

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME CORDEIRO DIVINO

ANÁLISE DO IMPACTO NOS INDICADORES DE QUALIDADE DE UMA REDE
MÓVEL LTE EM FUNÇÃO DA REALIZAÇÃO DO REFARMING
DA BANDA E-UTRA 3

Uberlândia

2024

GUILHERME CORDEIRO DIVINO

ANÁLISE DO IMPACTO NOS INDICADORES DE QUALIDADE DE UMA REDE
MÓVEL LTE EM FUNÇÃO DA REALIZAÇÃO DO REFARMING
DA BANDA E-UTRA 3

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Éderson Rosa da Silva

Uberlândia

2024

GUILHERME CORDEIRO DIVINO

ANÁLISE DO IMPACTO NOS INDICADORES DE QUALIDADE DE UMA REDE
MÓVEL LTE EM FUNÇÃO DA REALIZAÇÃO DO REFARMING
DA BANDA E-UTRA 3

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Área de concentração: Telecomunicações

Uberlândia, 21 de agosto de 2024

Banca Examinadora:

Éderson Rosa da Silva – Doutorado (UFU)

Alexandre Coutinho Mateus – Doutorado (UFU)

André Luiz Aguiar da Costa – Doutorado (UFU)

Dedico este trabalho aos meus pais, Adilson
Custodio Divino e Onice Maria Cordeiro
Divino. Vocês são a minha inspiração.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, Adilson e Onice, por toda inspiração, apoio e sacrifício feito em prol do meu desenvolvimento e pela solidificada base familiar, que ajudaram-me a concluir esta etapa.

Agradeço ao meu irmão, Gabriel, pelo companheirismo e que este trabalho, possa lhe inspirar em sua jornada, que já inicia-se.

Agradeço a minha esposa, Renata, por todo incentivo, acolhimento e suporte durante todos estes anos, nos momentos felizes e de dificuldades.

Agradeço ao meu orientador, Professor Dr. Éderson, por toda paciência, orientação e apoio prestado para a realização deste trabalho, e por sua excelência em lecionar, despertando em mim o interesse pela área das telecomunicações atribuída a este trabalho.

Agradeço a todos os amigos feitos durante minha trajetória acadêmica, pela ajuda e companheirismo. A minha gratidão com vocês, é eterna.

Agradeço à instituição Universidade Federal de Uberlândia, e todas as pessoas que a compõem, sejam os professores, técnicos, profissionais da limpeza, que de forma mútua, colaboram para a excelência desta universidade.

Agradeço à Algar Telecom e seus funcionários, por permitir meu desenvolvimento profissional e propiciar a execução do tema deste trabalho.

A todos, meu muito obrigado. Esta conquista é compartilhada com cada um de vocês.

“Torna-te quem tu és.”
(Friedrich Nietzsche)

RESUMO

Refarming é o termo utilizado para se referir a realocação de banda ociosa do espectro de radiofrequência, entre diferentes tecnologias de redes móveis. Através desta prática, é possível aumentar a eficiência espectral de uma determinada rede móvel, bem como sua capacidade, implicando na melhoria dos indicadores de qualidade de rede, como *throughput Downlink* e *Uplink* e uso de *Physical Resource Blocks* (PRB). Neste sentido, este trabalho apresenta a análise do *refarming* da banda E-UTRA 3, nas subfaixas de extensão de 1775 MHz a 1785 MHz para *uplink* e de 1870 MHz a 1880 MHz para *downlink*, de uma rede *Global System Mobile* (GSM) e *Long Term Evolution* (LTE) existente.

Palavras-chave: *Refarming*; Utilização de PRB; Eficiência Espectral; Redes móveis.

ABSTRACT

Refarming refers to the reallocation of underutilized spectrum bands within the radio frequency spectrum among different mobile network technologies. This practice increases the spectral efficiency and capacity of a mobile network, improving key network quality indicators such as downlink and uplink throughput and the utilization of Physical Resource Blocks (PRB). In this context, this work analyzes the refarming of the E-UTRA Band 3, specifically the sub-bands from 1775 MHz to 1785 MHz for uplink and from 1870 MHz to 1880 MHz for downlink, within an existing Global System for Mobile Communications (GSM) and Long Term Evolution (LTE) network.

Keywords: Refarming; PRB Utilization; Spectral efficiency; Mobile Networks.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Arquitetura GSM e WCDMA	24
Figura 2 - Arquitetura rede de acesso UTRAN	25
Figura 3 - Arquitetura core de rede GSM e WCDMA	27
Figura 4 - Volume de tráfego de dados e voz de 2007 a 2013	28
Figura 5 - Evolução das arquiteturas dos sistemas GSM e UMTS para o LTE	30
Figura 6 - Arquitetura E-UTRAN	31
Figura 7 - Elementos do <i>core</i> de rede EPC	32
Figura 8 - Arquitetura NSA	35
Figura 9 - Arquitetura SA	35
Figura 10 - Arquitetura 5GC	36
Figura 11 – Representação gráfica de uma onda eletromagnética	38
Figura 12 - Uso do espectro de radiofrequência.....	39
Figura 13 - ERBs 2G licenciadas no Brasil.....	47
Figura 14 - ERBs 3G licenciadas no Brasil.....	48
Figura 15 - Faixas de frequência licenciadas para o 2G.....	49
Figura 16 – Faixas de frequência licenciadas para o 3G	49
Figura 17 - Estrutura do quadro de rádio tipo 1	57
Figura 18 - Estrutura de um <i>subframe</i>	57
Figura 19 - Comando de desativação das células 2G Huawei.....	60
Figura 20 - Exemplo de uma ERB em modo manutenção na aplicação Nokia <i>Netact</i>	60
Figura 21 - Árvore de elementos OSS Nokia – <i>Netact</i>	62
Figura 22 - Configuração do EARFCN das células 4G 1800 MHz OSS Nokia – <i>Netact</i>	62
Figura 23 - Plataforma <i>Netchart</i>	64
Figura 24 - Utilização de PRB <i>Downlink</i> – Cidade A.....	65
Figura 25 - Uso de PRB <i>Uplink</i> – Cidade A.....	66
Figura 26 - <i>Throughput Downlink</i> – Cidade A.....	66
Figura 27 - <i>Throughput Uplink</i> – Cidade A	67
Figura 28 - Eficiência Espectral <i>Downlink</i> e <i>Uplink</i> – Cidade A.....	67
Figura 29 - Uso de PRB <i>Downlink</i> – Cidade B.....	68
Figura 30 - Uso de PRB <i>Uplink</i> – Cidade B.....	68
Figura 31 - <i>Throughput downlink</i> - Cidade B.....	69
Figura 32 - <i>Throughput uplink</i> - Cidade B	69
Figura 33 - Eficiência Espectral <i>Downlink</i> e <i>Uplink</i> - Cidade B.....	70

Figura 34 - Uso de PRB <i>Downlink</i> - Cidade C.....	71
Figura 35 - Uso de PRB <i>Uplink</i> - Cidade C	71
Figura 36 - <i>Throughput Downlink</i> - Cidade C.....	72
Figura 37 - <i>Throughput Uplink</i> - Cidade C	72
Figura 38 - Eficiência Espectral <i>Downlink</i> e <i>Uplink</i> - Cidade C.....	73
Figura 39 - Uso de PRB <i>Downlink</i> - Cidade D.....	73
Figura 40 - Uso de PRB <i>Uplink</i> - Cidade D	74
Figura 41 - <i>Throughput Downlink</i> - Cidade D	74
Figura 42 - <i>Throughput Uplink</i> - Cidade D.....	75
Figura 43 - Eficiência Espectral <i>Downlink</i> e <i>Uplink</i> - Cidade D.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Faixas de frequência.....	39
Tabela 2 - Faixas de frequência 2G.....	42
Tabela 3 - Faixas de frequência 3G.....	43
Tabela 4 - Bandas de operação E-UTRA ativas no Brasil	44
Tabela 5 - Intervalos de frequência 5G	44
Tabela 6 - Bandas de operação 5G licenciadas no Brasil.....	46
Tabela 7 - Blocos de subfaixas de extensão	50
Tabela 8 - Subfaixas da faixa de frequência de 1800 MHz.....	52
Tabela 9 - Blocos subfaixas de extensão da faixa de frequência de 1800 MHz – Algar Telecom	55
Tabela 10 - Quantidade de PRBs por largura de banda.....	58
Tabela 11- ERBs contidas no escopo do <i>refarming</i>	59
Tabela 12 – Quantidade de células desativadas por cidade.....	59
Tabela 13 - Visão geral das métricas de desempenho pós <i>refarming</i>	76
Tabela 14 - Comparativo média aritmética eficiência espectral antes e após <i>refarming</i>	77

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Blocos de subfaixas de extensão adquiridos por cada operadora.....	51
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

1G	Primeira Geração
2G	Segunda Geração
3G	Terceira Geração
3GPP	<i>Third Generation Partnership Program</i>
4G	Quarta Geração
5G	Quinta Geração
5GC	<i>5G Core Network</i>
AF	<i>Application Function</i>
AMF	<i>Access and Mobility Management Function</i>
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>
APN	<i>Access Point Name</i>
ARFCN	<i>Absolute Radio Frequency Channel Numbers</i>
AuC	<i>Authentication Centre</i>
AUSF	<i>Authentication Server Function</i>
BSC	<i>Base Station Controller</i>
BTS	<i>Base Transceiver Station</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>
CS	<i>Circuit Switched</i>
CSFB	<i>Circuit Switched Fall Back</i>
DL	<i>Downlink</i>
DN	<i>Domain Network</i>
EARFCN	<i>E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rates for GSM Evolution</i>
EHF	<i>Extremely High Frequency</i>
eMBB	<i>Enhanced Mobile Broadband</i>
eNB	<i>Evolved Node B</i>
EN-DC	<i>E-UTRAN Dual Connectivity</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
ERB	Estação Rádio Base

