UE [90]	4	4
Altura UE (m)	1,5	1,5
MIMO	2x2	1x2
Fig. ruído receptor (dB)	9	4
Ganho da antena (dBi)	17	0
Largura do feixe da antena	65 graus	Omnidirecional
Modelo de propagação	Okumura Hata	
Sombreamento	Lognormal	
(desvio padrão (dB))	(10, denso urbano; 8, urbano)	
Escalonamento	<i>Proportional Fair</i>	

## 5.7 Mapa digital de terreno

Diversos tipos de dados geográficos diferentes podem ser usados no Atoll, dependendo do contexto inserido. Para fins de cálculo de propagação/enlace é utilizado o dado geográfico conhecido como mapa digital de terreno (*Digital Terrain Model (DTM)*), com um exemplo mostrado na Figura 5.3. O DTM descreve a elevação do solo acima do nível do mar. O *software* Atoll considera automaticamente esse dado durante a computação do cálculo de enlace para medir a difração das obstruções presentes no perfil do relevo.

Tabela 5.4: Parâmetros de rede por setor.

eNodeB	Setor	PCI	Potência (dBm)	Azimute (°)	<i>Downtilt</i> Mecânico (°)
Centro	1	0	52,8	321	6
	2	3	52,8	72	7
	3	6	52,8	200	5
Fonseca	1	9	52,8	0	4
	2	12	52,8	113	2
	3	15	52,8	263	6
Piratininga (Praia)	1	18	52,8	333	4
	2	21	52,8	105	2
	3	24	52,8	229	2
Piratininga (CISP)	1	27	52,8	334	4
	2	30	52,8	72	3
	3	33	52,8	178	3
Piratininga (CISP) 2	1	36	50,0	333	3
	2	39	52,8	82	4
	3	42	52,8	215	6
Icaraí	1	45	52,8	314	8
	2	48	52,8	92	4
	3	51	52,8	219	5
Barreto 1	1	54	48,0	334	5
	2	57	52,8	105	2
	3	60	52,8	216	2
Barreto 2	1	66	52,8	0	4
	2	69	52,8	94	2
	3	72	49,0	184	7

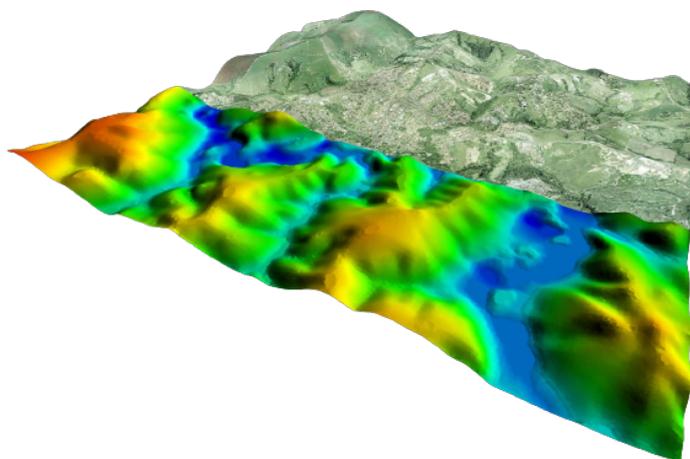


Figura 5.3: Exemplo de mapa de terreno digital.

O DTM da cidade de Niterói foi retirado do *United States Geological Survey* (USGS) [97], que se constitui em uma base de dados contendo mapas com grades de valores (matriz 2D) representando mudanças de elevação em uma área numa resolução espacial de 30 metros a partir de imagens do satélite *Landsat 9*.

Enquanto o modelo de propagação Okumura-Hata gera uma perda média do sinal transmitido, o Atoll considera uma perda adicional por difração utilizando o método de Deygout para gume de faca com 1 obstáculo. Ao longo do perfil do relevo (como exemplificado na Figura 5.4), se o sinal encontra um obstáculo, este causa atenuação por difração, ilustrada por uma linha vertical vermelha. A aresta de difração principal é a que mais intercepta o elipsoide de Fresnel. A atenuação total é exibida na Figura 5.4 acima da borda de difração principal.

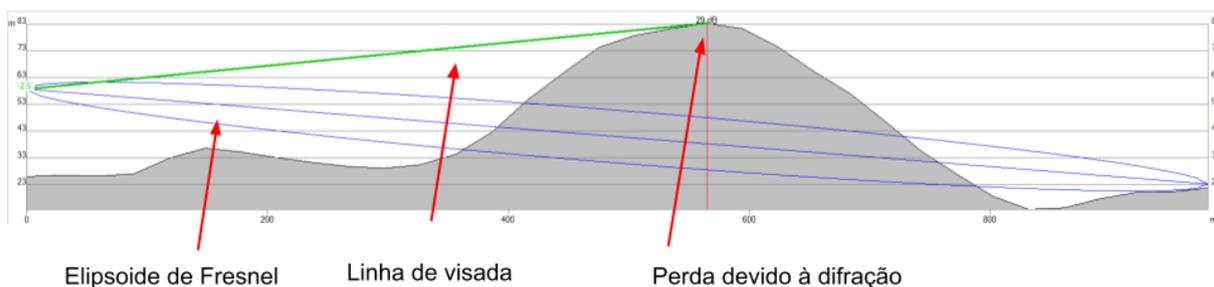


Figura 5.4: Análise pontual do perfil de terreno.

É possível considerar nos cálculos de perdas a curvatura da terra, porém no contexto de sistemas celulares, com setores inferiores a distância de 2 km, isso não se faz necessário. A distância máxima do caminho da linha de visada para não haver influência da curvatura da terra é definida na Equação 5.1 [98].

$$LOS_{max} = 4,124\sqrt{h_{tx}} + 4,124\sqrt{h_{rx}} \quad (5.1)$$

onde  $LOS_{max}$  é a distância máxima do caminho da linha de visada em quilômetros;  $h_{tx}$  é a altura da antena transmissora em metros; e  $h_{rx}$  é a altura da antena receptora em metros.

Considerando os parâmetros, para o pior caso, da rede proposta nesta dissertação, tal que  $h_{tx} = 30$  m e  $h_{rx} = 1,5$  m, temos  $LOS_{max} = 27,6$  km.

## 5.8 Mapa de tráfego de densidade de perfil de usuário

Distribuições realistas de usuários podem ser geradas usando diferentes tipos de mapas de tráfego. O Atoll usa essas distribuições de usuário como entrada para as simulações. Nas

simulações baseadas no mapa de tráfego de densidade de perfil de usuário, cada polígono recebe uma densidade de assinantes (número de usuários por km<sup>2</sup>) com determinado perfil de usuário e tipo de mobilidade.

A partir da superfície ( $S$ ) do ambiente (ou polígono) e da densidade do perfil do usuário ( $D$ ), é inferido um número de assinantes ( $X$ ) por perfil do usuário distribuídos aleatoriamente dentro desse polígono, conforme mostrado na Equação 5.2.

$$X = S \times D \quad (5.2)$$

Para cada comportamento descrito em um perfil de usuário, de acordo com o serviço, frequência de uso e volume de troca, o Atoll calcula a probabilidade do usuário estar ativo no *uplink* e no *downlink* no instante  $t$ , gerando simulações de rede realistas (*snapshots*) para o escalonamento e alocação de recursos para esses usuários.

## 5.9 Metodologia

O exercício completo de dimensionamento da rede LTE adotado nesta dissertação está representado na Figura 5.5. Utiliza-se uma abordagem iterativa para encontrar um projeto equilibrado levando em conta os três requisitos de projeto: cobertura, capacidade e qualidade, resultando no menor número de eNodeBs necessários para atender à demanda.

O planejamento da rede requer inicialmente uma fase de estabelecimento da primeira estimativa do número de elementos da rede para que a cada iteração seja melhorado todos os parâmetros almejados. É importante lembrar que os sítios candidatos são escolhidos com base nos critérios de priorização apresentados na Seção 5.5.

Realiza-se, então, o LB para obtenção do MAPL que corresponde ao menor raio possível considerando o UL e o DL, segundo um critério baseado no SINR (ou MCS correspondente). Com células adjacentes, cujas bordas tangenciam entre si, determina-se a cobertura total por região de interesse. Ao fim do plano de cobertura, se o objetivo não foi alcançado, retorna-se para a adição de novas eNodeBs ou ajuste dentre os diversos parâmetros possíveis para a rede. Caso o critério de cobertura seja atendido, segue-se para o plano de capacidade.

O primeiro passo para a implementação deste plano é a determinação da demanda de vazão por célula, a partir de um modelo de tráfego baseado na distribuição de usuários por região e as aplicações possíveis para estes agentes. O Atoll calcula a probabilidade

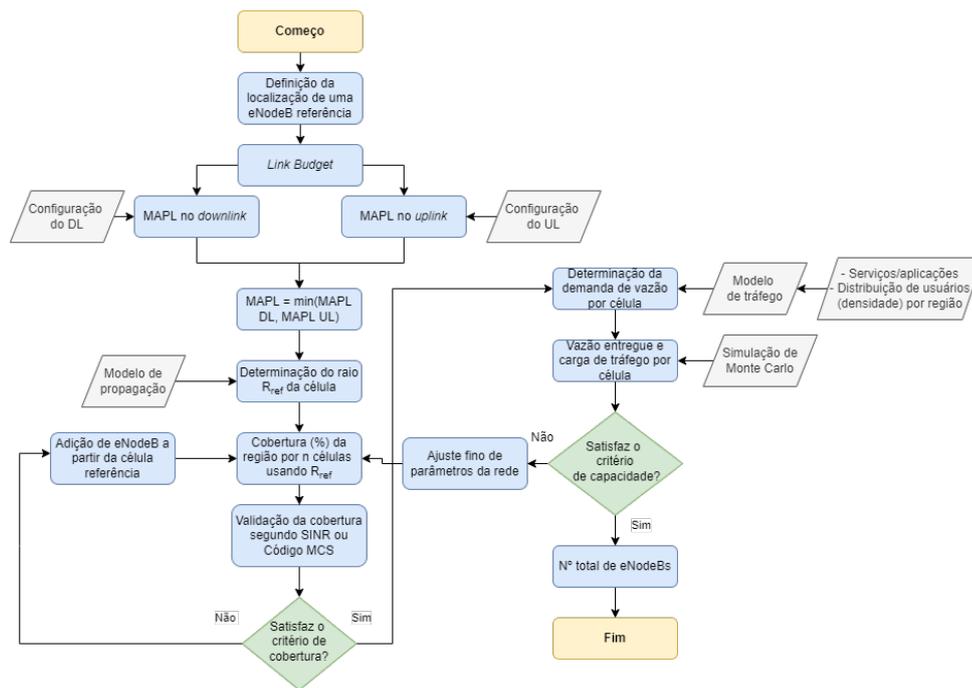


Figura 5.5: Fluxograma da proposta de metodologia de dimensionamento rádio de uma rede LTE.

de um usuário estar ativo em um determinado instante no UL e no DL, de acordo com as características de utilização do serviço descritas nos perfis de tráfego dos utilizadores da rede, como o número de chamadas de voz e a duração média de cada chamada; ou o número de sessões de dados e a média de volume de dados transferidos no UL e no DL em cada sessão, descritos anteriormente na Seção 5.3.

Através das realizações da simulação de Monte Carlo, calcula-se a vazão entregue pela rede, e a carga de tráfego da célula. Se não for alcançado o nível de desempenho estabelecido para a capacidade da rede, deve ser feito o ajuste fino dos parâmetros (potência, tilte, azimute etc) no simulador. Alcançando-se esse nível, obtém-se o número total de eNodeBs com as informações de carga, e o planejamento está completo.

# Capítulo 6

## Simulações, Resultados e Análises

### 6.1 Introdução

Dispondo das localizações das eNodeBs, uma análise de desempenho adequada deve determinar a cobertura e as cargas de tráfego das células na área selecionada. Essa análise é feita com o auxílio de simulações de Monte Carlo que, para usuários distribuídos aleatoriamente, calculam o sinal recebido e os recursos de largura de banda e tempo (ou seja, blocos de recursos) em cada enlace LTE (UL e DL). As simulações são iterativas, produzindo em cada iteração resultados para cada usuário e sua contribuição para as estimativas de carga total na célula.

O objetivo das simulações é verificar se nas condições de emprego da RCC, em cada cenário considerado, os recursos de transmissão são suficientes para o uso das aplicações PPDR com desempenho satisfatório. Para esta dissertação, em cada cenário, foram executadas 100 realizações de uso da rede, e foram gerados dois tipos de resultados: 1) comparação da vazão demandada total (Equação 6.1) com a vazão efetivamente entregue pela rede (Equação 6.2), no UL e DL; e 2) histogramas de percentual de carga de tráfego ( $CT$ ) na célula, permitindo visualizar o grau de saturação dos recursos disponíveis. Este parâmetro é definido como a razão entre a quantidade de recursos (de tempo-frequência) consumidos e a quantidade de recursos disponíveis na célula (Equação 6.3). Intuitivamente, um baixo valor significa que a rede tem capacidade suficiente para atender à demanda, por outro lado, valores iguais ou próximos a 100%, indicam uma rede congestionada ou mesmo totalmente saturada, com grande parte das aplicações não sendo atendidas ou degradadas.

$$VDT = \sum_{i=1}^n VD_i \quad (6.1)$$

$$VET = \sum_{i=1}^n VE_i \quad (6.2)$$

onde  $n$  é o número total de usuários na célula estudada;  $VD_i$  é a vazão demandada pelo  $i$ -ésimo usuário nesta célula para atender suas necessidades de uso da rede; e  $VE_i$  é a vazão entregue para este  $i$ -ésimo usuário pela rede.

$$CT(\%) = \frac{VDT}{VTE} \times 100 \quad (6.3)$$

## 6.2 Faixa de 700 x faixa de 800 MHz para segurança pública

Conforme o Artigo 3º da resolução 625 da ANATEL, publicada em 11/11/2013, a faixa de radiofrequências de 703 a 708 MHz e 758 a 763 MHz fora destinada ao Serviço Limitado Privado (SLP), em aplicações de segurança pública, defesa nacional e infraestrutura, em caráter primário. Contudo, recentemente, através da Resolução 757, de 08 de novembro de 2022 [15], a ANATEL alterou as subfaixas destinadas para aplicações PPDR. Segundo este documento, as transmissões agora devem ser feitas nos intervalos de 809 a 814 MHz e de 854 a 859 MHz – composição *duplex* de 5+5 MHz –, o que corresponde à banda 26 estabelecida pelo 3GPP para o LTE.

Quando esta nova resolução foi publicada, os resultados a serem mostrados nesta dissertação já estavam prontos. Por não haver tempo hábil, uma completa reestruturação da dissertação para essa nova faixa foi considerada inviável. Entretanto, com o objetivo de investigar uma provável e esperada similaridade dos resultados de cobertura e de capacidade nas duas faixas, decidiu-se realizar na Seção 6.4 simulações e comparações de resultados obtidos considerando as duas faixas, para dois cenários: 1) bairro Centro em situação de rotina; e 2) Vila Ipiranga em situação de desastre. Admite-se, portanto, que a análise realizada para estes dois casos possa ser extrapolada para os demais cenários.

Com efeito, a perda de propagação considerando o modelo de Okumura-Hata é praticamente idêntica para as frequências de 700 MHz e 800 MHz. Conforme mostrada na Figura 6.1, a diferença é de apenas 1,5 dB. Este fato reforça a ideia de que, embora os resultados desta dissertação tenham sido obtidos considerando a faixa de frequências da

resolução antiga da ANATEL, eles podem ser validados para a nova subfaixa de frequências estabelecida no Brasil para aplicações PPDR.