E-UTRAN	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
GERAN	<i>GSM Edge Radio Access Network</i>
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
gNB	<i>gNodeB</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System Mobile</i>
HF	<i>High Frequency</i>
HLR	<i>Home Location Register</i>
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
HSS	<i>Home Subscriber Service</i>
HSUPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>
IMS	<i>IP Multimedia Subsystem</i>
IMT	<i>International Mobile Telephone</i>
IS-36	<i>Interim Standard I36</i>
IS-95	<i>Interim Standard 95 Code Division Multiple Access</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
JDC	<i>Japanese Digital Cellular</i>
LF	<i>Low Frequency</i>
LGPD	<i>Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
LTE-A	<i>Long Term Evolution-Advanced</i>
M2M	<i>Machine to Machine</i>
Mbps	<i>Mega bits per second</i>
MF	<i>Medium Frequency</i>
MGW	<i>Media Gateway</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
mMTC	<i>Massive Machine Type Communication</i>
MSC	<i>Mobile Switching Center</i>
NEF	<i>Network Exposure Function</i>
NF	<i>Network Functions</i>
NR	<i>New Radio</i>
NR-ARFCN	<i>NR Absolute Radio Frequency Channel Number</i>

NRF	<i>Network Repository Function</i>
NSA	<i>Non Stand Alone</i>
NSSF	<i>Network Slice Service Function</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
ONU	Organizações das Nações Unidas
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
OSS	<i>Operations Support System</i>
PCF	<i>Policy Charging Function</i>
PDC	<i>Pacific Digital Cellular</i>
PDN	<i>Packet Data Network</i>
PGO	Plano Geral de Outorgas
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway</i>
PLMN	<i>Public Land Mobile Network</i>
PRB	<i>Physical Resource Block</i>
PS	<i>Packet Switched</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RE	<i>Resource Element</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
RR	Regulamento de Rádio
SA	<i>Stand Alone</i>
SBA	<i>Service Based Architecture</i>
SCS	<i>Spacing Carrier</i>
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SHF	<i>Super High Frequency</i>
SMF	<i>Session Management Function</i>
SMP	Serviço Móvel Pessoal
SMS	<i>Short Message Service</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	<i>Time Division Multiplex Access</i>
THF	<i>Tremendously High Frequency</i>
UDM	<i>Unified Data Management</i>

UE	<i>User Equipment</i>
UHF	<i>Ultra High Frequency</i>
UIT	União Internacional das Telecomunicações
UI	<i>Uplink</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication Service</i>
UPF	<i>User Plane Function</i>
URLLC	<i>Ultra-Reliable and Low Latency Communications</i>
USDC	<i>US Digital Cellular</i>
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
VHF	<i>Very High Frequency</i>
VLF	<i>Very Low Frequency</i>
VoIP	<i>Voice over Ip</i>
VoLTE	<i>Voice over LTE</i>
VPN	<i>Virtual Private Network</i>
W-CDMA	<i>Wideband CDMA</i>

SUMÁRIO

1 Introdução	19
1.2 Motivação	20
1.3 Objetivos	20
1.4 Organização do Trabalho	21
2 Desenvolvimento	22
2.1 Evolução das Redes Móveis	22
2.1.1 Tecnologia 1G	22
2.1.2 Tecnologia 2G	22
2.1.3 Tecnologia 3G	23
2.1.4 Arquitetura geral 2G e 3G	24
2.1.5 Arquitetura rede de acesso 2G e 3G	25
2.1.6 Arquitetura núcleo da rede 2G e 3G	26
2.1.7 Evolução redes 2G-3G para o 4G.....	28
2.1.8 Tecnologia 4G	29
2.1.9 Arquitetura E-UTRAN	31
2.1.10 Arquitetura EPC	32
2.1.11 Tecnologia 5G	33
2.1.12 Arquitetura SA e NSA.....	34
2.1.13 Elementos <i>core</i> de rede 5G.....	36
2.2 Espectro Eletromagnético e Ondas de Rádio	37
2.2.1 Principais faixas de frequência	39
2.2.2 Classificações das faixas de frequência.....	40
2.3 Largura de Banda e Capacidade	40
2.4 Regulação de Espectro	41
2.5 Alocação de Frequência	41
2.6 Refarming	45
2.7 Cenário de Utilização das Faixas de Frequência no Brasil	47
2.8 Considerações Finais	52
3 Metodologia	54
3.1 Ambiente Original de Radiofrequência	54
3.2 Métricas de Desempenho	56
3.2.1 <i>Throughput</i> <i>downlink</i> e <i>uplink</i>	56
3.2.2 Eficiência espectral.....	56

3.2.3 Uso de PRB	56
3.3 Procedimentos para o <i>Refarming</i>	58
3.4 Coleta dos Resultados.....	63
3.5 Considerações Finais	64
4 Resultados e Discussões.....	65
4.1 Cidade A	65
4.2 Cidade B	68
4.3 Cidade C	70
4.4 Cidade D	73
4.5 Análise Geral dos Resultados	76
4.6 Considerações Finais	77
5 Conclusão	79
Referências	80
Apêndice A – <i>script</i> células 3G Cidade A	83
Apêndice B - <i>script</i> células 3G Cidade B.....	87
Apêndice C - <i>script</i> células 3G Cidade C	89
Apêndice D - <i>script</i> células 3G Cidade D	92

1 Introdução

A facilidade de se comunicar sem fios, trouxe inúmeros avanços para a sociedade moderna, em seus mais variados aspectos e esferas, mudando drasticamente a maneira com que interagimos com as pessoas e com o nosso redor. A necessidade de se comunicar a pequenas e longas distâncias, de forma simples e eficaz, tornou-se possível com o surgimento de novas tecnologias como, por exemplo: satélites, rádios, drones, computadores e as novas gerações de redes móveis.

Os primeiros sistemas de comunicações sem fio foram originados na antiguidade, através da transmissão de informações visuais por meio de artifícios rudimentares como: sinais de fumaça, fogo, espelhos refletores e bandeiras. Em 1838, estes sistemas iniciais de transmissão de informação foram substituídos pelo telégrafo (inventado por Samuel Morse) e posteriormente, substituído pela criação do telefone [1].

O ponto de partida das comunicações através de ondas de rádio aconteceu por volta de 1820, através dos estudos experimentais do físico e químico dinamarquês Hans Christian Ørsted, demonstrando a capacidade de um campo elétrico movimentar a agulha de uma bússola, inferindo assim, a relação entre magnetismo e eletricidade. Em 1865, reunindo as conclusões dos trabalhos dos físicos André-Marie Ampère, Michael Faraday, Joseph Henry e o matemático Carl Friedrich Gauss, é publicado pelo físico escocês James Clerk Maxwell a teoria do eletromagnetismo. Posteriormente, em 1880, através dos experimentos do físico alemão Heinrich Hertz, é feita a primeira transmissão de uma onda eletromagnética. A primeira transmissão de um sinal de voz através de ondas eletromagnéticas foi feita pelo engenheiro canadense Reginald Fessenden, em 1900 [1].

Em novembro de 2021, aconteceu no Brasil o leilão do 5G [2], sendo este o maior leilão das telecomunicações da história do país [3]. Neste evento ocorreu a licitação de três novas faixas de radiofrequência, destinadas ao uso da quinta geração de rede móvel: 2,3 GHz, 3,5 GHz e a faixa das ondas milimétricas, 26 GHz. Somadas, estas faixas possuem mais de 1 GHz de largura de banda disponível. Entretanto, como observado pelo estudo [4], acredita-se que a substituição e maior aderência das redes 4G para o 5G será um processo lento e gradual, estimando-se que em 2030, um percentual de 54% das conexões totais seja provenientes da rede 5G. Este cenário implica que o 4G ainda será o principal padrão de rede móvel a ser utilizado. Sendo assim, é notória a necessidade de uma eficiente gestão de espectro por parte das operadoras de telefonia para a continuidade da oferta e utilização do 4G.

1.2 Motivação

Em telecomunicações, o espectro de radiofrequência é um recurso escasso e limitado e seu planejamento, de acordo com as necessidades de uso e tecnologias, é preponderante para um bom desempenho da comunicação.

Levando em consideração que a adesão para a quinta geração de redes móveis acontecerá de forma gradual, o 4G permanecerá sendo utilizado por algum tempo, para fins de uso de tráfego.

Diante do exposto, as técnicas de otimização de rede celular surgem como ferramentas necessárias para a manutenção dos indicadores de qualidade da rede, bem como a economia de aquisição de novo espectro em *Capital Expenditure* (CAPEX), que é todo o investimento em bens que as operadoras de telecomunicações fazem para fins de crescimento ou manutenção de suas respectivas redes. Assim sendo, o *refarming*, ou seja, a gestão dos recursos de radiofrequência através da realocação de banda e espectro, se apresenta como uma solução viável, eficiente e econômica em termos de CAPEX para as operadoras de telecomunicações.

1.3 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é analisar os ganhos obtidos na execução da técnica de *refarming*, em uma rede existente, através de análise das métricas de desempenho: utilização de PRB, *throughput downlink* e *uplink* e eficiência espectral. Ademais, tem-se os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar as principais características das faixas de frequências utilizadas para comunicação móvel.
- Analisar o cenário das radiofrequências no Brasil designadas para atendimento do Serviço Móvel Pessoal (SMP).
- Apresentar o conceito e aplicações do *refarming*.

1.4 Organização do Trabalho

O restante do trabalho está organizado como se segue. O Capítulo 2 introduz a história de todos os padrões de redes móveis até o 5G, bem como apresenta uma visão do cenário de espectro de radiofrequência brasileiro, além de trazer os conceitos de alocação de canal, banda, e *refarming* e suas aplicações. O Capítulo 3 faz referência ao cenário existente de uma rede real anterior a execução do *refarming*, bem como define as métricas de desempenho que são analisadas no capítulo seguinte. Ademais, é feito a contextualização de outros trabalhos executados abordando o tema *refarming*. O Capítulo 4 traz de forma gráfica e quantitativa, todos os resultados das métricas de desempenho obtidas com a execução do *refarming* em 4 localidades, além de discorrer sobre estes valores. Por fim, o Capítulo 5 descreve a conclusão a respeito dos resultados obtidos, bem como sugere a possibilidade de novos estudos acerca do tema estudado neste trabalho.

2 Desenvolvimento

2.1 Evolução das Redes Móveis

2.1.1 Tecnologia 1G

Os primeiros sistemas de transmissão de telefonia móvel foram desenvolvidos na década de 40, com o conceito de um único transmissor de alta potência, cobrir uma determinada área. Porém, este tipo de transmissão apresentava um problema em relação ao reuso de frequência, impossibilitando um outro sistema utilizar a mesma faixa de frequência, devido a interferência, o que impactava a capacidade da rede suportar uma quantidade maior de usuários. Como exemplo, o sistema móvel *bell*, operando em Nova York em 1970, era capaz de suportar apenas 12 chamadas de voz simultâneas dentro de uma área de aproximadamente 2590 Km² [5]. Porém, para suprir estas dificuldades, foi desenvolvido o conceito de telefonia celular, pelos laboratórios AT&T e outras companhias de telecomunicações, que consiste em subdividir uma grande área de cobertura em pequenas áreas chamadas células, cada uma reutilizando uma porção do espectro eletromagnético e espaçadas entre si, a uma distância segura entre os transmissores para a prevenção de interferência entre os canais. Esta técnica possibilitava assim, o aumento da capacidade da rede para suportar novos usuários e o melhor aproveitamento do espectro utilizado [5]. Oficialmente, a primeira geração de redes móveis é conhecida como *Advanced Mobile Phone System* (AMPS), desenvolvida em 1983 nos EUA. O sistema AMPS já utilizava as técnicas de telefonia celular, ainda de forma analógica, e foi destinado ao uso dos telefones equipados nos carros, devido à falta de tecnologia para a criação de dispositivos móveis na época e cada célula tinha uma cobertura de aproximadamente 13 Km [6].

2.1.2 Tecnologia 2G

Ainda na década de 80, devido ao contínuo aumento da demanda de novos usuários e a falta de capacidade do sistema AMPS [6], surge a segunda geração de redes móveis, com os padrões mais populares: *Interim Standard 136* (IS-36), *Pacific Digital Cellular* (PDC), *Global System Mobile* (GSM) e *Interim Standard 95 Code Division Multiple Access* (IS-95). O padrão IS-36, também conhecido como *North American Digital Celullar* (NADC) ou *US Digital Cellular* (USDC) foi desenvolvido para suportar mais usuários através de alocação fixa de espectro, utilizando o acesso múltiplo por divisão no tempo ou *Time Division Multiple Access*

(TDMA) e sua capacidade era de até 6x a capacidade do sistema AMPS [5]. Além disso, o padrão IS-95 foi projetado para compartilhar e reutilizar não somente as frequências, mas também as estações AMPS. O sistema PDC foi desenvolvido em 1991 para prover maior capacidade ao congestionado sistema celular do Japão. Também conhecido como *Japanese Digital Cellular* (JDC), em 2001, este padrão possuía mais de 50 milhões de assinantes [5]. De forma similar ao IS-P5, também utiliza TDMA. O GSM foi o primeiro sistema de telefonia móvel totalmente digital e o padrão 2G mais popular do mundo [5]. Utiliza TDMA e implementou a possibilidade de acesso limitado a internet, com transmissões de dados com taxas variando de 14,4 Kpps a 64 Kbps, através do sistema *General Packet Radio Service* (GPRS) e, até 500 Kbps através da evolução do GPRS, *Enhanced Data Rates for GSM Evolution* (EDGE). Outro incremento no sistema GSM foi o surgimento do serviço de mensagens curtas, *Short Messaging Service* (SMS). O padrão IS-95, amplamente difundido na América do Norte, diferentemente dos padrões anteriores, emprega a tecnologia *Code Division Multiple Access* (CDMA), permitindo até 64 usuários conectados em cada canal com largura de banda de 1,25 MHz [5].

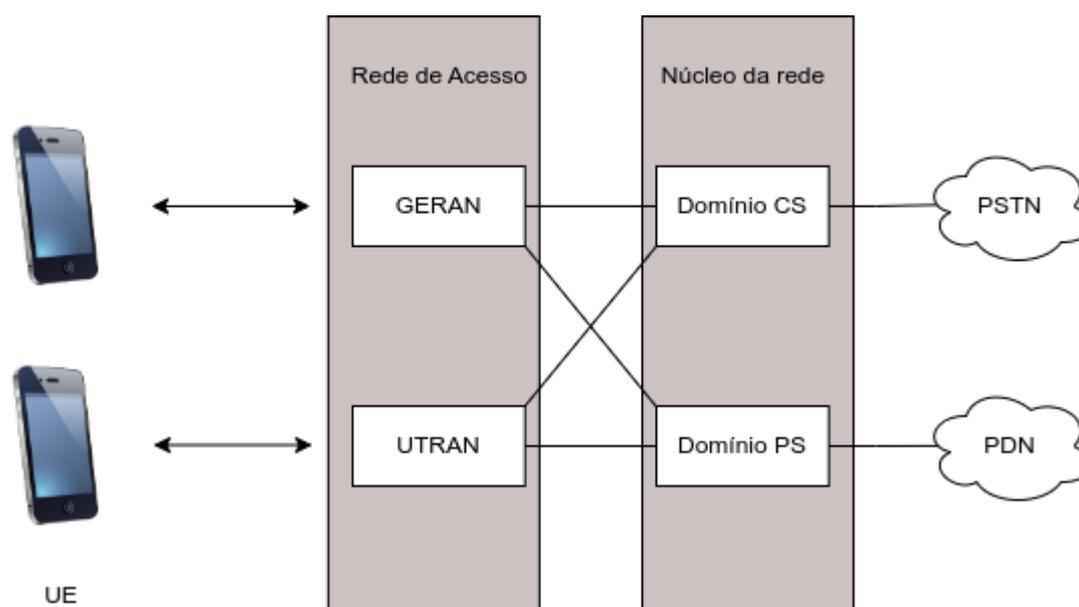
2.1.3 Tecnologia 3G

No final da década de 90, com a premissa principal de unificar uma banda do espectro de radiofrequência para uso universal, o órgão internacional *Internacional Telecommunications Union* (ITU) propôs um novo padrão de telefonia móvel conhecido por *International Mobile Telephone* (IMT-2000). Porém, devido a divisão da comunidade global, dois principais padrões para a terceira geração de redes móveis surgiram: CDMA2000 e *Wideband CDMA* (W-CDMA), também conhecido por *Universal Mobile Telecommunications Service* (UMTS) [5]. Além de uma melhoria da eficiência espectral, com uma largura de banda de 5 MHz, o 3G propiciou taxas de dados de até 2 Mbps [6], além de introduzir novos sistemas multimídia e funcionalidades, como o *Voice over Ip* (VoIP), que permitia a transferência de voz entre usuários através do protocolo IP, sem a necessidade do uso de comutação de circuitos. Posteriormente, o 3G teve evolução para o padrão *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) e *High Speed Uplink Packet Access* (HSUPA), coletivamente conhecido como *High Speed Packet Access* (HSPA), ou, também como 3.5G [7], chegando em taxas de até 14,4 Mbps [8].

2.1.4 Arquitetura geral 2G e 3G

A rede de telefonia móvel é conhecida, de maneira oficial como *Public Land Mobile Network* (PLMN), ou rede pública terrestre móvel nativa e governada por uma operadora de telefonia. Ambos, GSM e WCDMA compartilham a mesma arquitetura de rede, como pode ser visto na Figura 1:

Figura 1 - Arquitetura GSM e WCDMA



Fonte: Adaptado de [7].

O *core* de rede, ou núcleo de rede, possui dois domínios. O *Circuit Switched* (CS), ou domínio de comutação de circuitos, responsável pelo transporte de ligações telefônicas através da região geográfica que a operadora tem atuação, de maneira semelhante ao sistema de telecomunicações através de enlace fixo. O domínio CS comunica diretamente com a *Public Switched Telephone Network* (PSTN), ou rede pública de telefonia comutada, possibilitando a comunicação com outros domínios CS de outras operadoras. O *Packet Switched* (PS), ou domínio de comutação de pacotes, é responsável pela transmissão e troca de dados com a rede externa *Packet Data Network* (PDN), como a internet [7].

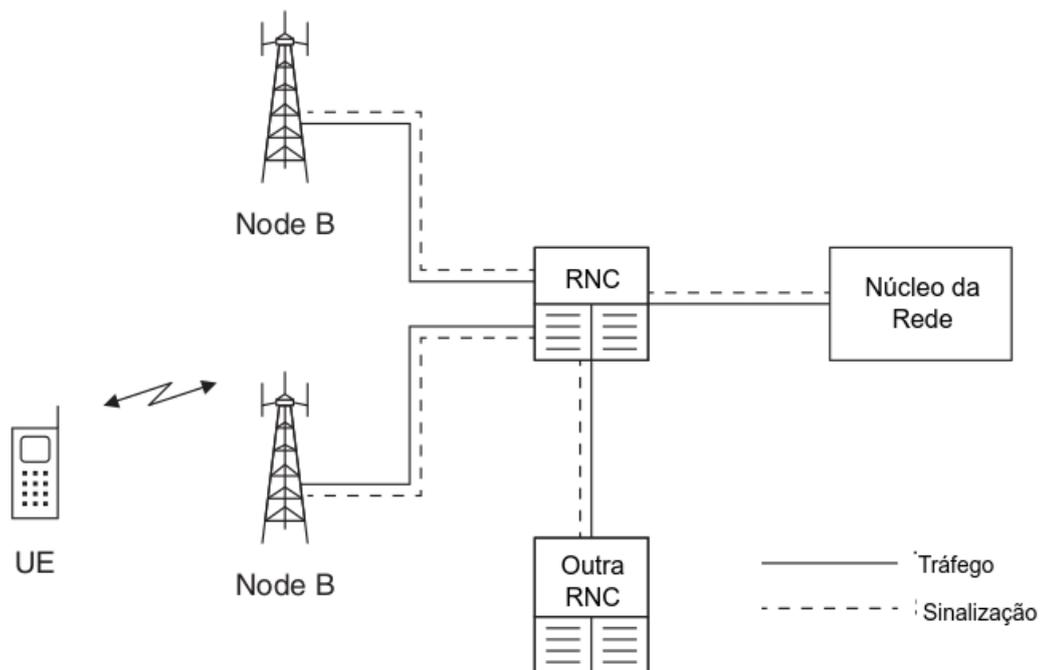
A *Radio Access Network* (RAN), ou rede de acesso de rádio, é responsável pela comunicação entre o *User Equipment* (UE), ou equipamento do usuário com o *core* de rede. Para as arquiteturas GSM e WCDMA, existem duas redes de acesso separadas, *GSM Edge*

Radio Access Network (GERAN), para o GSM e *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN), para o WCDMA. A comunicação do UE com a RAN é feita através da interface aérea, também conhecida como interface de rádio. A direção de comunicação no sentido da rede móvel para o UE é conhecida como *Downlink* (DI) enquanto a comunicação no sentido do UE para a rede móvel é conhecida por *Uplink* (UI) [7].