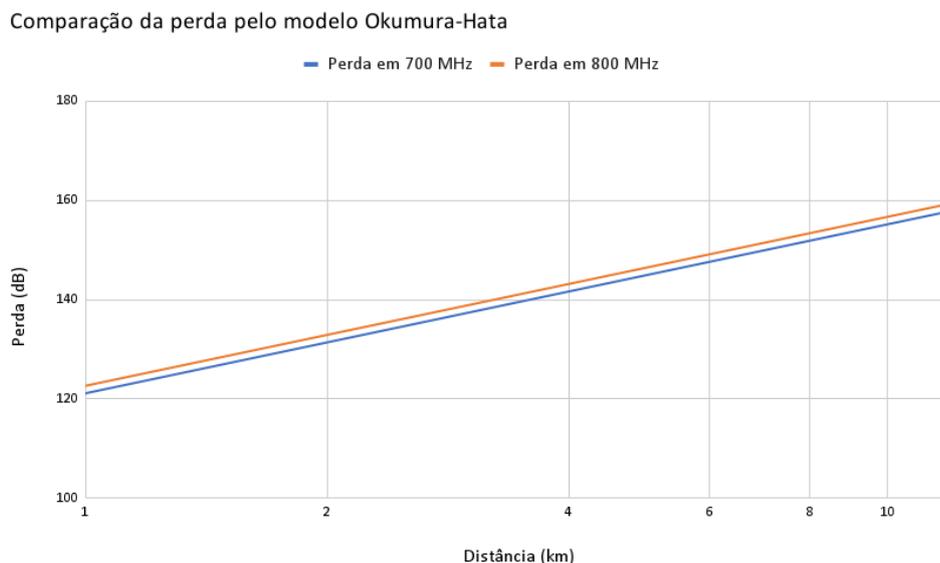


Figura 6.1: Comparação da perda pelo modelo Okumura-Hata.

## 6.3 Resultados para a faixa de 700 MHz

### 6.3.1 Cenário 1 (atuação em rotina)

#### 6.3.1.1 Análise da área de serviço

Com base nas informações obtidas de atuação das agências PPDR de Niterói, apresentadas no Capítulo 4 desta dissertação, a análise de desempenho nas áreas dos cenários de rotina, conforme será verificado nas simulações presentes na Sub-subseção 6.3.1.4, estabelece que a topologia com 8 eNodeBs, conforme mostrado na Tabela 5.2, é suficiente para atender às necessidades dos usuários. Dentre as regiões estudadas se encontram o bairro Centro, Barreto, Fonseca, Icaraí, Piratininga (ao redor do CISP) e Piratininga (praia). É possível verificar que com tal abordagem a rede alcança uma cobertura de 27,1% (Figura 6.2) do município de Niterói, em termos de área; e 100% dos usuários da RCC com 95% de confiabilidade na borda de célula. Estes resultados foram alcançados em regiões de características tipicamente urbanas densas e urbanas. Não foi considerada a presença de usuários em áreas não povoadas, montanhas e regiões de vegetação muito elevadas.

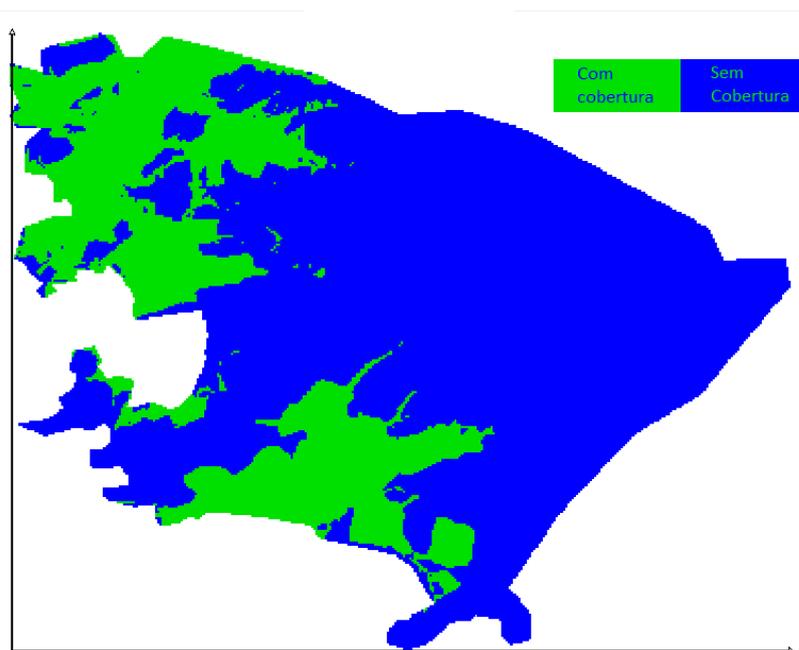


Figura 6.2: Cobertura parcial (27,1%) do município de Niterói.

#### 6.3.1.2 Análise do MCS pela SINR

O desempenho de um enlace depende da presença de sinais úteis comparados ao nível de ruído e às interferências, ou seja, o SINR é um parâmetro importante a ser considerado. O valor da SINR, dependente da localização e do tempo, fornece adequadamente um nível de qualidade de serviço, resultando em uma determinada taxa de transferência de dados e de erro de bits.

Ao analisar o desempenho da rede, calcula-se os mapas de cobertura (Figura 6.3, DL e 6.4, UL) mostrando onde o SINR é suficiente para suportar a taxa de dados alvo. Considerou-se o CQI de índice 2 (QPSK 1/9) para a borda da célula, através do qual é possível a transmissão/recepção de ao menos 1096 kbps.

Seguindo o critério anterior para estabelecimento mínimo de qualidade, deve-se garantir um CQI acima de 2, o que corresponde a um SINR acima de -4 dB. Valores abaixo de -4dB são considerados bordas da célula e não são visíveis nos mapas de cobertura. Portanto, neste tipo de análise não é possível verificar as regiões de borda.

No enlace de UL, também não é possível verificar o nível de interferência no mapa de cobertura. O número de usuários simultâneos e suas ocupações na rede tem impacto direto no valor de SINR, pois conforme esses parâmetros aumentam, também a proporção de interferência aumenta. O gráfico é apenas um estimativa superficial para cobertura da rede no UL. Só é possível avaliar o desempenho no UL através da etapa de capacidade da

rede.

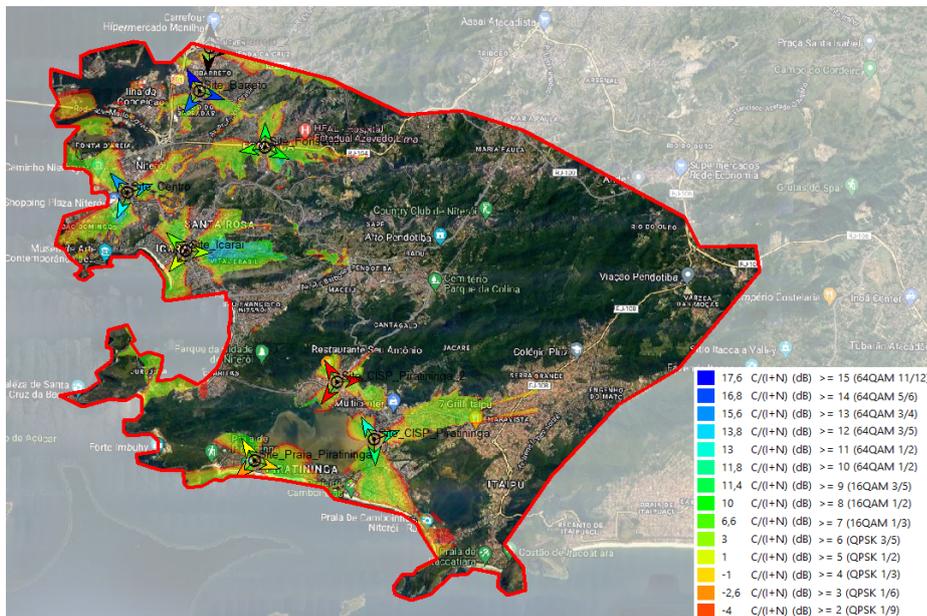


Figura 6.3: Cobertura por SINR PDSCH.

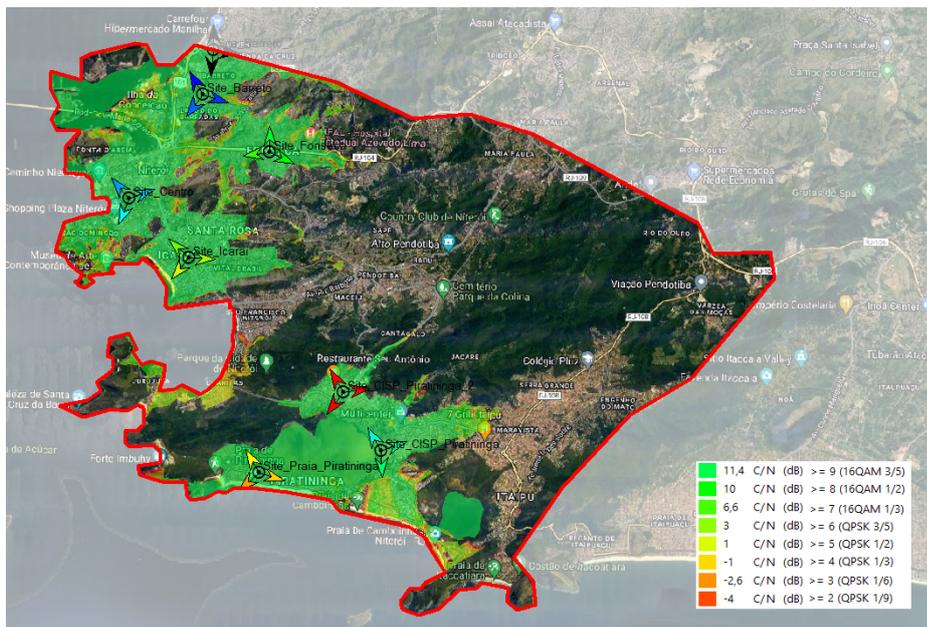


Figura 6.4: Cobertura por SNR PUSCH.

### 6.3.1.3 Região de borda da célula

A análise da borda da célula (Figura 6.5), região para qual é reservada parte do espectro total (que neste caso é adotado 1/3 da banda total para mitigação de interferência entre células e setores adjacentes), é realizada através da consideração da relação SINR.

São áreas que devem ser investigadas em etapas subsequentes a realização do estudo teórico para detecção de queda de chamadas; sucesso de *handover* – quando um dispositivo móvel se desloca de uma célula para outra sem perder a conexão –; e insuficiência de espectro.

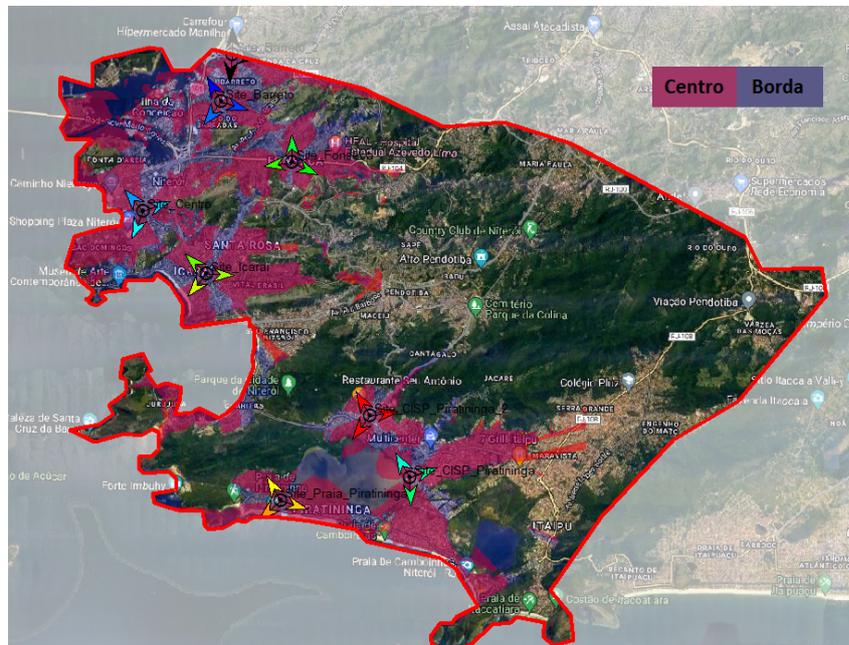


Figura 6.5: Regiões de borda das células.

#### 6.3.1.4 Vazão e demanda por eNodeB

Após a consideração de cobertura, parte-se para verificar se todos os usuários terão vazão suficiente para atender às suas demandas. Aplicando o perfil de tráfego e sorteando aleatoriamente usuários em cada simulação nas áreas de cobertura, gera-se os gráficos de demanda por vazão e de carga de tráfego ao nível de célula.

Para avaliar o desempenho da rede por simulação, serão executadas, em sequência, 100 realizações/ocorrências de uso da rede, gerando dois tipos de resultados: 1) comparação da vazão demandada por todos usuários na área de estudo (representada por um traçado azul) com a vazão efetivamente entregue pela rede (representada por um traçado vermelho), pelo número da realização de 1 a 100 (no eixo das abscissas), no UL e DL; e 2) histogramas de percentual de carga de tráfego na célula, permitindo visualizar o grau de saturação dos recursos disponíveis a partir das ocorrências. Esse parâmetro é definido como a razão entre a quantidade de recursos (de tempo-frequência) consumidos e a quantidade de recursos disponíveis na célula.

Nas Figuras 6.6, 6.8 e 6.7, 6.9, são mostrados os gráficos comparativos de vazão e

histogramas de carga, respectivamente, no UL e DL, na faixa alocada de 5+5 MHz, nos bairros Centro e Barreto. Essas situações apresentam o limite no consumo de recursos da rede. É possível observar tanto nos gráficos de vazão, como nos histogramas, que os recursos da rede são suficientes para atender à demanda no DL quanto no UL. Como esperado, o resultado é pior para o UL devido à menor potência de transmissão do UE (30 dB abaixo). Verifica-se de 16 a 18 pontos de sobrecarga no UL para o setor mais saturado do estudo, porém há poucos pontos no qual a rede se sobrecarrega em excesso. Os restante dos pontos saturados estão próximos da convergência entre demanda e vazão entregue. Essa quantidade de pontos pode ser considerada alta, entretanto, numa eventual primeira implementação, apesar do atual nível de saturação, será possível sanar as necessidades dos usuários, sem maiores consequências no desempenho da rede. Futuramente, ao avaliar o impacto da rede em situações reais, com agentes em campo, poderá ser realizado um novo estudo visando realizar uma expansão da rede nas áreas deficitárias com o aumento do número de eNodeBs. Ademais, a partir dessa situação, para envolver novas agências ou englobar novos usuários, também será necessária a implementação de uma nova eNodeB ou a expansão do espectro, e, portanto, outro estudo de capacidade e cobertura.

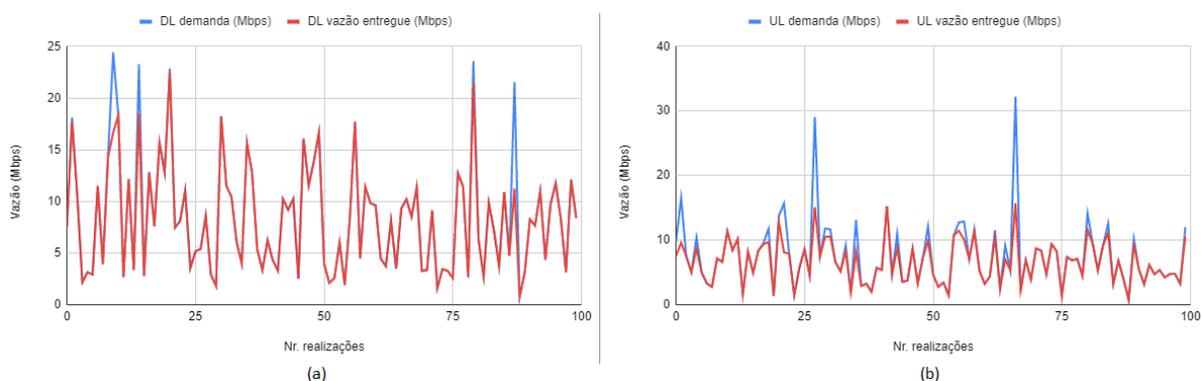


Figura 6.6: Vazão demandada e entregue em rotina (Centro) 5+5MHz: a) DL e b) UL.