2.1.5 Arquitetura rede de acesso 2G e 3G

A Figura 2 mostra a RAN de uma rede UMTS. O componente mais importante da rede é conhecido por *Base Station*, estação base ou estação rádio base (ERB), e oficialmente conhecido por *Node B* para o UMTS. Cada ERB possui uma ou mais antenas, também conhecido como setor, as quais se comunicam com o UE em um ou mais setores. Como mostrado na Figura 2, uma típica ERB possui um conjunto de três antenas espaçadas entre si entre 120°.

Figura 2 - Arquitetura rede de acesso UTRAN



Fonte: Adaptado de [7].

Uma célula se equivale a um setor. Cada célula possui um tamanho limitado que é determinado pelo alcance no qual o receptor consegue identificar as informações enviadas pelo transmissor. Estes limites geram a existência de variados tipos de células. *Macrocells*, ou

células macro, possuem a característica de prover grande cobertura em áreas urbanas ou rurais, e possuem o tamanho de alguns quilômetros. *Microcells*, ou células micro, são células menores que as células macro e possuem maior capacidade de rede e menor cobertura, destinadas para áreas de grande adensamento urbano. *Picocells* são utilizadas em grandes ambientes internos como mercados e *shopping* e possuem algumas dezenas de metros de cobertura. Um usuário doméstico pode adquirir sua própria ERB e instalar em sua própria residência, neste caso, as células são conhecida por *Femtocells*, e possuem o tamanho equivalente a poucos metros.

Cada ERB se comunica com o UE, através da interface aérea por uma frequência de rádio, conhecida por *Carrier Frequency*, ou frequência portadora. Cada portadora ocupa uma certa quantidade no espectro de frequências, conhecido como *Bandwidth*, ou largura de banda. Como exemplo, se o UE transmitir uma informação através de uma frequência central de 740 MHz, ocupando uma largura de banda de 10 MHz, neste caso, esta transmissão ocupará o range de frequência de 735 MHz à 745 MHz.

Existem dois tipos de duplexação para se prevenir interferências entre a troca de informações entre UE e a ERB. O primeiro tipo, *Frequency Division Duplex (FDD)*, ou duplexação por divisão de frequência, a ERB transmite a informação em uma frequência portadora e o UE, transmite em outra frequência portadora. O segundo tipo, *time division duplexion (TDD)*, ou duplexação por divisão no tempo, tanto UE quanto ERB, transmitem informações utilizando a mesma frequência portadora, porém, em tempos distintos.

As ERBs são agrupadas por elementos controladores conhecidos como *Radio Networks Controllers (RNCs)* e possuem duas funções principais. A primeira, controlar as informações de voz e pacotes de dados dos usuários entre as estações base e o núcleo de rede, e a segunda, gerenciar as mensagens de sinalização, que são transparentes para o usuário, como solicitação de troca de uma célula para outra. Uma rede móvel típica pode conter dezenas de RNCs, cada uma controlando uma série de estações base. A GERAN possui arquitetura semelhante a UTRAN, embora a estação base seja conhecida por *Base Transceiver Station (BTS)* e o controlador, conhecido como *Base Station Controller (BSC)* [7].

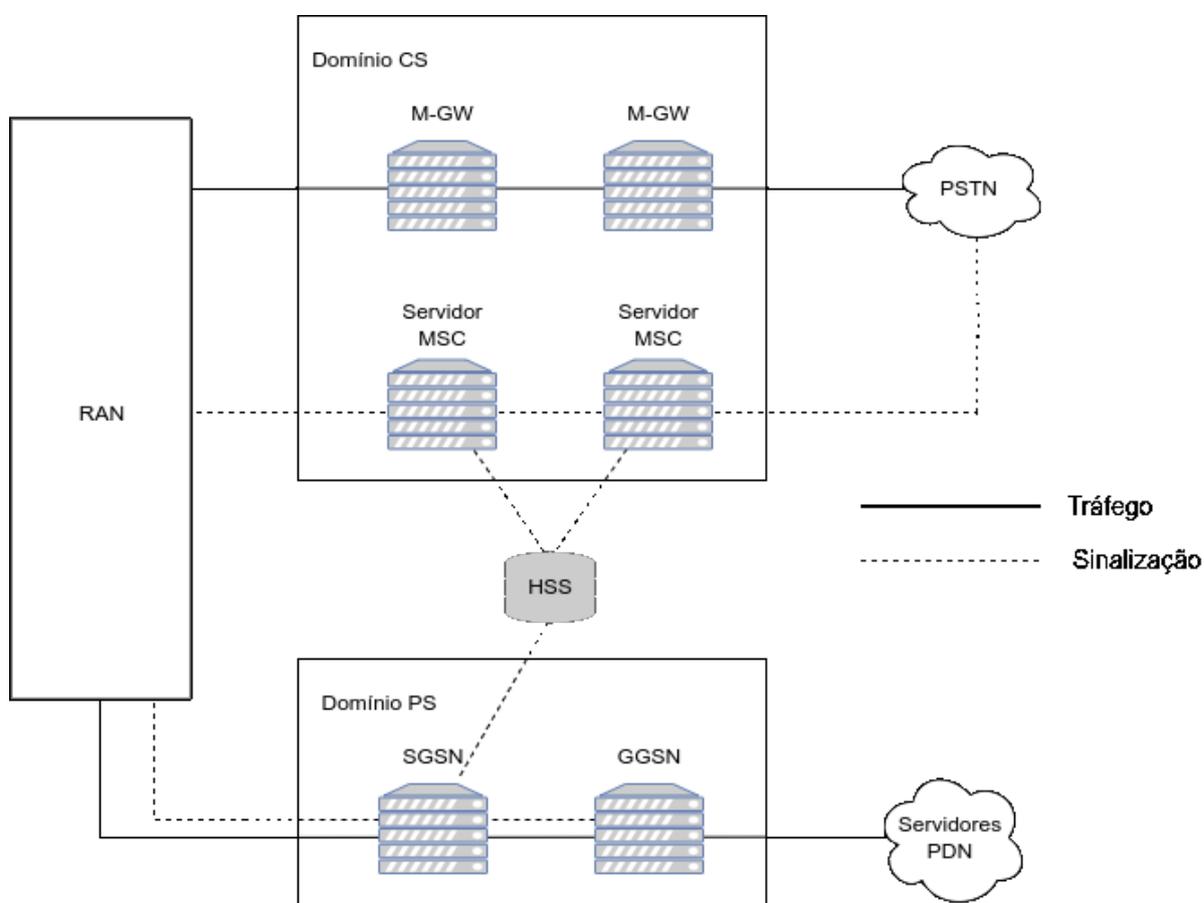
2.1.6 Arquitetura núcleo da rede 2G e 3G

A Figura 3 detalha os elementos constituintes do núcleo da rede para os padrões de redes móveis, 2G e 3G. No domínio CS, os elementos *Media Gateway (MGWs)*, encaminham as chamadas telefônicas de uma rede para outra, enquanto os servidores *Mobile Switching Center (MSC)*, se encarregam das mensagens de sinalização que gerenciam as chamadas telefônicas.

Ambos os elementos gerenciam tanto tráfego como sinalização. No domínio PS, os elementos *gateway GPRS Support Nodes* (GGSNs) agem como interfaces intermediadoras com os servidores PDN na rede externa. Os elementos *Serving GPRS Support Nodes* (SGSN) encaminham as informações entre as estações base e os GGSNs e, se encarregam das mensagens de sinalização que gerenciam os fluxos de dados. De forma costumeira, uma rede móvel pode possuir diversos elementos GGSNs e SGSNs.

O *Home Subscriber Service* (HSS) é um banco de dados central que armazena todas as informações dos assinantes da operadora e é compartilhado entre os dois domínios de rede. O HSS reúne as funções de dois componentes antigos, os quais eram conhecidos como *Home Location Register* (HLR) e o *Authentication Centre* (AuC).

Figura 3 - Arquitetura core de rede GSM e WCDMA

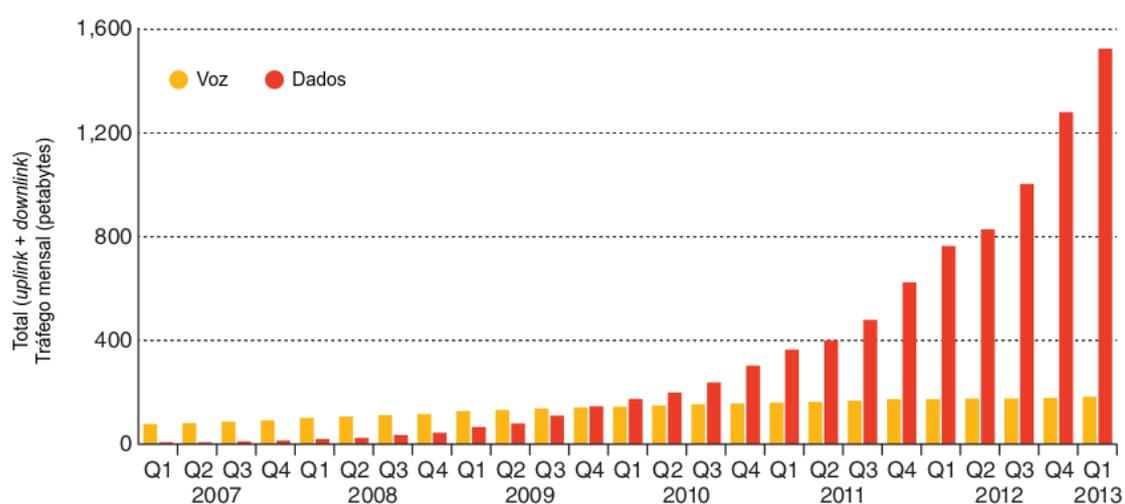


Fonte: Adaptado de [7].

2.1.7 Evolução redes 2G-3G para o 4G

Até meados de 2010, o tráfego de voz das redes móveis se equiparava ou era até superior ao de dados. Entretanto, devido ao surgimento de novos dispositivos móveis como o *Iphone* em 2007, e os aparelhos com sistema operacional *Android*, o tráfego de dados aumentou consideravelmente [7], como pode ser visto na Figura 4:

Figura 4 - Volume de tráfego de dados e voz de 2007 a 2013



Fonte: Adaptado de [7].

Como resultado deste elevado crescimento, a partir de 2010 as redes 2G e 3G começaram a sofrer significativamente com problemas de capacidade de rede, limitando assim a experiência de uso dos usuários móveis.

Além dos problemas de capacidade de rede, o processo de migração para as redes 4G foi influenciado por três principais motivos. O primeiro, pela diferença de arquitetura entre as redes de tecnologia móvel [7]. Como pode ser visto na Figura 1, o *core* de rede, tanto para 2G como para o 3G, possui dois domínios de rede em sua arquitetura: CS e PS. Contudo, devido a possibilidade do transporte de voz por meio de VoIP e considerando que a rede não é muito congestionada, a existência do núcleo CS se tornou ultrapassada além de representar gastos significativos em CAPEX, que são os gastos destinados a bens de capital, e *Operational Expenditure* (OPEX), que são os gastos destinados a bens operacionais. Através da tecnologia VoIP, as operadoras podem direcionar todas as suas aplicações para o domínio PS, além de reduzir os gastos com CAPEX e OPEX [7].

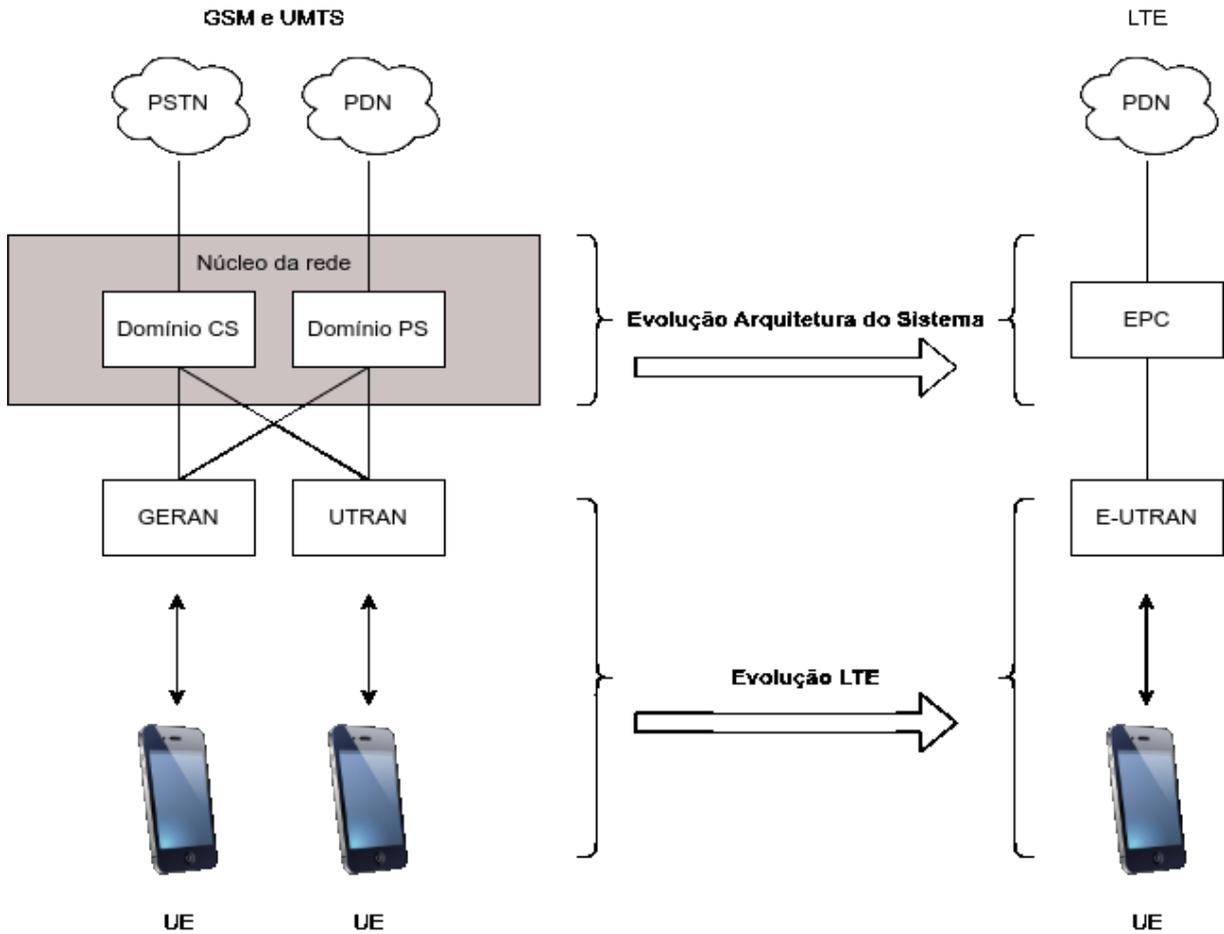
O segundo motivo, a latência introduzida pelo 3G em torno de 100 ms, na transferência de pacotes de dados entre os elementos de rede e através da interface aérea, o qual é impraticável para tecnologias emergentes como jogos interativos e aplicações em tempo real [7].

Por fim, o último motivo, o grau de complexidade associado aos sistemas UMTS e GSM, tornando-se mais elevado ao longo dos anos devido a necessidade da adição de novos recursos ao sistema enquanto ainda mantendo a retrocompatibilidade com dispositivos legados [7].

2.1.8 Tecnologia 4G

Em meados de 2004, a partir da colaboração entre distintas organizações regionais e internacionais de padronização de telecomunicações, conhecida como 3rd *Generation Partnership Program* (3GPP), iniciou-se os estudos com o propósito da sucessão da UMTS, com o objetivo de ser um novo padrão de comunicação móvel competitivo para os 10 anos seguintes. Este novo sistema foi concebido e conhecido por *Evolved Packet System* (EPS), o qual é a junção de dois itens, o *Evolved Packet Core* (EPC), responsável por ser o núcleo da rede e substituindo diretamente o domínio de comutação de pacotes das redes GSM e UMTS, e o *Long-Term Evolution* (LTE), responsável pela evolução da comunicação entre o UE através da interface aérea com a RAN. Apesar de oficialmente ser conhecido como *Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN), a comunicação entre EPC e o UE, o termo LTE ficou popularmente conhecido para designar toda a nova arquitetura e também é utilizado desta maneira pelo 3GPP de forma regular. Na Figura 5, é possível notar a evolução da nova arquitetura das redes 4G, quando comparada as tecnologias legadas 2G e 3G, sendo a GERAN responsável pela comunicação entre UE e os núcleos CS e PS nas redes 2G, e a UTRAN, responsável pela comunicação entre UE e os núcleos CS e PS nas redes 3G. A E-UTRAN é uma evolução e troca direta da UTRAN.

Figura 5 - Evolução das arquiteturas dos sistemas GSM e UMTS para o LTE



Fonte: Adaptado de [7].

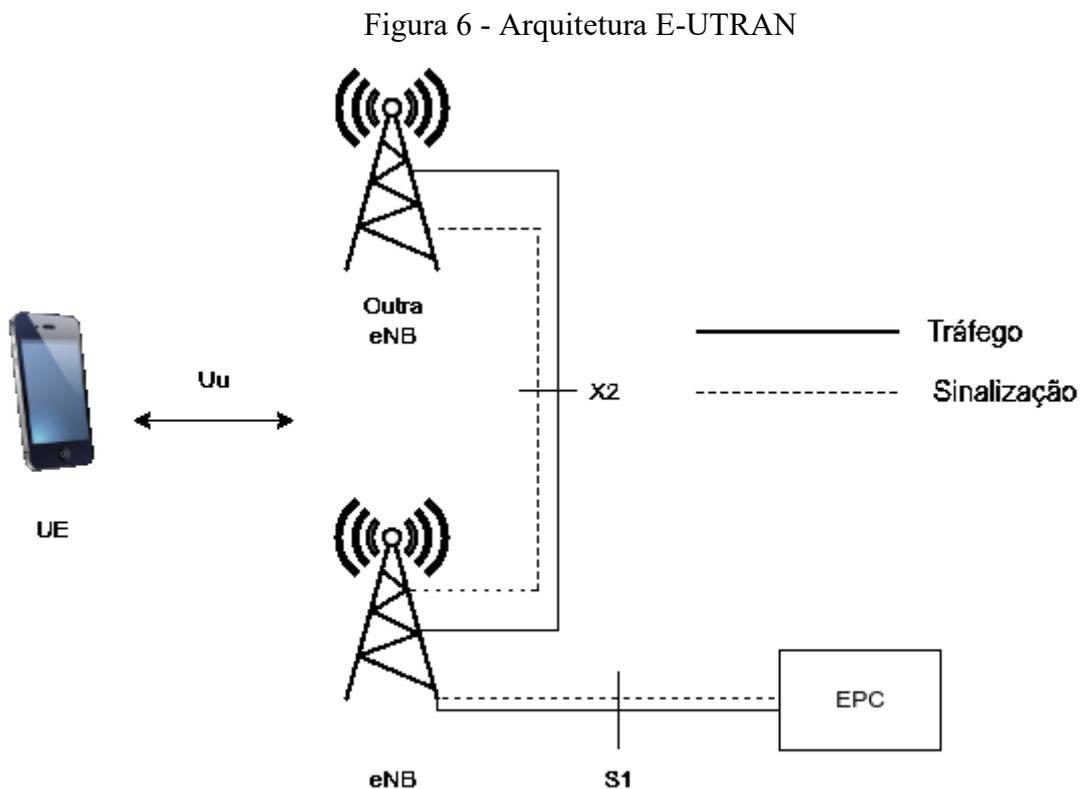
Além da evolução na arquitetura, o LTE trouxe avanços nas taxas de tráfego, com valores em torno de 300 Mbps de *downlink* e 75 Mbps de *uplink*, tornando-se um tipo de arquitetura mais otimizada para o tráfego de dados, visto que não existe mais um domínio de comutação de circuitos. Em termos comparativos, os valores máximos atingidos pelo WCDMA são de 14 Mbps de *downlink* e 5.7 Mbps de *uplink*. Adicionalmente, em termos de eficiência espectral, houve evolução. A eficiência espectral do LTE é três a quatro vezes superior ao WCDMA (Release 6) no *downlink*, e duas a três vezes superior no *uplink* [7].