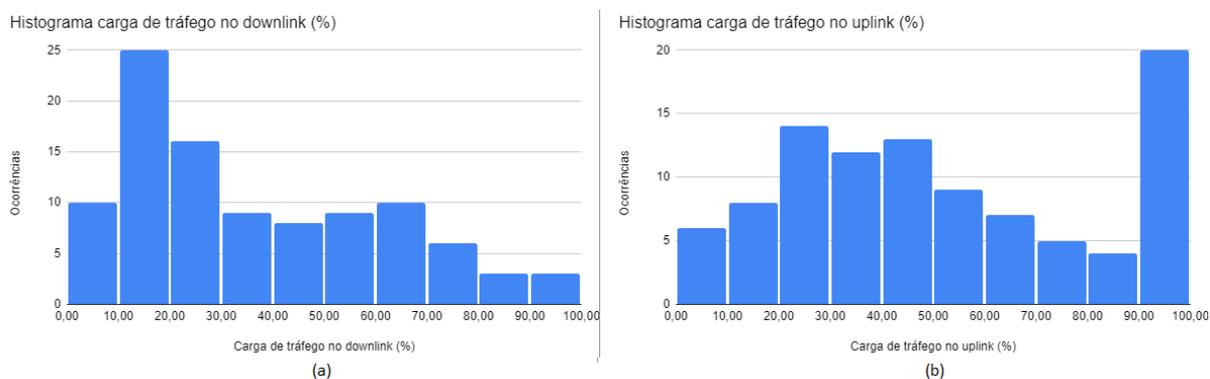


Figura 6.7: Histograma da carga de tráfego em rotina (Centro) 5+5MHz: a) DL e b) UL.

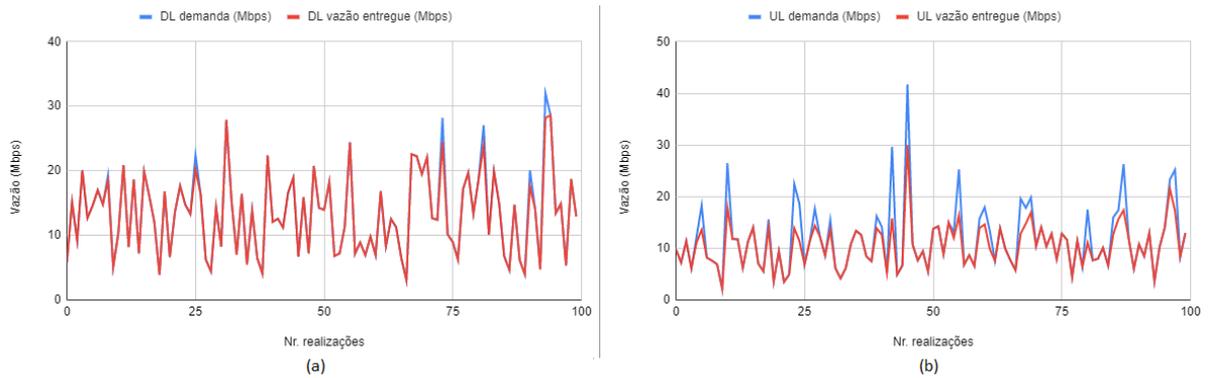


Figura 6.8: Vazão demandada e entregue em rotina (Barreto) 5+5MHz: a) DL e b) UL.

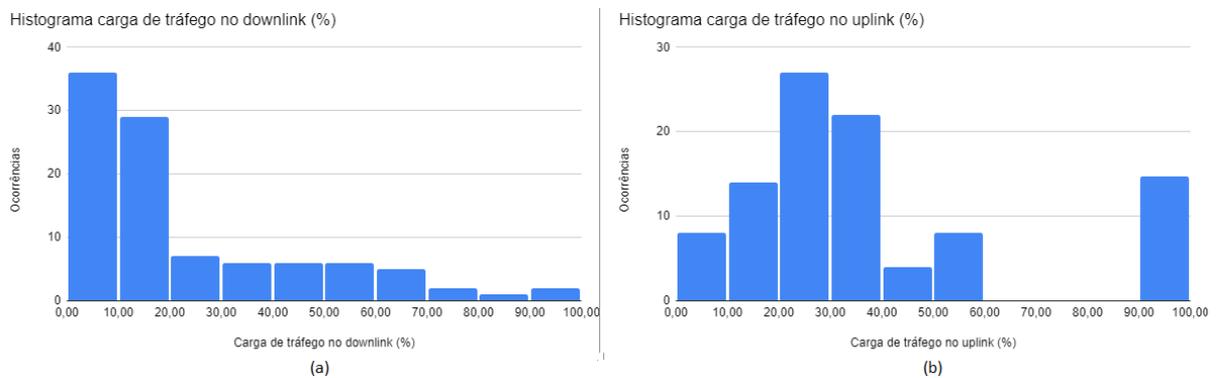


Figura 6.9: Histograma da carga de tráfego em rotina (Barreto) 5+5MHz: a) DL e b) UL.

Nas áreas restantes: Fonseca, Icaraí, Piratininga (ao redor do CISP) e Piratininga (praia); é possível observar tanto nos gráficos de vazão (Figura 6.10, 6.12, 6.14 e 6.16), como nos histogramas (Figura 6.11, 6.13, 6.15 e 6.17), que os recursos da rede são suficientes para atender à demanda no DL quanto no UL, pois a rede satura para poucas realizações e a vazão demandada na maioria dos casos é atendida. Como esperado, nesses casos o resultado também é pior para o UL. A diferença, entretanto, em relação aos casos anteriores, é que há ociosidade nestes resultados, logo essas regiões aceitam a inserção de novos usuários sem a necessidade de expansão do espectro e de eNodeBs.

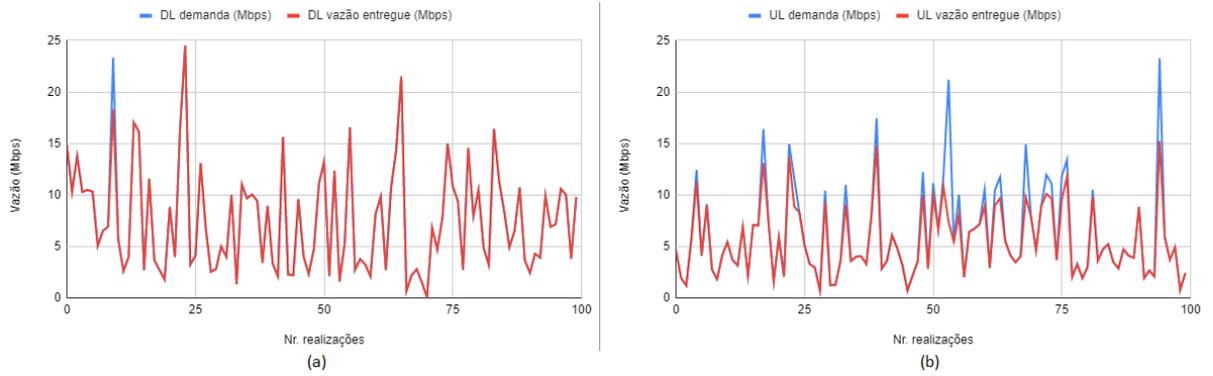


Figura 6.10: Vazão demandada e entregue em rotina (Fonseca) 5+5MHz: a) DL e b) UL.

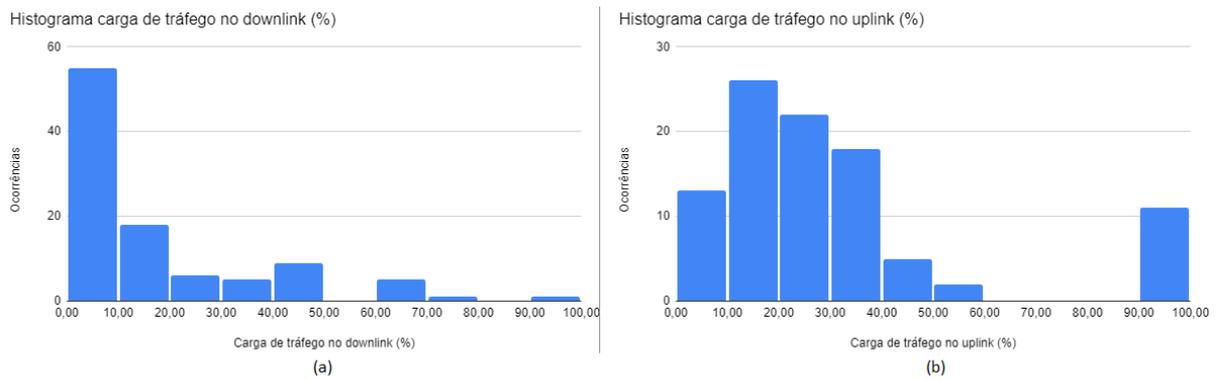


Figura 6.11: Histograma da carga de tráfego em rotina (Fonseca) 5+5MHz: a) DL e b) UL.

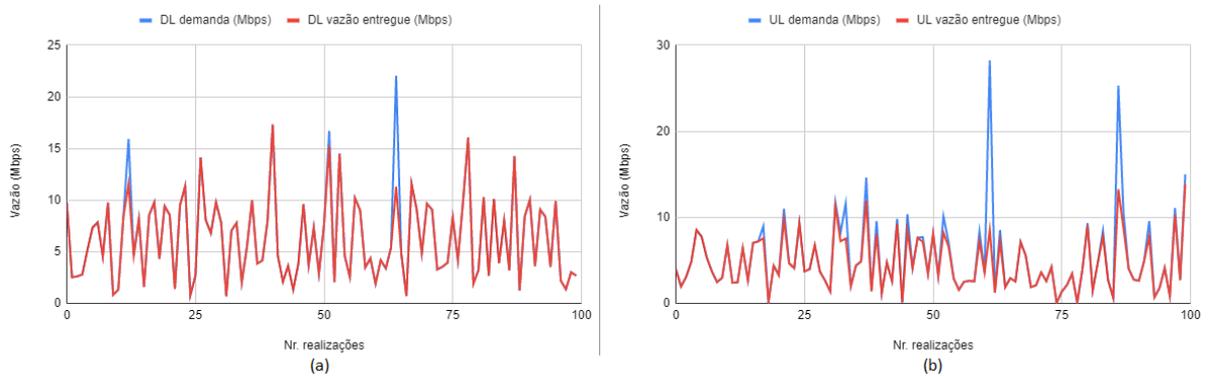


Figura 6.12: Vazão demandada e entregue em rotina (Icarai) 5+5MHz: a) DL e b) UL.

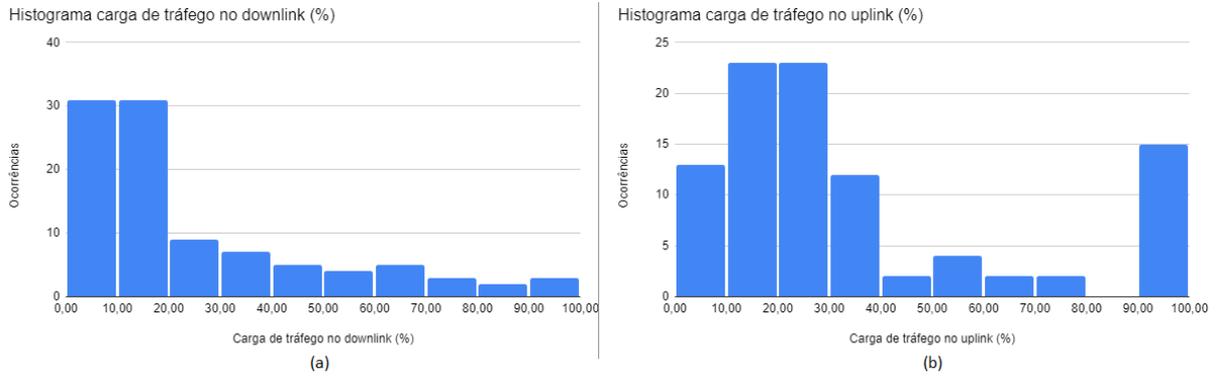


Figura 6.13: Histograma da carga de tráfego em rotina (Icarai) 5+5MHz: a) DL e b) UL.

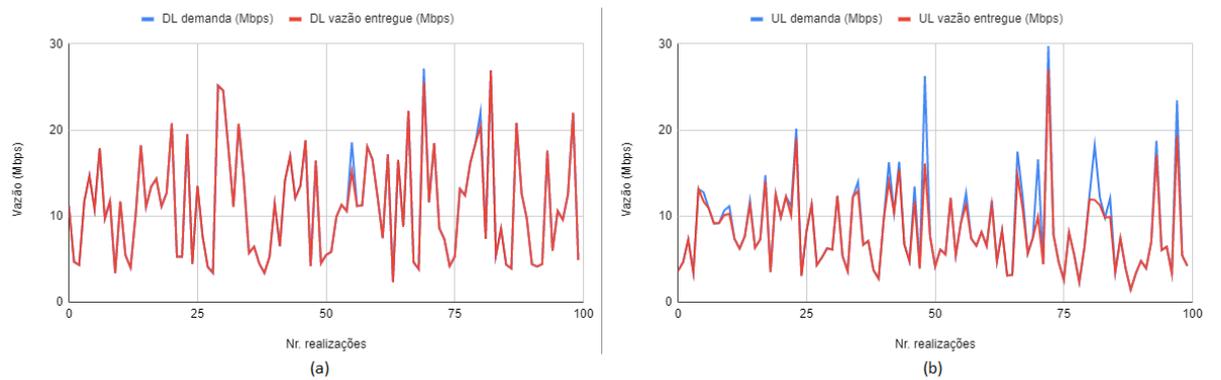


Figura 6.14: Vazão demandada e entregue em rotina (Piratininga – CISP) 5+5MHz: a) DL e b) UL.

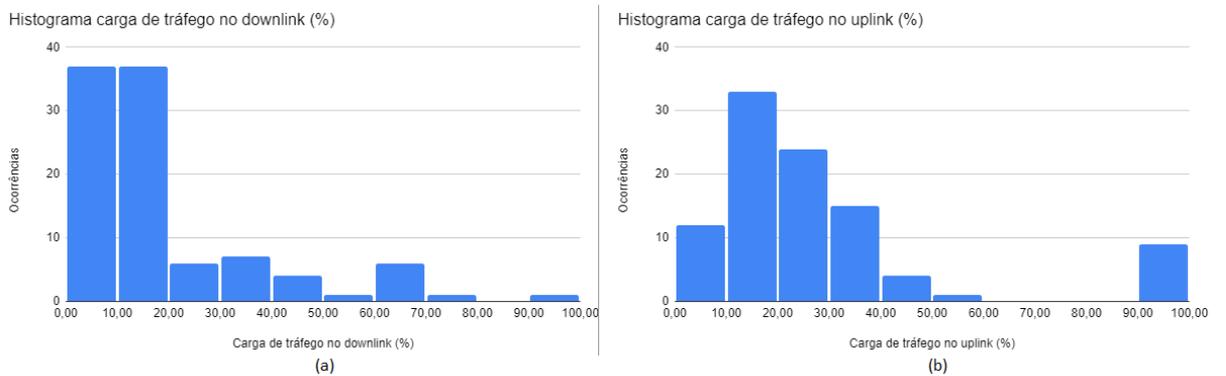


Figura 6.15: Histograma da carga de tráfego em rotina (Piratininga – CISP) 5+5MHz: a) DL e b) UL.