Posteriormente, em 2008, motivado pelos requisitos técnicos lançados pelo ITU, de um novo sistema de comunicação móvel conhecido por *IMT-Advanced*, o grupo 3GPP começou a estudar formas de otimizar as funcionalidades do LTE, tendo como produto final, um novo sistema conhecido como *LTE-Advanced*. O *LTE-Advanced* trouxe novas melhorias ao já eficiente e superior sistema LTE, propondo novas taxas de *downlink* e *uplink* de 1000 Mbps e 500 Mbps, respectivamente [7].

Entretanto, este novo sistema foi projetado para suportar, eventualmente, taxas de tráfego de 3000 Mbps e 1500 Mbps, para *downlink* e *uplink*, respectivamente, utilizando uma largura de banda total de 100 MHz, através da soma de 5 componentes de 20 MHz cada. Além disso, o LTE-Advanced também propõe uma melhoria na eficiência espectral, sendo de 4.5 a 7 vezes maior quando comparado ao WCDM (*Release 6*), para *downlink*, e de 3.5 a 6 vezes maior no *uplink*. Adicionalmente, este novo padrão funciona de maneira totalmente retrocompatível com o LTE [7].

2.1.9 Arquitetura E-UTRAN

A arquitetura E-UTRAN é ilustrada na Figura 6:



Fonte: Adaptado de [7].

A E-UTRAN tem a finalidade de controlar toda a comunicação de rádio entre o UE e o EPC, e o elemento de rede que possui essa finalidade é conhecido por *evolved Node B* (eNB) ou ERB. A eNB possui duas principais funções, a primeira, a transmissão de informação através de rádio para todos UE no sentido *downlink* e a recepção da transmissão de informações no

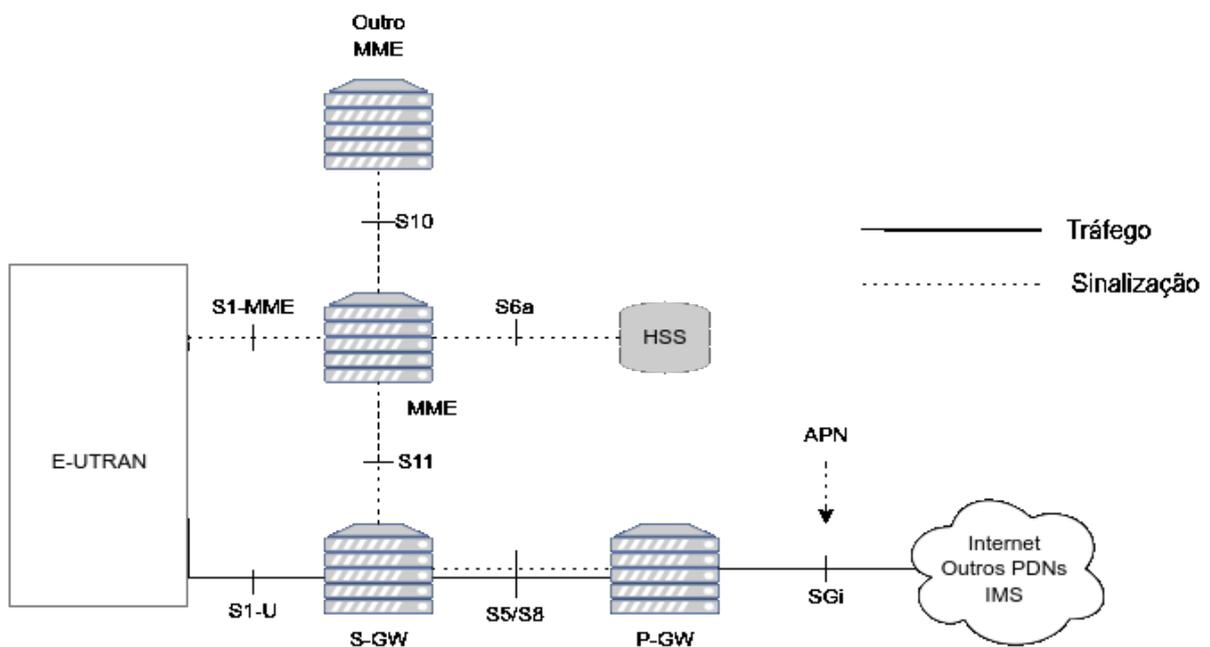
sentido *uplink*, e segundo, controlar as operações de sinalização de todos UEs conectados, como por exemplo, a troca de conexão de célula, conhecido como *handover*.

Cada ERB é conectada ao EPC através da interface S1, e conectada com a ERB adjacente mais próxima, através da interface X2. A conexão entre UE e eNB é feita através da interface Uu, também conhecida como interface aérea [7].

2.1.10 Arquitetura EPC

Na Figura 7, encontram-se os principais elementos constituintes do *core* EPC:

Figura 7 - Elementos do *core* de rede EPC



Fonte: Adaptado de [7].

As definições de cada elemento constituinte do *core* de rede EPC encontram-se a seguir [7]:

- *Home Subscriber Service* (HSS) – Banco de dados central o qual armazena todas as informações do assinante de rede da operadora.
- *Packet Data Network Gateway* (P-GW) – Ponto de interconexão do EPC com o mundo externo. Através da interface Sgi, cada P-GW troca informações com um ou mais

dispositivos externos, como os próprios servidores da operadora, internet ou o elemento *IP Multimedia Subsystem* (IMS), responsável pelo fornecimento de voz através de rede IP, sem a necessidade do recurso de *Circuit Switched Fall Back* (CSFB), onde o UE se registra nas redes legadas 2G e/ou 3G utilizando-se da rede de comutação de circuitos para efetuar chamada de voz. Cada *Packet Data Network* é identificado por um *Access Point Name* (APN). Uma operadora pode utilizar uma série de APNs diferentes, como por exemplo, uma para a internet e outra para o IMS.

- *Serving Gateway* (S-GW) – Funciona como um roteador de alto nível, redirecionando os dados entre a ERB e o P-GW. Tipicamente, uma rede pode conter milhares de S-GWs, cada um alocado em uma certa região geográfica. Cada UE é alocado para um único S-GW, porém, pode ser alocado para outro caso o UE se distancie muito.
- *Mobility Management Entity* (MME) – Controla as operações de alto nível do UE, enviando as mensagens de sinalização como problemas de segurança, gerenciamento de dados que não estão relacionados com a comunicação através de rádio. Assim como o S-GW, a rede típica de uma operadora pode conter uma série de MMEs, alocando cada um para uma determinada região geográfica.

Em termos comparativos com o UMTS e GSM, o P-GW tem o mesmo papel que o GGSN, enquanto o S-GW e MME se equivalem a função do SGSN. Em termos de escalabilidade, a operadora pode adicionar mais elementos S-GWs em caso de aumento na demanda de tráfego e adicionar mais elementos MMEs em caso de aumento da demanda de UEs.

2.1.11 Tecnologia 5G

Em Setembro de 2015, foi publicada pelo ITU a recomendação ITU-R M.2083, com as diretrizes e especificações para evolução do IMT-*Advanced*, conhecido por IMT-2020, ou 5G. Dentro destas recomendações, destacam-se três cenários principais a seguir [9]:

- *Enhanced Mobile Broadband* (eMBB) – Devido a demanda contínua e crescente do uso de dados e o surgimento de novas áreas tecnológicas, o cenário eMBB cobre uma variada gama de casos de usos com diferentes desafios, possibilitando altas taxas de dados, alta densidade de usuários e alta capacidade de rede. Em termos comparativos, o pico de tráfego de dados em redes 5G é 20 vezes superior as redes 4G.

- *Ultra-reliable and Low Latency Communications (URLLC)* – Este cenário propõe o suporte a aplicações que necessitem, concomitantemente, de tráfego de dados, confiabilidade, latência e disponibilidade, como por exemplo, controle sem fio de manufatura fabril, cirurgia médica remota e carros autônomos.
- *Massive Machine Type Communication (mMTC)* – Corresponde a capacidade do 5G em suportar um número considerável de dispositivos conectados, de forma simultânea, transmitindo um baixo volume de informações não sensíveis a latência.

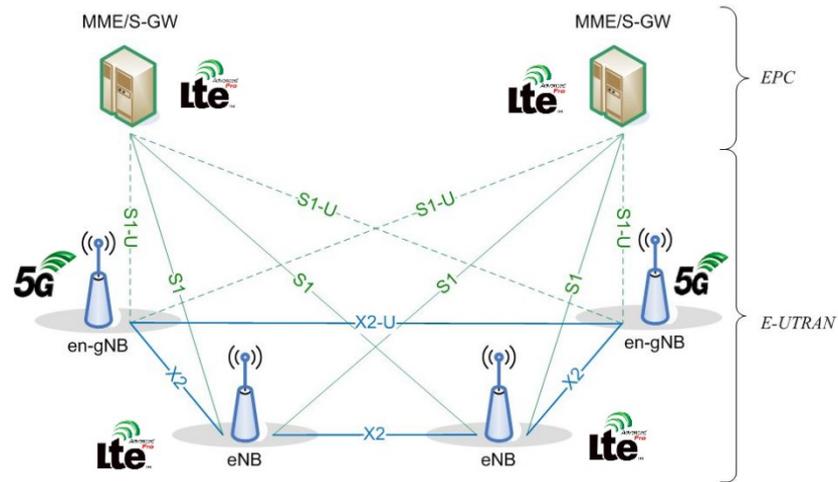
Além dos novos cenários de uso, uma das principais características e diferenciais do 5G em relação ao 4G é a introdução de uma nova interface de rádio, chamada de *New Radio (NR)*, que oferece a flexibilidade necessária para suportar os modos URLLC, mMTC e eMBB. Além disso, o 5G permite não só a conexão do UE com o novo *core* de rede conhecido como *5G Core Network (5GC)*, como também é totalmente compatível com o *core* de rede das redes 4G, EPC. Este cenário de conexão é conhecido como arquitetura *Non Stand Alone (NSA)*. O cenário oposto, com a conexão entre UE e 5GC é conhecido por arquitetura *Stand Alone (SA)*.