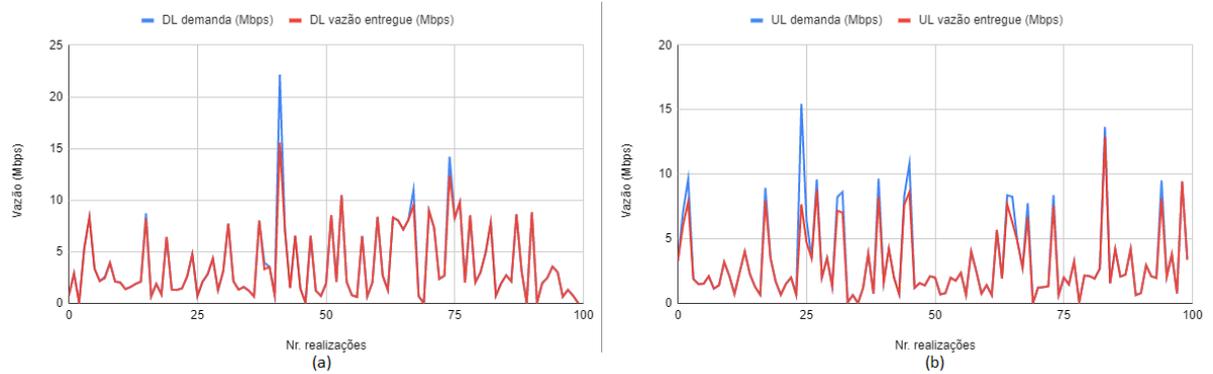


Figura 6.16: Vazão demandada e entregue em rotina (Piratininga – Praia) 5+5MHz: a) DL e b) UL.

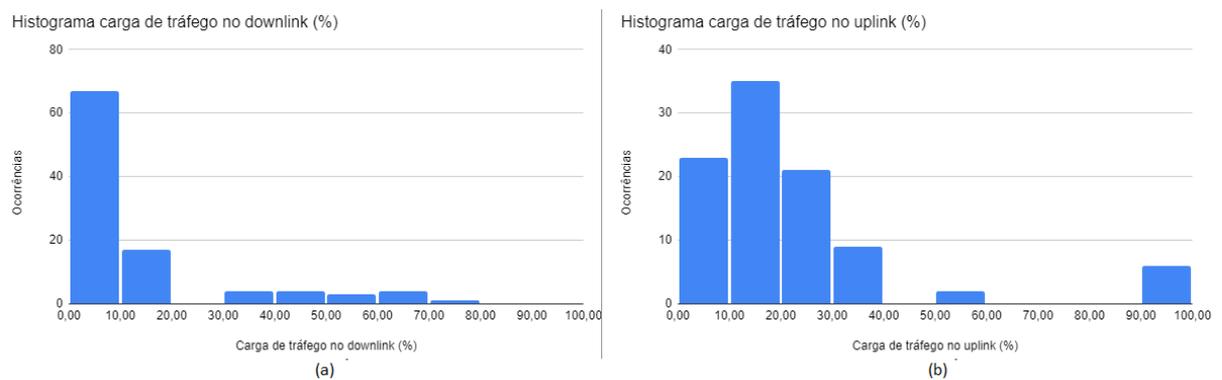


Figura 6.17: Histograma da carga de tráfego em rotina (Piratininga – Praia) 5+5MHz: a) DL e b) UL.



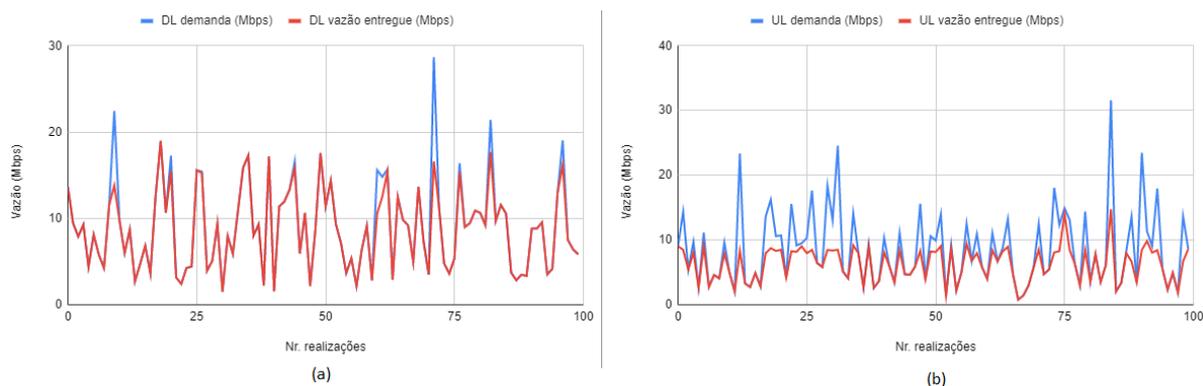


Figura 6.19: Vazão demandada e entregue em Evento público de grande impacto – Caminho Niemeyer 5+5MHz: a) DL e b) UL.

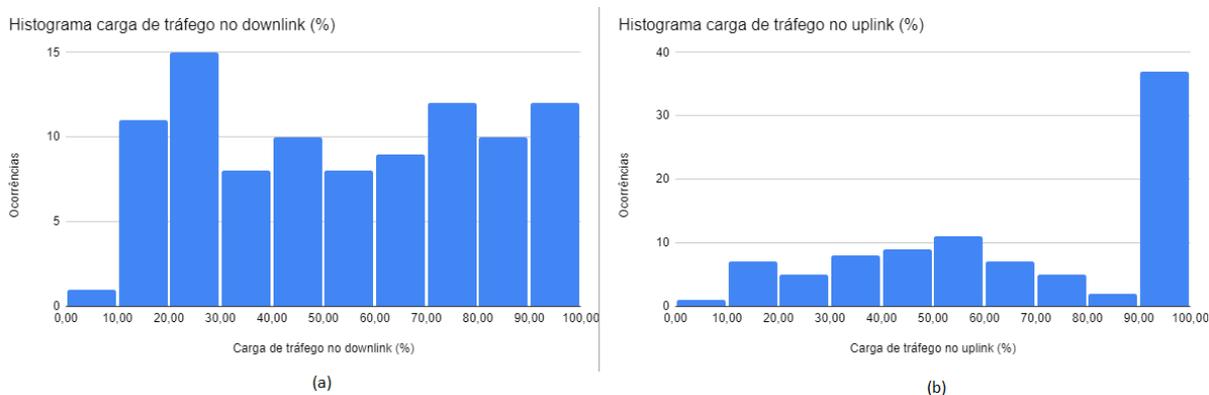


Figura 6.20: Histograma da carga de tráfego em Evento público de grande impacto – Caminho Niemeyer 5+5MHz: a) DL e b) UL.

necessidades de espectro para aplicações de mercado e aplicações estratégicas para o Estado”, tal qual é adotada pela *Federal Communications Commission* (FCC) – órgão americano de regulamentação das telecomunicações – como solução nos EUA.

Desta forma, para o caso aqui considerado (demanda de tráfego em evento com grande aglomeração de público e concentração de agentes), investiga-se esta alternativa de aumentar o espectro disponível para 10+10 MHz. Os resultados mostrados nas Figuras 6.21 e 6.22 mostram que a demanda no UL é atendida com esta solução, com exceção de algumas poucas realizações em que há um pico de demanda.

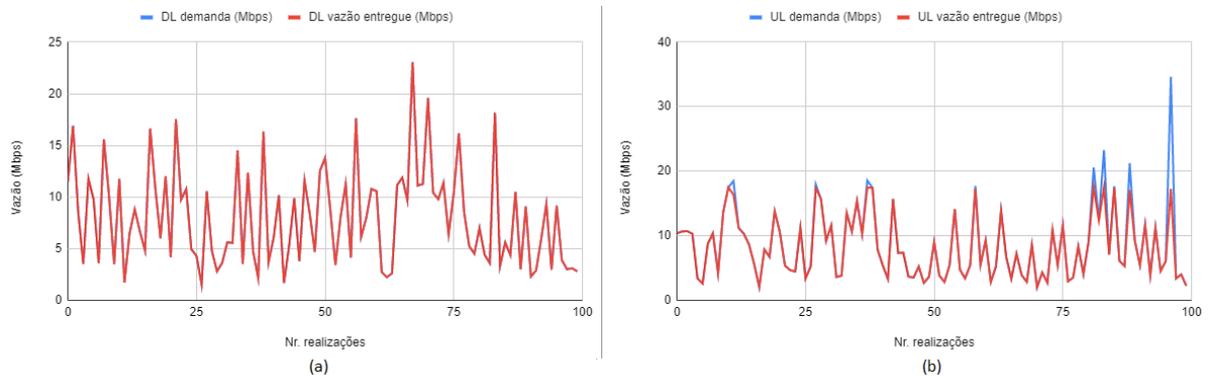


Figura 6.21: Vazão demandada e entregue em Evento público de grande impacto – Caminho Niemeyer 10+10MHz: a) DL e b) UL.

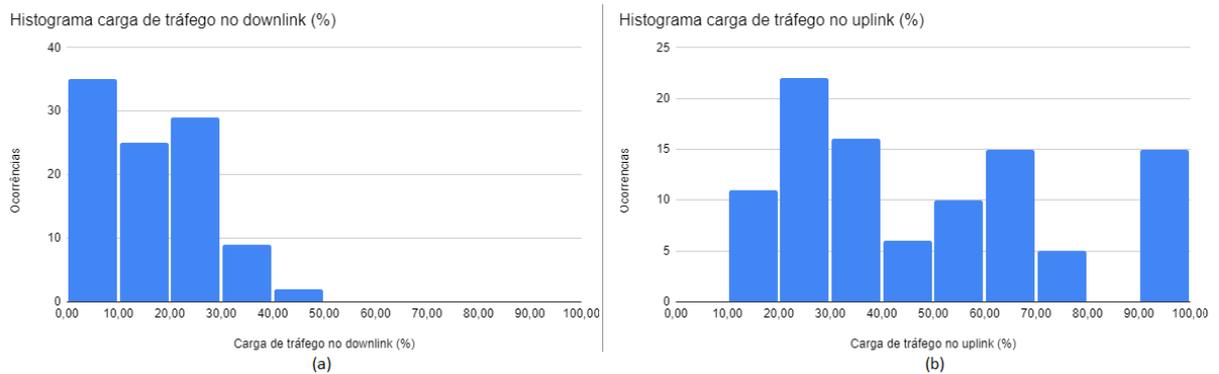


Figura 6.22: Histograma da carga de tráfego em Evento público de grande impacto – Caminho Niemeyer 10+10MHz: a) DL e b) UL.

### 6.3.3 Cenário 3 (evento inopinado catastrófico) em 700 MHz

#### 6.3.3.1 Análise da área de serviço

Devido à imprevisibilidade deste tipo de situação e a possibilidade de ocorrência em áreas de cobertura insuficiente, é previsto o uso de células rebocáveis (*Cell-on-Wheels* (CoW)). A CoW é uma torre celular portátil que é facilmente implantada e removida do local. É uma prática comum para estabelecer a cobertura e capacidade onde a rede com as eNodeBs fixas não são capazes de atender. A CoW inclui uma antena, dispositivo transceptor, bateria e outros equipamentos necessários para fornecer uma rede móvel sem fio estável, conforme necessário. Todo esse aparato é montado sobre veículos como caminhões ou reboques, o que torna toda a configuração portátil. Seu *backhaul* pode se estabelecer através de conexão de micro-ondas, por fibra ótica ou enlace com satélites [100]. Um exemplo deste equipamento é mostrado na Figura 6.23.

Além disso, neste tipo de cenário também é apropriado o uso de drone operando como uma eNodeB, conhecido como *Cell-on-Wings* [101]. Esta alternativa é especialmente útil em lugares onde os caminhos estão obstruídos, não permitindo a instalação das CoWs [102]. Em um futuro estudo poderá ser verificado o desempenho deste tipo de equipamento.



Figura 6.23: Célula rebocável (*Cell-on-Wheels* – CoW) [103].

A análise de desempenho da rede neste cenário é baseada numa topologia de apenas 1 CoW com apenas uma antena direcional de largura de feixe de  $65^\circ$ . A configuração é estabelecida para 100% de cobertura, considerando a proximidade e a visibilidade direta com a área de estudo.

Neste planejamento, a eNodeB móvel está posicionada entre 100 e 200 m de distância,



em ambos os casos. Isto acontece devido a um número elevado de usuários tentando se conectar simultaneamente à rede na qual carece de recursos disponíveis. No DL, é também possível afirmar que em grande parte das realizações a demanda de tráfego não é atendida. Neste tipo de situação são esperados outros tipos de soluções, que serão apresentados, para contornar o problema de saturação dos recursos.

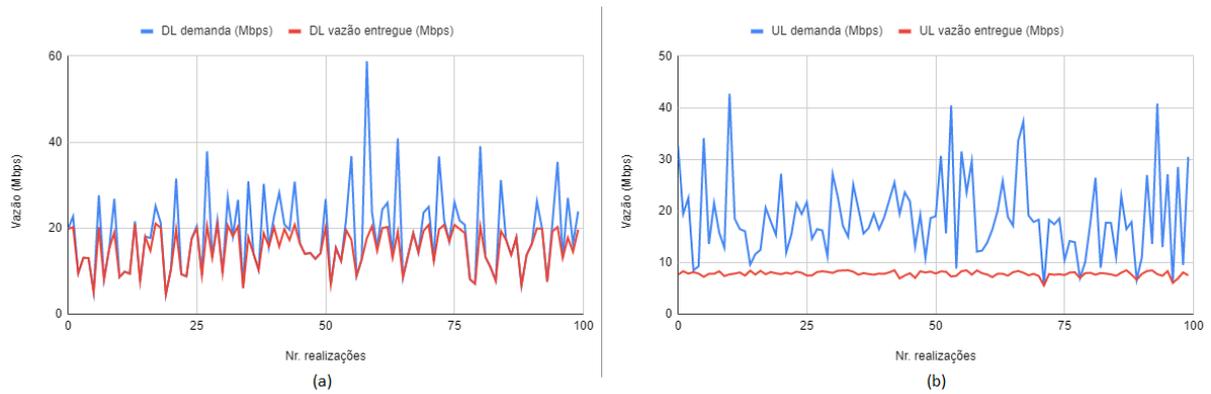


Figura 6.26: Vazão demandada e entregue em Morro do Estado 5+5MHz: a) DL e b) UL.

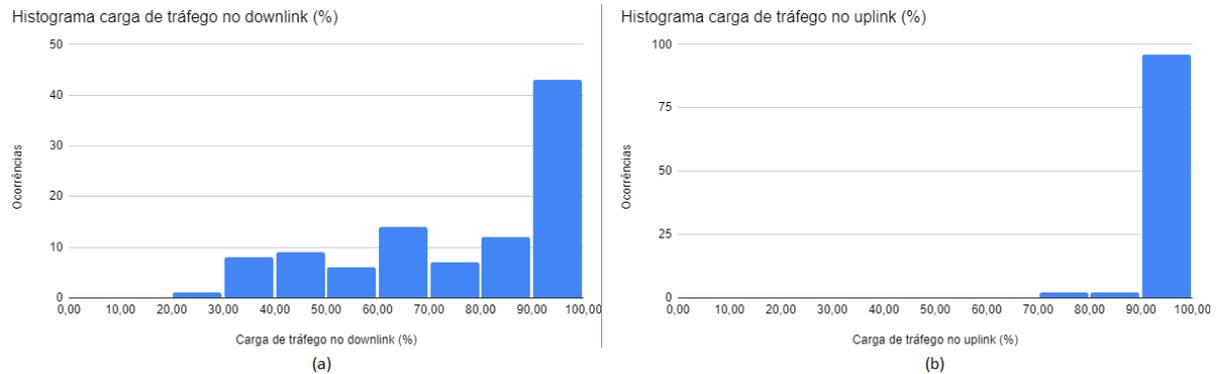


Figura 6.27: Histograma da carga de tráfego em Morro do Estado 5+5MHz: a) DL e b) UL

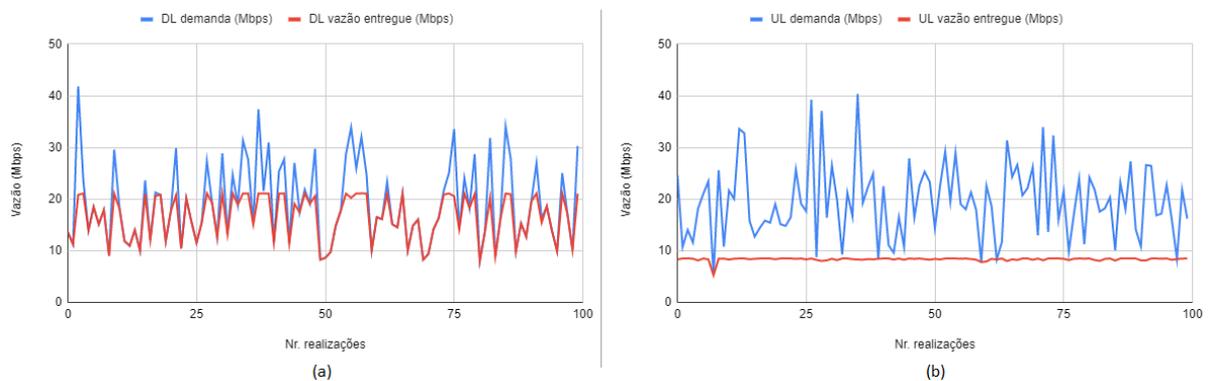


Figura 6.28: Vazão demandada e entregue em Vila Ipiranga 5+5MHz: a) DL e b) UL.