2.1.12 Arquitetura SA e NSA

As opções de implementação do 5G são definidas como:

- Arquitetura NSA, onde a rede de acesso 5G e a interface aérea NR são utilizadas em conjunto com a interface aérea 4G E-UTRAN e *core* EPC, tornando possível assim, a implementação do 5G sem a necessidade de troca de rede. Nesta configuração, apenas os serviços 4G são suportados, porém, utilizando as capacidades do 5G NR, como baixas latências e elevado *throughput* de dados. A arquitetura NSA também é conhecida como E-UTRAN *Dual Connectivity (EN-DC)*. Nas redes 5G o nó de rede responsável pela comunicação através da interface aérea com UE e o *Core* de rede é conhecido por *gNodeB (gNB)* ou en-gNB. Nesta arquitetura, a conexão entre os nós da rede 4G (eNB) é feita através da interface X2 e a conexão entre eNB e EPC é realizada através da interface S1. Já para a interconexão entre eNB e en-gNB, é feita através da interface X2, enquanto a comunicação entre os nós de rede 5G (en-gNB) é feita através da interface X2-U. A comunicação entre en-gNB e o EPC é feita através da interface S1-U [10]. A Figura 8 ilustra a arquitetura NSA.

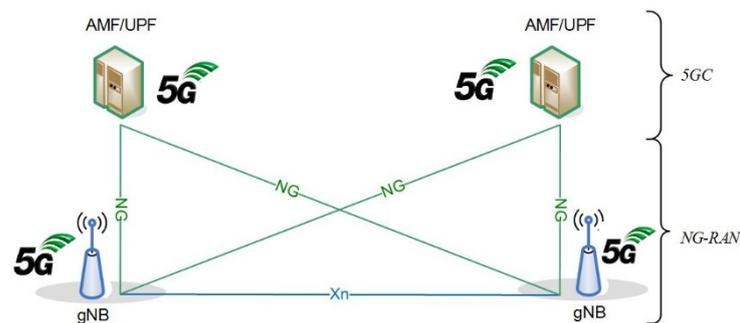
Figura 8 - Arquitetura NSA



Fonte: Obtido de [10].

- Arquitetura SA, também conhecida como 5G completo, é composta apenas dos elementos das redes 5G, ou seja, o gNB, a interface de radio NR e o 5GC. Nesta arquitetura, a comunicação entre os nós de rede 5G (gNB) é feita através da interface XN, e a comunicação entre gNB e 5GC é feita através da interface NG [9]. A Figura 9 ilustra a arquitetura SA.

Figura 9 - Arquitetura SA

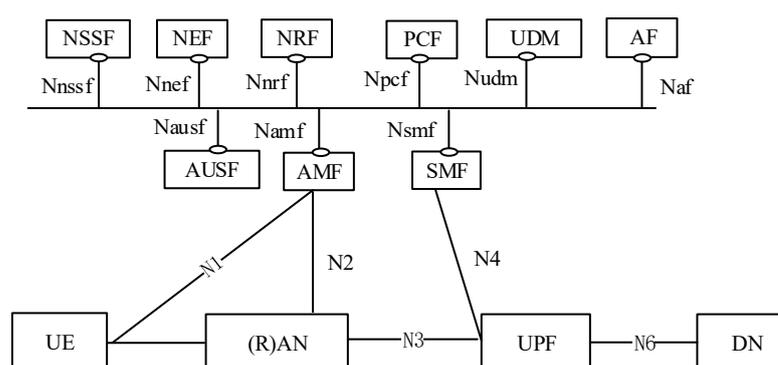


Fonte: Obtido de [10].

2.1.13 Elementos *core* de rede 5G

O 5GC se baseia no conceito de *Service-Based Architecture* (SBA), ou seja, todos os elementos da arquitetura de rede são definidos em termos de *Network Functions* (NF) ao invés das tradicionais entidades de rede. Assim sendo, os recursos da rede 5G são totalmente virtualizados [10], trazendo flexibilidade, escalabilidade além de economia de CAPEX e OPEX. A Figura 10 apresenta as NF's que compõe o 5GC:

Figura 10 - Arquitetura 5GC



Fonte: Obtido de [10].

Os elementos do 5GC são os seguintes [10]:

- *Network Slice Service Function* (NSSF) - Responsável pela seleção das fatias de rede apropriadas para o UE.
- *Network Exposure Function* (NEF) - Responsável pela comunicação das funcionalidades de rede, como monitoramento, provisionamento e cobrança para aplicações de terceiros.
- *Network Repository Function* (NRF) - Mantém um repositório de todas as instâncias NFs e seus serviços além de suportar a função *Discovery Function*, recebendo as requisições de NF *Discovery* das instâncias NF e provendo informações das NFs encontradas.
- *Policy Charging Function* (PCF) - Armazena e provê as políticas de acesso a rede.
- *Unified Data Management* (UDM) - Responsável pela geração das chaves de autenticação e identificação do usuário.

- *Application Function (AF)* - Responsável pela comunicação das aplicações com as NFs, como por exemplo, a aplicação IMS acessando o 5GC para provêr ao usuário o serviço de voz.
- *Authentication Server Function (AUSF)* - Responsável pela autenticação de acessos 3GPP e não 3GPP.
- *Access and Mobility Management Function (AMF)*- Responsável pelo controle de acesso, gerenciamento de registro, conexão, mobilidade e alcance.
- *Session Management Function (SMF)* - Responsável pelo gerenciamento de sessão e alocação e gerenciamento de endereço IP para o usuário.
- *User Plane Function (UPF)* - Responsável pela interconexão com a *Domain Network (DN)* e roteamento e encaminhamento de pacotes.

2.2 Espectro Eletromagnético e Ondas de Rádio

O espectro eletromagnético pode ser definido como toda a faixa de frequências que compõem a radiação eletromagnética. A radiação eletromagnética é uma forma de energia que se movimenta em formato de onda enquanto se propaga através do espaço. Estas ondas possuem diferentes características de transmissão dependendo do seu comprimento de onda [11].

O Espectro é frequentemente descrito em termos de sua frequência, que é a quantidade de ondas que se propagam em um determinado tempo por segundo. Esta quantidade por segundo, é referenciada na unidade conhecida como *Hertz (Hz)*, onde uma onda, ou ciclo, por segundo, é equivalente a um Hz. A frequência pode ser também definida pelo comprimento absoluto (em unidades métricas) de sua onda. Como as ondas eletromagnéticas se propagam em uma taxa constante, na velocidade da luz, o comprimento de onda e a frequência, são inversamente proporcionais. Quanto maior o comprimento de onda, menor a frequência e vice-versa. Matematicamente, a frequência é definida como mostra a Fórmula 1:

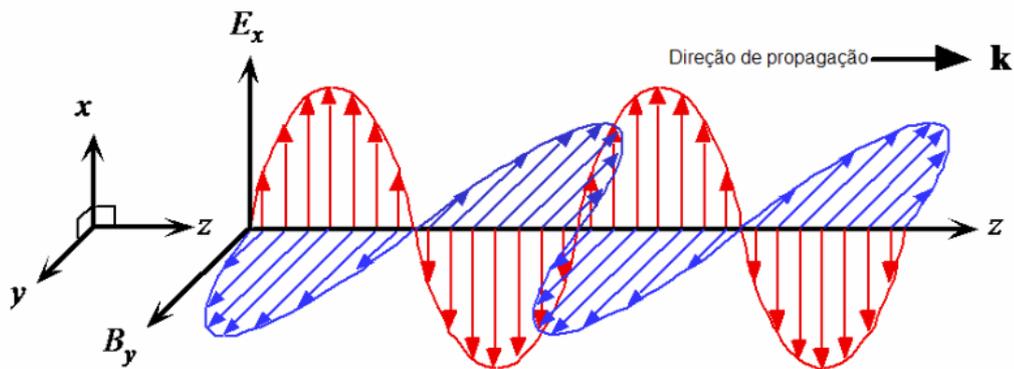
$$F = \frac{c}{\lambda}. \quad (1)$$

Onde:

- F = valor da frequência em Hertz (Hz)
- C = valor da velocidade da luz, em metros por segundo (m/s)
- λ = valor do comprimento de onda, em metros (m)

De forma gráfica, uma onda eletromagnética pode ser representada conforme a Figura 11, a qual é uma onda propagante cujo os campos elétrico e magnético variam no tempo e são perpendiculares entre si e à direção de propagação. O espectro é usualmente representado em unidades de quilohertz (KHz), ou 1000 ondas por segundo, em unidades de megahertz (MHz), ou um milhão de ondas por segundo, e em unidades de gigahertz (GHz), ou um bilhão de ondas por segundo.