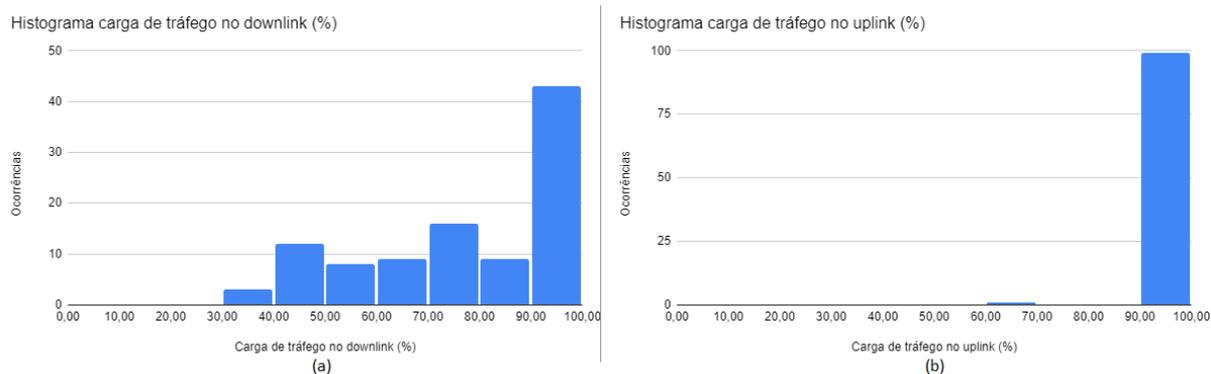


Figura 6.29: Histograma da carga de tráfego em Vila Ipiranga 5+5MHz: a) DL e b) UL

Um breve resumo dos resultados é mostrado na Tabela 6.1. Como observado anteriormente, verifica-se que o UL está saturado em aproximadamente 100% dos casos, limitado a apenas uma vazão de 7,81 e 8,34 Mbps para cada caso.

Tabela 6.1: Verificação dos casos mais críticos em 5+5MHz.

Região	Vazão média entregue (DL) (Mbps)	Vazão média entregue (UL) (Mbps)	Carga de tráfego média (DL) (%)	Carga de tráfego média (UL) (%)
Vila Ipiranga	16,54	8,34	79,13	99,5
Morro do Estado	15,30	7,81	77,52	99,18

### 6.3.3.3 Vazão e demanda por eNodeB com 10+10MHz

Com a finalidade de se avaliar o impacto no desempenho da rede com o aumento da largura de faixa para a transmissão, foi simulada a condição de 10+10 MHz de espectro, conforme feito anteriormente para o cenário de grande aglomeração de público. Para esta nova condição foram obtidos gráficos de vazão e demanda (Figuras 6.30 e 6.32), e o histograma de carga de tráfego correspondentes (Figuras 6.31 e 6.33).

Ainda verifica-se um razoável déficit entre a vazão demandada e a entregue no UL, embora seja uma diferença menor do que a observada para 5+5 MHz. Esses resultados indicam que, mesmo dobrando a largura de banda prevista pela resolução 625, uma RCC em um cenário típico de tragédia com demanda explosiva de tráfego não comportaria com desempenho satisfatório as aplicações PPDR para o UL.

Na realidade, o resultado encontrado está de acordo com documento elaborado pela FCC (*Federal Communications Commission*) [104], que afirma que nas piores emergên-

cias para as quais a segurança pública deve se preparar, mesmo o acesso a 20 MHz de espectro seria insuficiente para atender à demanda. Essa constatação sugere que uma política de implementação de RCC no país deve considerar, além do compartilhamento de ativos espectrais de operadoras comerciais e o uso de CoWs, também a implementação de um esquema de priorização de acesso entre agentes, para fornecer capacidade adequada quando cenários de grande gravidade ocorrerem.

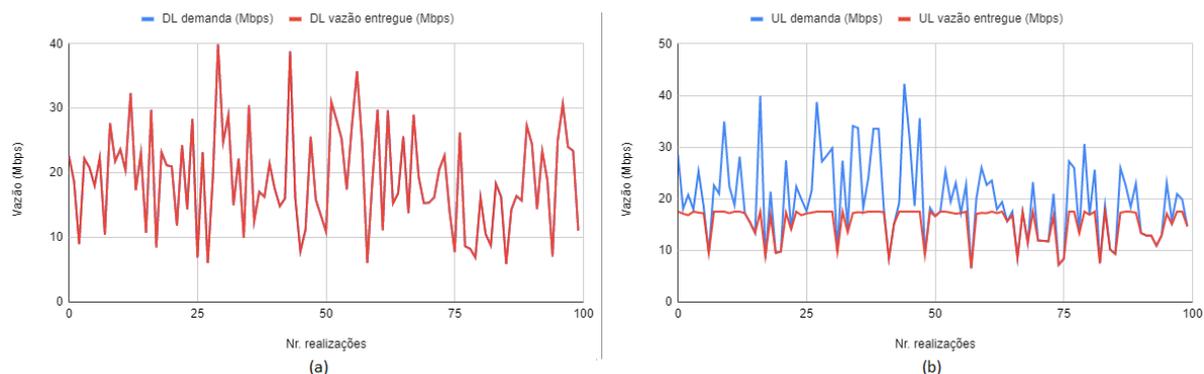


Figura 6.30: Vazão demandada e entregue em Morro do Estado 10+10MHz: a) DL e b) UL.

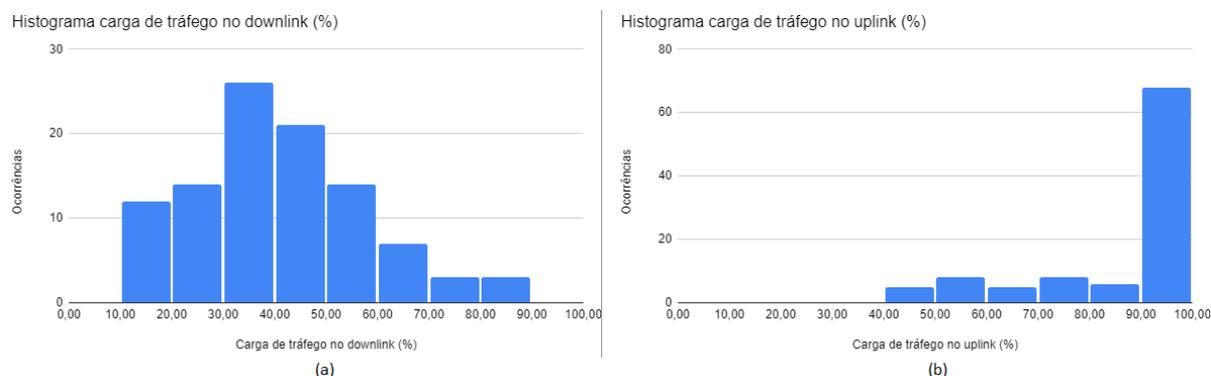


Figura 6.31: Histograma da carga de tráfego em Morro do Estado 10+10MHz: a) DL e b) UL.

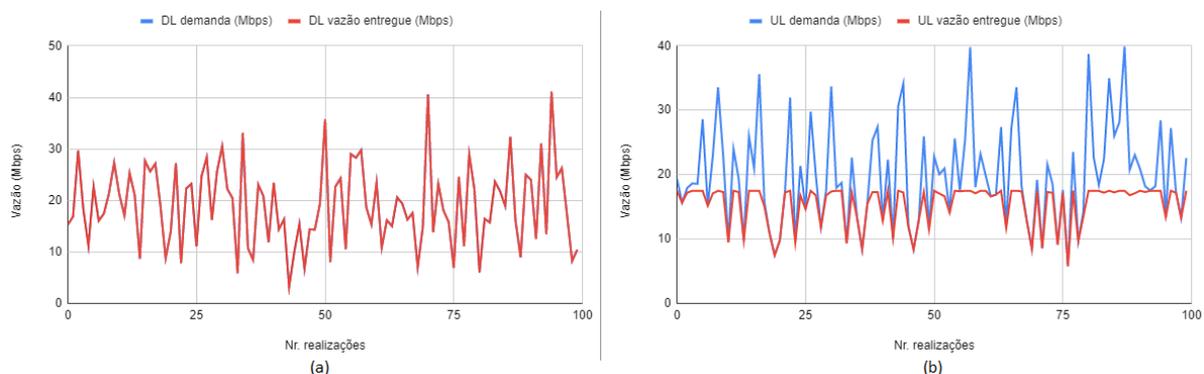


Figura 6.32: Vazão demandada e entregue em Vila Ipiranga 10+10MHz: a) DL e b) UL.

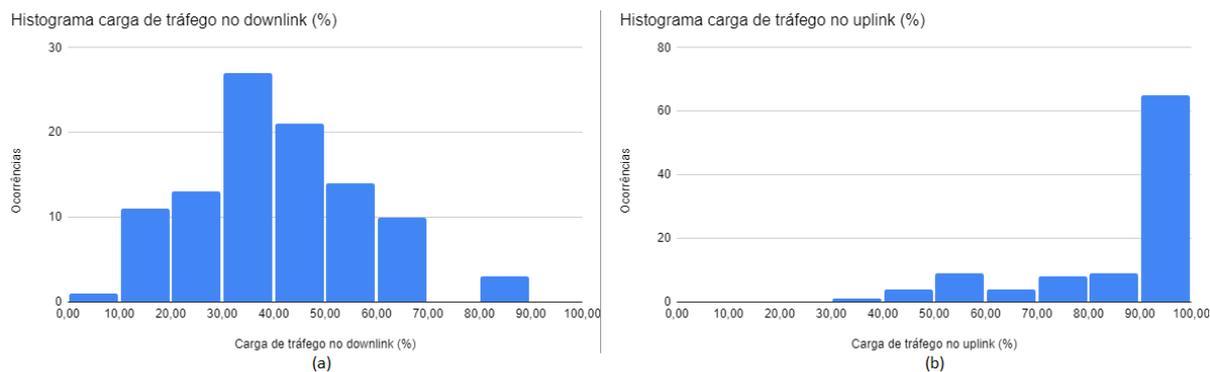


Figura 6.33: Histograma da carga de tráfego em Vila Ipiranga 10+10MHz: a) DL e b) UL.

#### 6.3.3.4 Vazão e demanda por eNodeB com 10+10MHz e redução de usuários

Foi simulada a condição de 10+10 MHz de espectro para o cenário de desastres no Morro do Estado e na Vila Ipiranga, com redução de 40% do número de agentes. Este cenário foi avaliado para que fosse verificado se os recursos da rede seriam suficientes para atender à demanda nestas condições. Este tipo de análise pode dar subsídios para um planejamento adequado da RCC nesses casos de extrema demanda, sugerindo o uso da rede por apenas uma parcela dos agentes, ou a implementação de um esquema de priorização de acesso à comunicação. Os resultados obtidos estão nas Figuras 6.34, 6.35 e 6.36, 6.37. Como esperado, observa-se que em ambas as localidades a rede consegue atender com maior folga a demanda. A ampliação do espectro e o menor número de agentes traz um significativo benefício, pois permite que o tráfego no UL seja atendido, com exceção de algumas poucas realizações, cerca de 10%, em que há um pico de demanda.

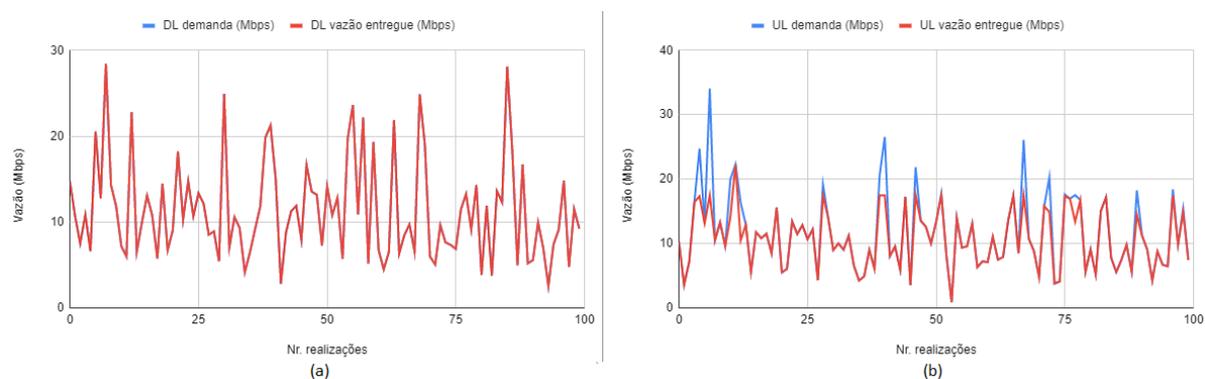


Figura 6.34: Vazão demandada e entregue em Morro do Estado 10+10MHz, redução 40% de agentes: a) DL e b) UL.

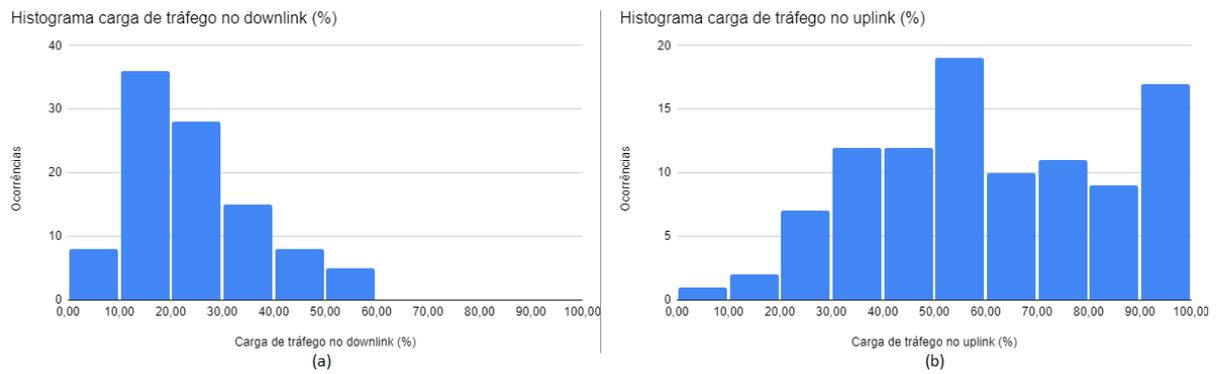


Figura 6.35: Histograma da carga de tráfego em Morro do Estado 10+10MHz, redução 40% de agentes: a) DL e b) UL.

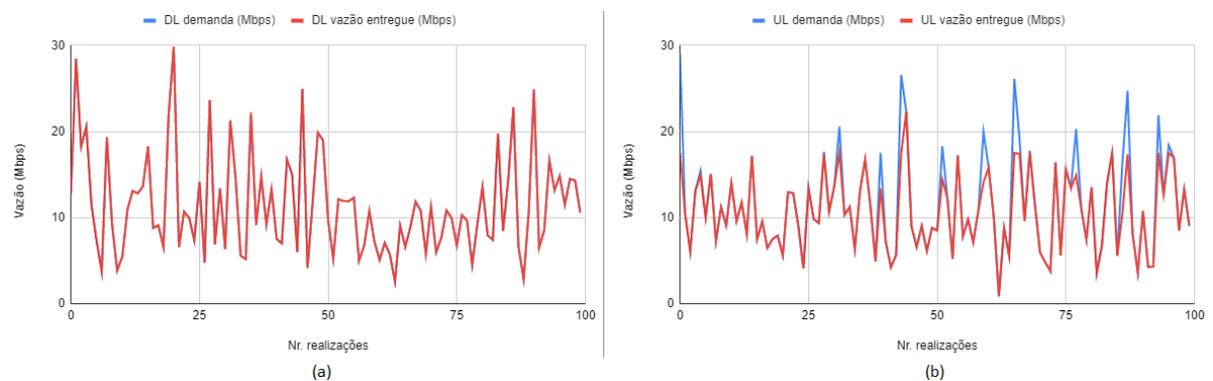


Figura 6.36: Vazão demandada e entregue em Vila Ipiranga 10+10MHz, redução 40% de agentes: a) DL e b) UL.

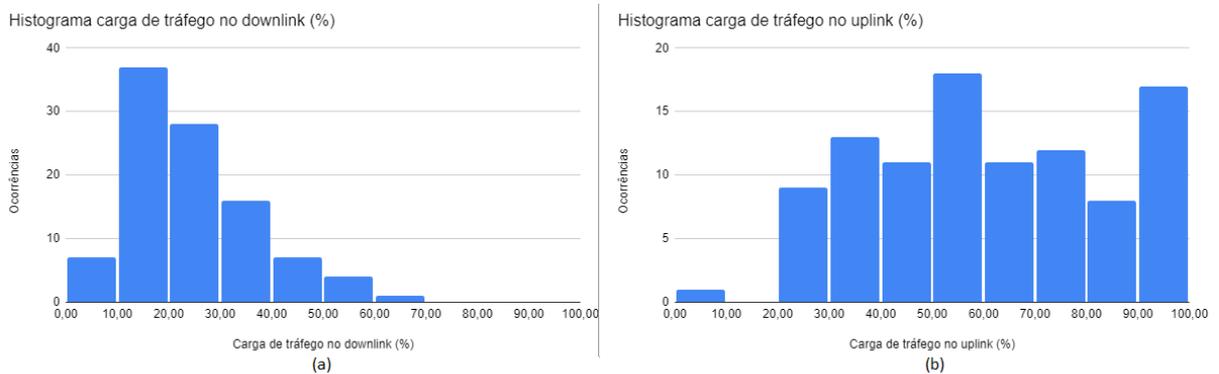


Figura 6.37: Histograma da carga de tráfego em Vila Ipiranga 10+10MHz, redução 40% de agentes: a) DL e b) UL.

## 6.4 Resultados para a faixa de 800 MHz

Sob as mesmas condições e os mesmos parâmetros das simulações anteriores, apenas alterando a faixa correspondente, analisa-se dois cenários para comparação de desempenho nas faixas de 700 e 800 MHz: o bairro Centro com 5+5 MHz, constatado como a situação mais saturada em cenário de rotina; e a comunidade Vila Ipiranga na situação de desastre,

em 10+10MHz, cenário mais crítico em geral.

Como realizado anteriormente, as comparações são feitas com base nos gráficos vazão pela demanda, e no histograma de carga de tráfego. Alguns gráficos obtidos em seções anteriores foram repetidos para facilitar a comparação. Os resultados obtidos para o Centro em 800 e 700 MHz estão presentes Figuras 6.38, 6.39 e 6.40, 6.41, e para a Vila Ipiranga nas Figuras 6.43, 6.44 e 6.45, 6.42. Como esperado, observa-se que em ambos os cenários, nas duas faixas consideradas, a rede se comporta de forma similar, com número de saturações próximo.

Outro resultado considerado para esta comparação são os valores dos percentis<sup>1</sup> de 5, 50 e 95% para as cargas de tráfego, obtidos a partir dos histogramas, e mostrados na Tabela 6.2, tanto no UL quanto o DL, nas faixas de 700 e 800 MHz, para os dois cenários. A similaridade é evidente, uma vez que os valores estão muito próximos em todos os casos considerados.

No cenário de desastres, considerando o uso de CoW, como a localidade está muito próxima da antena e em linha de visada para todos os usuários, os efeitos de propagação pouco afetam o desempenho ao considerar uma faixa um pouco superior a de 700 MHz. Nestas simulações, o usuários recebem um MCS alto em todos os pontos da área considerada.

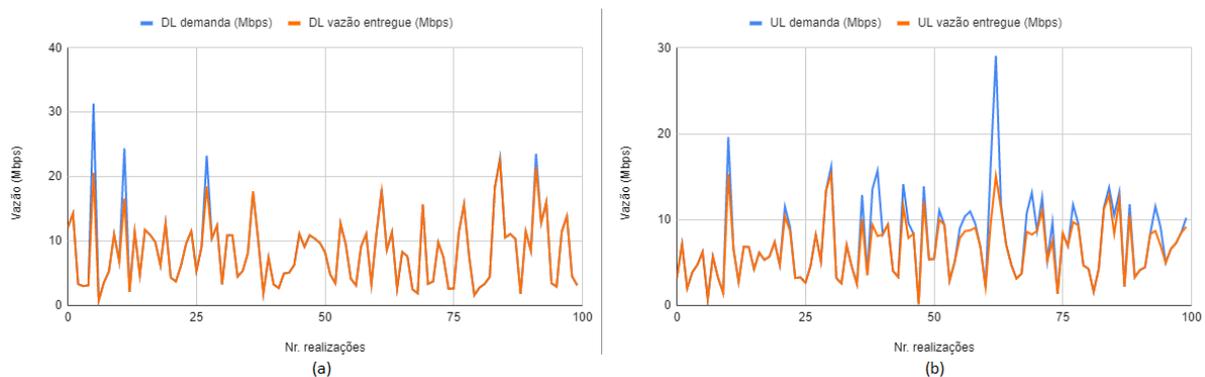


Figura 6.38: Vazão demandada e entregue em rotina (Centro) 5+5MHz, em 800MHz: a) DL e b) UL.

<sup>1</sup>O percentil  $k$  ( $P_k$ ) é o valor da amostra de um conjunto de dados ordenado de forma crescente, cuja posição, neste conjunto, é  $\frac{k \times N}{100}$ , onde  $k$  é um valor em uma escala de 100 que indica a porcentagem de uma distribuição igual ou inferior a ela; e  $N$  é o tamanho amostral.

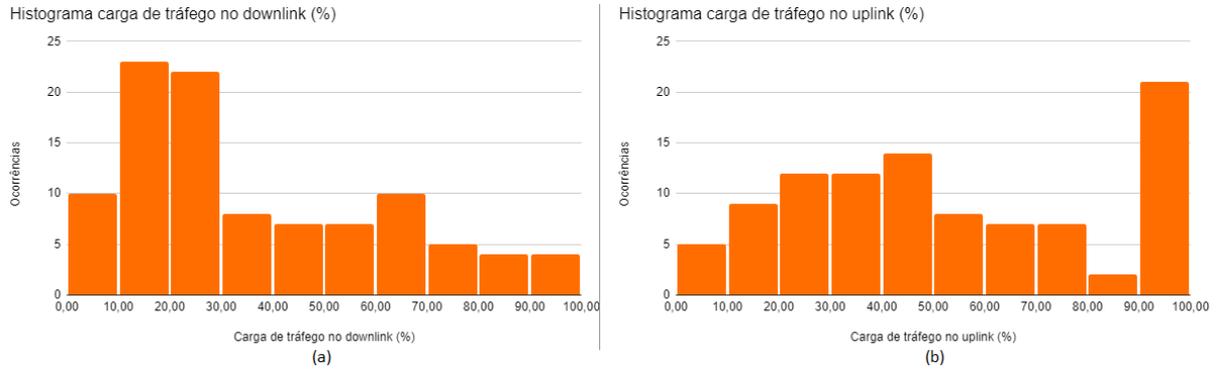


Figura 6.39: Histograma da carga de tráfego em rotina (Centro) 5+5MHz, em 800MHz: a) DL e b) UL.

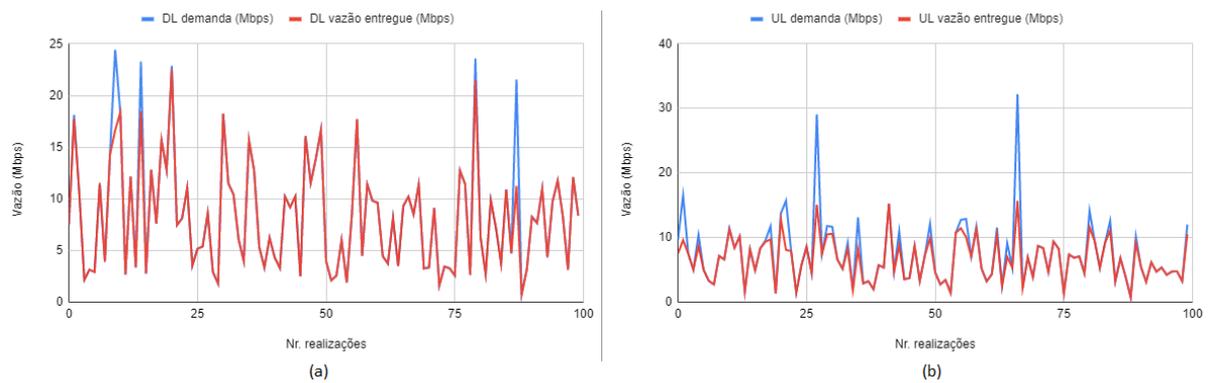


Figura 6.40: Vazão demandada e entregue em rotina (Centro) 5+5MHz, em 700MHz: a) DL e b) UL.

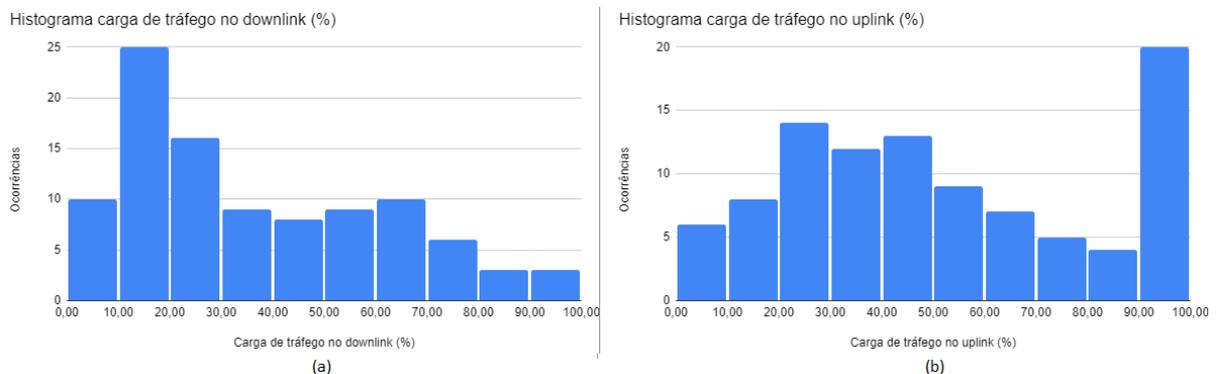


Figura 6.41: Histograma da carga de tráfego em rotina (Centro) 5+5MHz, em 700MHz: a) DL e b) UL.

Tabela 6.2: Avaliação do percentil para carga de tráfego.

Cenário	Faixa (MHz)	Enlace	Percentil (%)		
			5	50	95
Centro	700	DL	7,55	27,36	84,42
	800	DL	7,65	25,87	84,55
	700	UL	9,66	45,24	100
	800	UL	10,53	45,8	100
Vila Ipiranga	700	DL	14,74	39,41	63,32
	800	DL	16,16	40	64,41
	700	UL	51,15	100	100
	800	UL	53,36	100	100

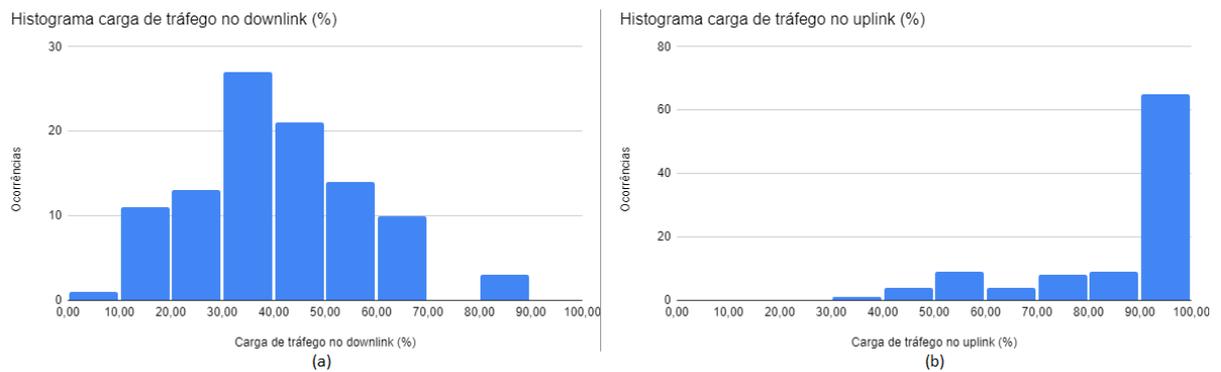


Figura 6.42: Histograma da carga de tráfego em Vila Ipiranga 10+10MHz, em 700MHz: a) DL e b) UL.

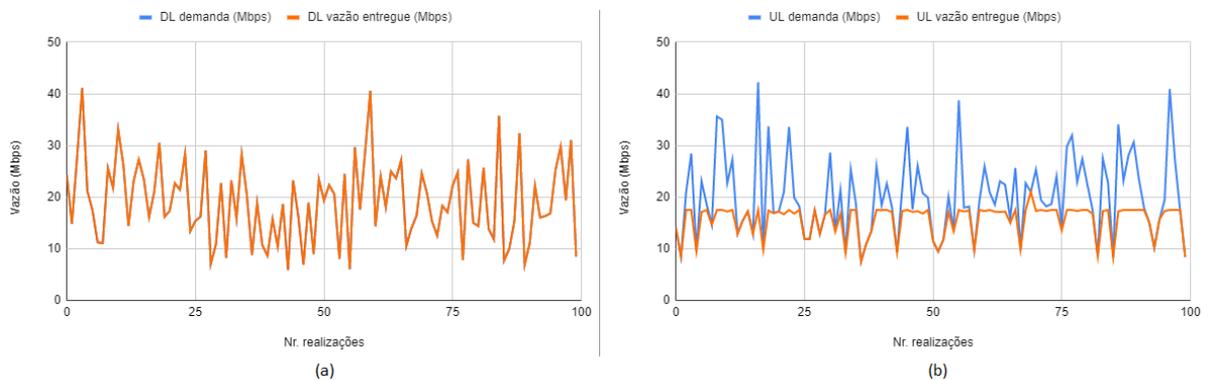


Figura 6.43: Vazão demandada e entregue em Vila Ipiranga 10+10MHz, em 800 MHz: a) DL e b) UL.

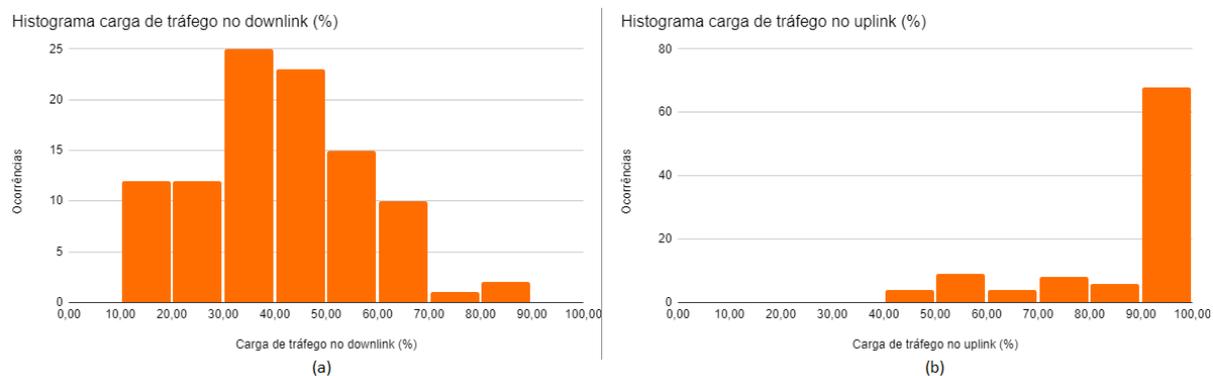


Figura 6.44: Histograma da carga de tráfego em Vila Ipiranga 10+10MHz, em 800MHz: a) DL e b) UL.

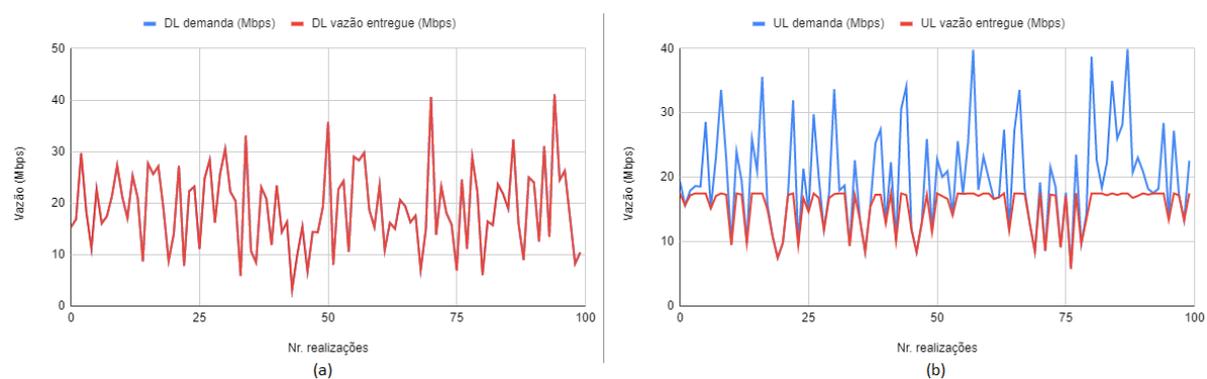


Figura 6.45: Vazão demandada e entregue em Vila Ipiranga 10+10MHz, em 700 MHz: a) DL e b) UL.

# Capítulo 7

## Conclusão e Trabalhos Futuros

### 7.1 Conclusão

Nesta dissertação foi realizado um planejamento de uma rede rádio, tendo como base a tecnologia 4G LTE de comunicações móveis, para apoio à atuação de agências PPDR do município de Niterói, que possuem a missão de garantir a segurança/ordem pública e mitigar danos após a ocorrência de desastres. Com base em informações fornecidas pelas Secretarias de Ordem Pública (cujos principais órgãos são a Guarda Municipal e o CISP) e de Defesa Civil, foram definidos os cenários típicos de utilização da rede de comunicações, no que se refere às áreas do município onde há maior probabilidade de atuação das agências, e também em relação ao perfil de uso dos agentes no acesso à rede (probabilidade de acesso, tipos de acesso, volume de dados trafegado etc).

Neste estudo, foram definidos três tipos básicos, distintos, de cenários de atuação das agências: *rotina*, *eventos de grande aglomeração*, e *desastres*. Para cada uma destas situações há um uso peculiar previsto de uso dos recursos da rede, e este fato foi levado em consideração no planejamento aqui proposto.

Os principais resultados apresentados nesta dissertação são basicamente dois:

1. Proposição de localidades para instalação de eNodeBs, levando em consideração a entrega de cobertura e capacidade de transmissão de dados nas áreas de maior frequência de atuação das agências do município. O plano apresentado levou em conta a minimização da quantidade de estações para redução de custos de implantação e de manutenção, e também a co-localização com eNodeBs de operadoras comerciais, visando também a redução de custos de instalação e de manutenção da infraestrutura.

2. Uma vez definidas as localidades das eNodeBs, foi feita uma análise de desempenho da rede proposta, considerando parâmetros típicos de uma rede LTE, e o perfil de uso de aplicações dos agentes quando em atuação em campo. Esta análise foi feita com base em simulações de uso da rede usando o *software* Atoll Forsk, e foram levantados resultados que comparam a carga de tráfego demandada da rede, por célula, e a capacidade da rede projetada de atender a esta demanda.

Em relação ao cenário de atuação de *rotina*, os resultados obtidos por simulação mostram que é possível estabelecer comunicações críticas com garantia de QoS para os usuários com a localização das eNodeBs propostas neste estudo, tanto no *uplink* como no *downlink* das conexões. Segundo as informações coletadas junto às agências, as áreas principais a serem atendidas são: bairro Fonseca, Piratininga, Barreto, Centro e Icaraí.

No cenário simulado de *evento público de grande aglomeração*, os resultados obtidos indicam saturação para o espectro duplex de (5 + 5 MHz) que, na realidade, é a largura de faixa prevista segundo a Resolução 757 da ANATEL para atuação PPDR no Brasil. A ampliação para (10 + 10 MHz) soluciona o problema segundo os resultados aqui obtidos, sem a necessidade de medidas adicionais, e, além disso, permite que novos usuários possam ser cadastrados na rede.

Por fim, os resultados mostram que o espectro de (5 + 5 MHz) é insuficiente para a demanda prevista quando o cenário é de atuação das agências em *desastres*, situação na qual há grande convergência de potenciais usuários e com um uso explosivo de aplicações de comunicações. A ampliação em 100% da largura de faixa espectral reduz o problema, porém essa alternativa por si só não é suficiente. Medidas adicionais serão necessárias para pleno funcionamento da rede, como por exemplo: i) ativos espectrais extra, possivelmente compartilhados de operadoras móveis comerciais; ii) priorização e preempção de usuários e serviços; iii) redução planejada do número de agentes habilitados para acessarem a rede.

## 7.2 Trabalhos futuros

Nesta dissertação realizou-se o planejamento rádio de uma rede LTE para comunicações críticas em Niterói. Obviamente, em uma possível implementação futura da rede, é necessário levar em consideração dados obtidos em campo (*site survey*, testes reais de conexão etc) para realimentação do projeto e uma possível adaptação de suas diretrizes às condições reais de emprego.

Esta revisão do projeto, após uma fase de confirmação de desempenho por testes em campo, deve ser feita também com auxílio de plataformas de simulação e com a obtenção de resultados que comparam a demanda prevista e a vazão entregue, nas áreas identificadas de atuação das agências. Desta forma, vislumbra-se, portanto, um trabalho futuro importante para a implementação física, final, da rede de comunicações críticas em Niterói.

Além disso, considerando a implementação de uma RCC para Niterói e adjacências, é razoável admitir que esta iniciativa seja dividida em fases, onde a primeira seria realizada com base na proposta desta dissertação, e as posteriores procurariam atender regiões adjacentes em municípios vizinhos, com interesse e apoio da Secretaria de Segurança do Estado do Rio de Janeiro. Este trabalho de ampliação da rede inicialmente proposta também é uma possível frente de desenvolvimento futura.

Por fim, é importante mencionar que esta dissertação foi desenvolvida tomando como base a tecnologia LTE, pelas razões expostas anteriormente. Entretanto, o uso do 5G NR nos próximos anos tende a aumentar, tomando gradativamente um espaço que hoje é ocupado pelo LTE. A expectativa é que o 5G passe a ter maior presença em redes privadas de comunicações críticas, e também os equipamentos utilizados nesta tecnologia tenham seus custos reduzidos, tornando viável o seu emprego para aperfeiçoamento de uma RCC como a projetada e implantada para Niterói. O uso gradativo e complementar do 5G para a RCC de Niterói pode também motivar um trabalho, futuro, de planejamento inicial, usando também para isto plataformas de simulação (o Atoll Forsk dispõe de módulos para o 5G NR) e métricas semelhantes de desempenho às usadas nesta dissertação.

# Referências

- [1] DOUMI, T.; DOLAN, M. F.; TATESH, S.; CASATI, A.; TSIRTSIS, G.; ANCHAN, K.; FLORE, D. LTE for public safety networks. *IEEE Communications Magazine*, v. 51, n. 2, p. 106–112, 2013.
- [2] ITU. Report ITU-R M.2377-1 - Radiocommunication objectives and requirements for Public Protection and Disaster Relief. 2017. Disponível em: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2377>. Data de acesso: 19 out 2020.
- [3] 3rd Generation Partnership Project. *LTE for Critical Communications*. 2013. Disponível em: <https://www.3gpp.org/news-events/conferences/1468-lte-for-critical-communications>. Data de acesso: 19 out 2020.
- [4] ITU-R. *The use of International Mobile Telecommunications (IMT) for broadband Public Protection and Disaster Relief (PPDR) applications* . 2016. Disponível em: [https://www.itu.int/dms\\_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2291-1-2016-PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2291-1-2016-PDF-E.pdf) . Data de acesso 03 mar 2023.
- [5] LIEBHART, R.; CHANDRAMOULI, D.; WONG, C.; MERKEL, J. *LTE for Public Safety Networks*. : Wiley, 2015. 77-83 p. ISBN 9781118829868.
- [6] Prefeitura de Niterói. *Portal da Transparência*. 2020. Disponível em: <http://transparencia.niteroi.rj.gov.br/Portal-da-Transparencia/portal-da-transparencia.html>, item “Planejamento e Orçamento”. Data de acesso: 26 out 2020.
- [7] ASTELY, D.; DAHLMAN, E.; FODOR, G.; PARKVALL, S.; SACHS, J. LTE Release 12 and Beyond. *IEEE Communications Magazine*, v. 51, p. 154–160, 07 2013.
- [8] SAVUNEN, T.; HÄMMÄINEN, H.; KILKKI, K.; KEKOLAHTI, P. The role of mobile network operators in next-generation public safety services. *Telecommunications Policy*, v. 47, p. 102489, 04 2023.
- [9] VOLK, M.; STERLE, J. 5G Experimentation for Public Safety: Technologies, Facilities and Use Cases. *IEEE Access*, PP, p. 1–1, 03 2021.
- [10] CURWEN, P.; WHALLEY, J. *Fourth Generation Mobile Communication*. : Springer, 2013. 35-36 p. ISBN 978-3-319-02209-3.
- [11] SAUTER, M. *From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G: An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband*. : John Wiley and Sons, 2021. 5 p. ISBN 9781119714712.
- [12] DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKÖLD, J. *4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. : Academic Press, 2014. 2 p. ISBN 978-0123854896.

- [13] YONIS, A.; ABDULLAH, M. F. L.; GHANIM, M. LTE-FDD and LTE-TDD for cellular communications. *Progress in Electromagnetics Research Symposium*, 01 2012.
- [14] JúNIOR, J. S. P.; MORAES, I. Uma avaliação do consumo de energia da comunicação D2D em redes celulares. *Revista Brasileira de Computação Aplicada*, v. 14, p. 51–59, 10 2022.
- [15] Agência Nacional de Telecomunicacoes. *Resolução nº 757*. 08 de nov de 2022. Disponível em: <https://www.in.gov.br/web/dou/-/resolucao-anatel-n-757-de-8-de-novembro-de-2022-443351429>.
- [16] ITU. *Calculation of free-space attenuation*. 2019. Disponível em: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-4-201908-I!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-4-201908-I!!PDF-E.pdf). Data de acesso: 20 dez 2022.
- [17] OKUMURA, Y. Field strength and its variability in vhf and uhf land mobile radio service. *Rev. Elect. Commun. Laboratory*, v. 16, p. 825–873, 01 1968.
- [18] ITU. *Propagation by diffraction*. 1997. Disponível em: [https://www.itu.int/dms\\_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-5-199708-S!!PDF-E.pdf](https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.526-5-199708-S!!PDF-E.pdf). Data de acesso: 20 dez 2022.
- [19] CHRYSANTHOU, C.; BERTONI, H. Variability of Sector Averaged Signals for UHF Propagation in Cities. *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, v. 39, p. 352 – 358, 12 1990.
- [20] ZHAO, K.; ZHANG, S.; YING, Z.; BOLIN, T.; HE, S. Reduce the hand-effect body loss for LTE mobile antenna in CTIA talking and data modes. *Progress In Electromagnetics Research*, v. 137, p. 73–85, 01 2013.
- [21] SOLIMAN, M. M.; AHMED, M.; SABBIR, M. M.; RAFI, I.; ALKAEED, M.; MAHFUZ, M. Investigation of Signal Penetration Loss Variation on Different Building Components and Disparity of Receiver Location on 3G/4G Network in the Context of Bangladesh. In: *2020 11th IEEE Control and System Graduate Research Colloquium*. 2020.
- [22] ETSI. *European Telecommunications Standards Institute*. Disponível em: <https://www.etsi.org/>. Data de acesso: 12 fev 2020.
- [23] ARIB. *Association of Radio Industries and Businesses*. Disponível em: <https://arib.or.jp/english/>. Data de acesso: 12 fev 2020.
- [24] TTC. *Telecommunication Technology Committee*. Disponível em: <http://www.ttc.or.jp/>. Data de acesso: 12 fev 2020.
- [25] TTA. *Telecommunications Technology Association*. Disponível em: <http://www.tta.or.kr/>. Data de acesso: 12 fev 2020.
- [26] CCSA. *China Communications Standards Association*. Disponível em: <http://www.ccsa.org.cn/>. Data de acesso: 12 fev 2020.
- [27] ATIS. *Alliance for Telecommunications Industry Solutions*. Disponível em: <http://www.atis.org/>. Data de acesso: 12 fev 2020.

- [28] TSDSI. *Telecommunications Standards Development Society*. Disponível em: <https://tsdsi.in/>. Data de acesso: 02 mar 2023.
- [29] Ericsson. *Network coverage*. 2020. Disponível em: <https://www.ericsson.com/en/mobility-report/reports/june-2020/network-coverage>. Data de acesso: 12 fev 2020.
- [30] TCCA. *TETRA and Critical Communications Association*. 2022. Disponível em: <https://tcca.info/>. Data de acesso: 20 jun 2022.
- [31] APCO. *The Association of Public-Safety Communications Officials*. 2022. Disponível em: <https://www.apcointl.org/>. Data de acesso: 07 jun 2022.
- [32] AGBOJE, O.; POPOOLA, S.; ATAYERO, A. LTE-Advanced for Rapid Mobile Broadband Penetration in Developing Countries. *International Journal of Applied Engineering Research*, v. 12, p. 7863–7872, 10 2017.
- [33] ITU. *REPORT ITU-R M.2134 - Requirements related to technical performance for IMT-Advanced radio interface(s)*. 2008. Disponível em: <https://www.itu.int/pub/R-REP-M.2134>. Data de acesso: 14 fev 2020.
- [34] PENTTINEN, J. *The LTE/SAE Deployment Handbook*. : John Wiley and Sons, 2012. 3-10 p. ISBN 9780470977262.
- [35] TRAN, T.-T.; SHIN, Y.; SHIN, O.-S. Overview of Enabling Technologies for 3GPP LTE-advanced. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 12 2012.
- [36] 3GPP. *Technical Report (TR) 36.913 - Requirements for Further Advancements for E-UTRA (LTE-Advanced)*. 2008. Disponível em: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2585> . Data de acesso: 15 fev 2020.
- [37] 3GPP. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); User Equipment (UE) radio transmission and reception*. 2021. Disponível em: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2411> . Data de acesso: 27 jan 2023.
- [38] Agência Nacional de Telecomunicacoes. *Resolução nº 625*. 11 de nov de 2013. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2013/644-resolucao625> . Data de acesso: 14 fev 2020.
- [39] International Telecommunication Union. *Resolution ITU-R 646 (Rev.WRC-15)*. 2016. Disponível em: <https://www.itu.int/oth/R0A0600001A/en>. Data de acesso: 10 out 2022.
- [40] TeleSintese. *Proposta da ANATEL traz embate entre Exército e PETROBRÁS por faixa de 700 MHz*. 2022. Disponível em: <https://www.telesintese.com.br/proposta-da-anatel-traz-embate-entre-exercito-e-petrobras-por-faixa-de-700-mhz/> . Data de acesso: 18 mai 2022.

- [41] BERARDINELLI, G.; TEMINO, L.; FRATTASI, S.; RAHMAN, M.; MOGENSEN, P. OFDMA vs. SC-FDMA: Performance Comparison in Local Area IMT-A Scenarios. *Wireless Communications, IEEE*, v. 15, p. 64 – 72, 11 2008.
- [42] Rohde & Schwarz. *R&S TS8980 test system analyzes LTE quality indicators: CQI, PMI and RI*. 2011. Disponível em: [https://cdn.rohde-schwarz.com/magazine/pdfs\\_1/article/203/NEWS\\_203\\_english\\_TS8980.pdf](https://cdn.rohde-schwarz.com/magazine/pdfs_1/article/203/NEWS_203_english_TS8980.pdf).
- [43] CHUANG, C.-H.; LIN, P. Performance study for HARQ-ARQ interaction of LTE. *Wireless Communications and Mobile Computing*, v. 10, p. 1459–1469, 11 2010.
- [44] KITANA, A.; TRAORE, I.; WOUNGANG, I. Impact Study of a Mobile Botnet over LTE Networks. In: *Journal of Internet Services and Information Security*. 2016.
- [45] SESIA, M.; BAKER, M. *LTE, the UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. 2009. 1-611 p.
- [46] 3GPP. *General Packet Radio Service (GPRS) Enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) Access*. 2020. Disponível em: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/123400\\_123499/123401/17.06.00\\_60/ts\\_123401v170600p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/123400_123499/123401/17.06.00_60/ts_123401v170600p.pdf) . Data de acesso: 06 dez 2021.
- [47] 3GPP. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification*. 2020. Disponível em: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2437> . Data de acesso: 06 dez 2021.
- [48] 3GPP. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation*. 2020. Disponível em: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2425> . Data de acesso: 06 dez 2021 .
- [49] 3GPP. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Multiplexing and channel coding*. 2020. Disponível em: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2426> . Data de acesso: 06 dez 2021.
- [50] 3GPP. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Layer Procedures*. 2020. Disponível em: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2427> . Data de acesso: 06 dez 2021.
- [51] DAHLMAN, E.; PARKVALL, S.; SKÖLD, J. *4G: LTE/LTE-Advanced for Mobile Broadband*. 2014. 124 p. ISBN 978-0123854896.
- [52] ACHARYA, J.; GAO, L.; GAUR, S. *LTE Signal Structure and Physical Channels*. : Wiley, 2014. 45-71 p. ISBN 9781118511862.
- [53] STASIAK, M.; GLABOWSKI, M.; WISNIEWSKI, A.; ZWIERZYKOWSKI, P. *Modeling and Dimensioning of Mobile Networks: From GSM to LTE*. : John Wiley and Sons, 2011. 46-48 p. ISBN 9780470665862.

- [54] RINDHE, B.; NARAYANKHEDKAR, S. Effects of cyclic prefix on OFDM system. In: *ICWET '10: Proceedings of the International Conference and Workshop on Emerging Trends in Technology*. 2010. p. 420–424.
- [55] 3GPP. *LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures*. 2020. Disponível em: [https://www.etsi.org/deliver/etsi\\_ts/136200\\_136299/136213/14.02.00\\_60/ts\\_136213v140200p.pdf](https://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136213/14.02.00_60/ts_136213v140200p.pdf) . Data de acesso: 06 dez 2021 .
- [56] RAGALEUX, A.; BAEY, S.; KARACA, M. Standard-Compliant LTE-A Uplink Scheduling Scheme With Quality of Service. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 66, n. 8, p. 7207–7222, 2017.
- [57] MUKHOPADHYAY, A.; DAS, G. Low Complexity Fair Scheduling in LTE/LTE-A Uplink Involving Multiple Traffic Classes. *IEEE Systems Journal*, v. 15, n. 2, p. 1616–1627, 2021.
- [58] 3GPP. *Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for Support of Radio Resource Management* . 2020. Disponível em: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=2420> . Data de acesso: 06 dez 2021.
- [59] GHOSH, A.; RATASUK, R. *Essentials of LTE and LTE-A, isbn = 9780521768702*. : Cambridge University Press, 2011. 98 p.
- [60] KIMURA, D.; SEKI, H. Inter-Cell Interference Coordination (ICIC) Technology. *Fujitsu scientific technical journal*, v. 48, p. 89–94, 01 2012.
- [61] GUI, J.; GAO, S.-x.; JIANG, Z.-p. PCI Planning Based on Local Search in LTE Network. *DEStech Transactions on Computer Science and Engineering*, 01 2019.
- [62] ACEDO-HERNÁNDEZ, R.; TORIL, M.; LUNA-RAMÍREZ, S.; CASCALES, I. de la B.; FAOUR, N. Analysis of the impact of PCI planning on downlink throughput performance in LTE. *Computer Networks*, v. 76, 01 2015.
- [63] ULEMA, M. *Fundamentals of Public Safety Networks and Critical Communications Systems: Technologies, Deployment, and Management*. : Wiley, 2018. (IEEE Press Series on Networks and Service Management). ISBN 9781119369547.
- [64] KUNAVUT, K. An Overview of Digital Trunked Radio: Technologies and Standards. *Journal of Industrial Technology*, v. 10, 01 2014.
- [65] CHAUDHRY, A.; HAFEZ, R. LMR and LTE for Public Safety in 700 MHz Spectrum. *Wireless Communications and Mobile Computing*, v. 2019, 06 2019.
- [66] Samsung. *Mission Critical Services Standards: Advancing Critical Communications Across Industries* . 2021. Disponível em: <https://www.samsung.com/global/business/networks/insights/blog/0831-mission-critical-services-standards-advancing-critical-communications-across-industries/> . Data de acesso: 8 jun 2022.

- [67] 3GPP. *Mission Critical Services in 3GPP*. 2017. Disponível em: <https://www.3gpp.org/news-events/3gpp-news/mc-services> . Data de acesso: 03 mar 2023.
- [68] ETSI. *ETSI Mission Critical Plugtests to drive Future Railway Mobile Communication System*. 2020. Disponível em: <https://www.etsi.org/committee?id=1817> . Data de acesso: 03 mar 2023.
- [69] TCCA. *Mission Critical Broadband Applications*. 2022. Disponível em: <https://tcca.info/documents/April-2022-MC-Broadband-Applications.pdf/> . Data de acesso: 03 mar 2023.
- [70] FirstNet. *First Responder Network Authority of the United States*. 2022. Disponível em: <https://www.firstnet.com/> . Data de acesso: 07 jun 2022.
- [71] GOV.UK. *Emergency Services Network*. 2022. Disponível em: <https://www.gov.uk/government/publications/the-emergency-services-mobile-communications-programme/emergency-services-network> . Data de acesso 07 jun 2022.
- [72] Ministry of the Interior and Safety of South Korea. *Disaster and Safety Communications Network (Korea Safe-net)*. 2017. Disponível em: <https://www.mois.go.kr/eng/sub/a03/bestPractices7/screen.do> . Data de acesso: 07 jun 2022.
- [73] International Telecommunication Union – ITU. *Report ITU-R M.2033*. 2003. Disponível em: Radiocommunication objectives and requirements for public protection and disaster relief . Data de acesso: 11 fev 2022.
- [74] International Telecommunication Union – ITU. Report for the TETRA Association: Public safety mobile broadband and spectrum needs, Report no. 16395-94. 2010. Disponível em: [https://www.pc.gov.au/\\_\\_\\_data/assets/pdf\\_file/0003/189840/sub004-public-safety-mobile-broadband-attachment7.pdf](https://www.pc.gov.au/___data/assets/pdf_file/0003/189840/sub004-public-safety-mobile-broadband-attachment7.pdf) . Data de acesso 11 fev 2022.
- [75] Electronic Communications Committee – ECC. *LEWP-RCEG Matrix*. Maio 2013. Disponível em: <https://docdb.cept.org/download/766> . Data de acesso: 14 abr 2022.
- [76] ELNASHAR, A. *Design, Deployment and Performance of 4G-LTE Networks: A Practical Approach*. : John Wiley and Sons, 2014. 349-350 p. ISBN 9781118683217.
- [77] MISHRA, A. *Fundamentals of Network Planning and Optimisation 2G/3G/4G: Evolution to 5G*. : Wiley, 2018. 32-33 p. ISBN 9781119331711.
- [78] RAPPAPORT, T. *Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd Edition*. 2001. 104 - 105 p. ISBN 0130422320.
- [79] ROUIL, R.; GAREY, W.; GENTILE, C.; GOLMIE, N.; SCHWINGHAMMER, P. Increasing Public Safety Broadband Network Resiliency Through Traffic Control. *Elsevier Digital Communications and Networks*, v. 4, p. 48–57, 2018.

- [80] HUAWEI. *Long Term Evolution (LTE) Radio Access Network Planning Guide*. 2011. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1-VmqNVNtj4urra3NIQcycQRGnr2HeGaO/view?usp=sharing> . Data de acesso: 4 jul 2021.
- [81] MISHRA, A. *Fundamentals of Network Planning and Optimisation 2G/3G/4G: Evolution to 5G*. : John Wiley Sons, 2018. 41 p.
- [82] JABER, M.; DAWY, Z.; AKL, N.; YAACOUB, E. Tutorial on LTE/LTE-A Cellular Network Dimensioning Using Iterative Statistical Analysis. *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 18, n. 2, p. 1355–1383, 2016.
- [83] Secretaria de Ordem Pública de Niterói (SEOP). *Site Oficial da SEOP (Niterói)*. 2021. Disponível em: <https://seop.niteroi.rj.gov.br/> . Data de acesso: 26 out 2022.
- [84] Secretaria Municipal de Defesa Civil e Geotecnia de Niterói. *Site Oficial da Defesa Civil (Niterói)*. 2022. Disponível em: <https://www.defesacivildeniteroi.com.br/> . Data de acesso 26 out 2022.
- [85] FERRUS, R. LTE: the Technology Driver for Future Public Safety Communications. *IEEE Commun. Mag*, v. 51, p. 154–161, 01 2013.
- [86] Electronic Communications Committee – ECC. *User requirements and spectrum needs for future European broadband PPDR systems (Wide Area Networks)*. Maio 2013. Disponível em: <https://docdb.cept.org/download/764> . Data de acesso: 7 jun 2022.
- [87] TCCA. *TETRA Direct Mode and LTE Proximity Services (ProSe) compared*. 2016. Disponível em: [https://tcca.info/documents/2016-august\\_p3\\_comparing\\_tetra\\_dmo\\_with\\_-lte\\_prose.pdf/](https://tcca.info/documents/2016-august_p3_comparing_tetra_dmo_with_-lte_prose.pdf/).
- [88] COUTO, M.; GUIMARÃES, A. Faixa 5 + 5 MHz para uso na segurança pública no Brasil: estudo de casos. In: *XL Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais*. 2022.
- [89] ANATEL. *Sistema de Gestão de Certificação e Homologação*. 2023. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/certificacao-de-produtos/consulta-de-produtos> . Data de acesso: 02 mar 2023.
- [90] MOTOROLA. *MOTOTRBO ION Data Sheet*. 2022. Disponível em: [https://www.motorolasolutions.com/content/dam/msi/docs/ion\\_lacr/pt/LACR\\_POR\\_MOTOTRBO\\_Ion\\_Datasheet.pdf](https://www.motorolasolutions.com/content/dam/msi/docs/ion_lacr/pt/LACR_POR_MOTOTRBO_Ion_Datasheet.pdf) . Data de acesso: 22 out 2022.
- [91] FORSK. *Site Oficial do simulador Atoll da empresa FORSK*. 2022. Disponível em: <https://www.forsk.com/> . Data de acesso: 01 abr 2022.
- [92] FERRUS, R.; SALLEN, O. *Mobile Broadband Communications for Public Safety: The Road Ahead Through LTE Technology*. : Wiley, 2015. 19-22 p.
- [93] Motorola. *LTE RF System Design Procedure for use with Atoll*. 2010. 256-257 p. Disponível em: [https://drive.google.com/file/d/1N15q9EOoCodtcADZ07EGnHztN5-p2PJ\\_/view](https://drive.google.com/file/d/1N15q9EOoCodtcADZ07EGnHztN5-p2PJ_/view) . Data de acesso: 27 jan 2023.

- [94] Atoll Radio Planning. *Atoll 3.3.2 Technical Reference Guide Radio*. 2016. 477-479 p. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1UgzVSqBA8tizwdBxARwDUNCW1bVPzwcgC/view> . Data de acesso: 24 nov 2022.
- [95] ANATEL. *Mosaico (Sistema Integrado de Gestão e Controle do Espectro)*. 2022. Disponível em: <https://sistemas.anatel.gov.br/se/public/view/b/licenciamento.php> . Data de acesso: 24 nov 2022.
- [96] HUAWEI. *Long Term Evolution (LTE) Radio Access Network Planning Guide*. 2011. Disponível em: <https://drive.google.com/file/d/1-VmqNVNtj4urra3NIQcycQRGnr2HeGaO/view?usp=sharing> . Data de acesso: 4 jul 2021.
- [97] USGS. *Earth Explorer – USGS*. 2022. Disponível em: <https://earthexplorer.usgs.gov/> . Data de acesso: 13 out 2022.
- [98] Campbell Scientific, Inc. *Sistema de Gestão de Certificação e Homologação*. 2016. Disponível em: <https://s.campbellsci.com/documents/us/technical-papers/link-budget.pdf> . Data de acesso: 02 mar 2023.
- [99] Agência Nacional de Telecomunicações. *Análise nº 119/2022/EC*. 2019. Disponível em: [https://sei.anatel.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md\\_pesq\\_documento\\_consulta\\_externa.php?8-74Kn1tDR89f1Q7RjX8EYU46IzCFD26Q9Xx5QNDbqb2AAzvzwdpFl2GHthMyci6PSMI6HyQrT\\_zqwdteTTyzTUb4iNIzdSJLX3yaaIA1oSfgrTPyg\\_Qhm9dQ\\_gszcV](https://sei.anatel.gov.br/sei/modulos/pesquisa/md_pesq_documento_consulta_externa.php?8-74Kn1tDR89f1Q7RjX8EYU46IzCFD26Q9Xx5QNDbqb2AAzvzwdpFl2GHthMyci6PSMI6HyQrT_zqwdteTTyzTUb4iNIzdSJLX3yaaIA1oSfgrTPyg_Qhm9dQ_gszcV).
- [100] Motorola Solutions. *LXN 6000 LTE Infrastructure* . 2019. Disponível em: [https://www.motorolasolutions.com/content/dam/msi/docs/oil-and-gas-lacr/en\\_xl/LXN\\_6000\\_LTE\\_Deployable\\_data-sheet\\_ENG.pdf](https://www.motorolasolutions.com/content/dam/msi/docs/oil-and-gas-lacr/en_xl/LXN_6000_LTE_Deployable_data-sheet_ENG.pdf).
- [101] IEEE. *ATT introduces 5G Flying COWs (Cell on Wings) drones* . 2022. Disponível em: <https://techblog.comsoc.org/2022/06/22/att-introduces-5g-flying-cows-cell-on-wings-drones/> . Data de acesso 03 mar 2023.
- [102] ATT. *Flying COW Connects Puerto Rico* . 2017. Disponível em: [https://about.att.com/inside\\_connections\\_blog/flying\\_cow\\_puertori](https://about.att.com/inside_connections_blog/flying_cow_puertori) . Data de acesso 03 mar 2023.
- [103] Verizon. *Having a (Verizon) COW at Great Dayton Fair*. 2015. Disponível em: <https://www.verizon.com/about/news/having-verizon-cow-great-dayton-fair-qa-tech-blogger-geoffrey-brackman> . Data de acesso: 02 fev 2023.
- [104] Federal Communications Commission . *The Public Safety Nationwide Interoperable Broadband Network: A New Model for Capacity, Performance and Cost*. Junho 2010. Disponível em: <https://transition.fcc.gov/pshs/docs/releases/DOC-298799A1.pdf> . Data de acesso: 28 set 2021.