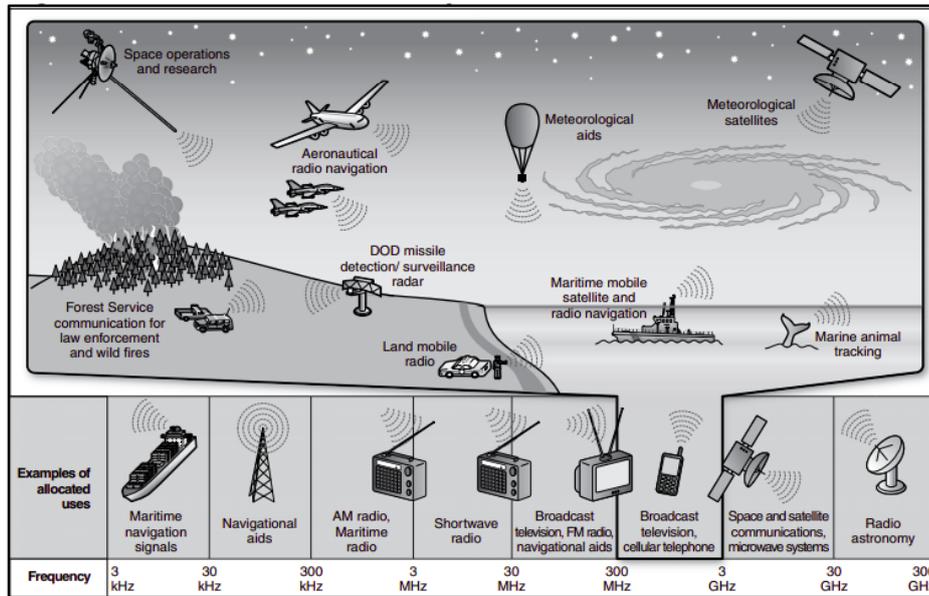
Figura 11 – Representação gráfica de uma onda eletromagnética



Fonte: Obtido de [12].

O espectro eletromagnético compreende ondas de luz e ondas de rádio que viajam à velocidade da luz [13], o que inclui a luz visível, os raios-X, os raios-gama e as ondas de rádio, que ocupam a porção do espectro eletromagnético entre o intervalo de 3 quilohertz (KHz) a 300 gigahertz (GHz). O termo “espectro de radiofrequência”, “espectro radioelétrico”, ou simplesmente “espectro”, referem-se ao mesmo objeto, ou seja, o conjunto de ondas de rádio disponíveis para uso por sistemas de comunicação [13]. Um pequeno resumo gráfico do espectro de radiofrequência pode ser observado na Figura 12:

Figura 12 - Uso do espectro de radiofrequência



Fonte: Obtido de [11].

2.2.1 Principais faixas de frequência

Conforme mencionado anteriormente, o intervalo do espectro eletromagnético, para as ondas de rádio, varia de aproximadamente 3 KHz a 300 GHz e é classificado conforme a Tabela 1:

Tabela 1 - Faixas de frequência

Faixa de frequência	Designação	Abreviatura	Comprimento de Onda
3 KHz – 30 KHz	<i>Very low frequency</i>	VLF	100 Km – 10 Km
30 KHz – 300 KHz	<i>Low frequency</i>	LF	10 Km – 1 Km
300 KHz – 3 MHz	<i>Medium frequency</i>	MF	1 Km – 100 m
3 MHz – 30 MHz	<i>High frequency</i>	HF	100 m – 10 m
30 MHz – 300 MHz	<i>Very high frequency</i>	VHF	10 m – 1 m
300 MHz – 3,000 MHz	<i>Ultra high frequency</i>	UHF	1 m – 10 cm
3 GHz – 30 GHz	<i>Super high frequency</i>	SHF	10 cm – 10 mm
30 GHz – 300 GHz	<i>Extremely high frequency</i>	EHF	10 mm – 1 mm
300 GHz – 3,000 GHz	<i>Tremendously high frequency</i>	THF	1 mm – 0.1 mm

Fonte: Adaptado de [14].

2.2.2 Classificações das faixas de frequência

As principais faixas de frequência utilizadas em comunicações móveis, são classificadas conforme a seguir [15]:

- UHF: Devido ao baixíssimo comprimento de onda, esta faixa permite a utilização de pequenas antenas. Comumente utilizada em serviços de comunicações móveis (2G, 3G, 4G,5G), televisão analógica e rádio amador.
- SHF: Também conhecida como micro-ondas, esta faixa disponibiliza significativa largura de banda, porém, com alcance de propagação limitado. Bastante utilizada em comunicações via satélite, comunicações móveis (5G e Wi-fi) e sistemas de radar.
- EHF: Faixa com grande capacidade de largura de banda, porém, suscetível a forte atenuação devido à chuva e com pouca penetrabilidade em edifícios. Amplamente utilizada em enlaces de micro-ondas de alta velocidade, 5G e radar.

2.3 Largura de Banda e Capacidade

A capacidade de dados de um sistema que utilize o espectro eletromagnético é geralmente proporcional a largura de banda utilizada. Usualmente, transmissões digitais via satélite, possuem taxas de 1.5 bps para cada Hz do espectro enquanto no 4G pode-se atingir aproximadamente 11.2 bps por Hz. Em termos comparativos, no 5G, é esperado taxas de 10 a 100 vezes superior ao 4G, ou 1120 bps por Hz [11]. A capacidade máxima de um sistema, em bits por segundos, pode ser descrita pelo teorema de Shannon-Hartley, como apresentado na Fórmula 2, que fundamenta a máxima taxa que uma informação pode ser transmitida sobre um canal de comunicação, em uma largura de banda específica na presença de ruído.

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right). \quad (2)$$

Onde:

- C = Capacidade do canal em bits por segundo (b/s)
- B = Largura de banda do canal, em Hertz (Hz)
- S = Potência média do sinal recebido sobre a largura de banda, em watts (W)
- N = Potência do ruído sobre a largura de banda, em watts (W)

- $\frac{S}{N}$ = Relação sinal-ruído do sinal de comunicação

2.4 Regulação de Espectro

Por ser um recurso escasso, o espectro precisa ser usado de forma organizada e regulamentada. Para isso, é necessário além de regulamentação nacional, padronização internacional. A regulamentação internacional para uso do espectro é estabelecida através de um tratado, o Regulamento de Rádio (RR) da União internacional das Telecomunicações (UIT), agência especializada das Organização das Nações Unidas (ONU). Baseado nessa padronização internacional, cada país administra nacionalmente o uso do espectro, estabelecendo através de uma Tabela Nacional de Atribuição de Frequências, quais serviços de radiocomunicação podem usar quais faixas de frequência e sob quais condições este uso pode acontecer. No Brasil, o órgão responsável pela administração nacional do uso de espectro é a Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) [13].

O principal objetivo da regulação de espectro é a alocação de espectro para as tecnologias mais apropriadas, de forma proporcional as necessidades sociais destas aplicações e o segundo objetivo, é a coordenação do uso do espectro entre os usuários. Órgãos reguladores, como a ANATEL, alocam o uso de espectro pela emissão de licenças, ou atos, para o uso de determinada porção do espectro para um propósito específico. Para a concessão, permissão ou autorização para explorar o uso de radiofrequência, é necessária a outorga específica do órgão regulador. De forma alternativa, os reguladores também podem permitir que o espectro seja utilizado de forma não licenciada, sujeito a regras de prioridade.

2.5 Alocação de Frequência

Inicialmente, os sistemas 2G foram alocados utilizando a faixa de 900 MHz, porém, pouco tempo depois, a banda DCS 1800 também foi adotada [5]. Atualmente, os sistemas 2G são compatíveis com as bandas apresentadas na Tabela 2:

Tabela 2 - Faixas de frequência 2G

Banda de Operação	Frequência de <i>Uplink</i>	Frequência de <i>Downlink</i>
T- GSM 380	380,2 – 389,8 MHz	390,2 – 399,8 MHz
T-GSM 410	410,2 – 419,8 MHz	420,2 – 429,8 MHz
GSM 450	450,4 – 457,6 MHz	460,4 – 467,6 MHz
GSM 480	478,8 – 486 MHz	488,8 – 496 MHz
GSM 710	698 – 716 MHz	728 – 746 MHz
GSM 750	747 – 763 MHz	777 – 793 MHz
T-GSM 810	806 – 821 MHz	851 – 866 MHz
GSM 850	824 – 849 MHz	869 – 894 MHz
P-GSM 900	890 – 915 MHz	935 – 960 MHz
E-GSM 900	880 – 915 MHz	925 – 960 MHz
R-GSM 900	876 – 915 MHz	921 – 960 MHz
ER-GSM 900	873 – 915 MHz	918 – 960 MHz
DCS 1800	1 710 – 1 785 MHz	1 805 – 1 880 MHz
DCS 1900	1 850 – 1 910 MHz	1 930 – 1 990 MHz

Fonte: Obtido de [16].

Os sistemas 2G são divididos em canais com portadoras de espaçamento nominal de 200 KHz, para *uplink* e *downlink*, chamados de *Absolute Radio Frequency Channel Numbers* (ARFCN) ou Número Absoluto do Canal de Rádio de Frequência. O ARFCN indica um par de canais nos sentidos *uplink* e *downlink* [5]. O Padrão 2G GSM, suporta a alocação de 12 blocos de 200 KHz, totalizando assim, uma largura de banda máxima de 2,4 MHz [17]. No Brasil, os sistemas 2G licenciados pela ANATEL como Serviço Móvel Pessoal (SMP), ou seja, que permitem a comunicação entre aparelhos celulares, telefone fixo e acesso à internet banda larga, operam principalmente, nas bandas GSM 850, P-GSM 900, E-GSM 900 e DCS 1800 [18].

Atualmente, os sistemas 3G são compatíveis com as faixas de frequência conforme Tabela 3, em ambos os sentidos, *uplink* e *downlink*:

Tabela 3 - Faixas de frequência 3G

Banda de Operação	Frequência de <i>Uplink</i>	Frequência de <i>Downlink</i>
I	1920 – 1980 MHz	2110 – 2170 MHz
II	1850 – 1910 MHz	1930 – 1990 MHz
III	1710 -1785 MHz	1805 – 1880 MHz
IV	1710 -1755 MHz	2110 – 2155 MHz
V	824 – 849 MHz	869 – 894 MHz
VI	830 – 840 MHz	875 – 885 MHz
VII	2500 – 2570 MHz	2620 – 2690 MHz
VIII	880 – 915 MHz	925 – 960 MHz
IX	1749.9 – 1784.9 MHz	1844.9 – 1879.9 MHz
X	1710 – 1770 MHz	2110 – 2170 MHz
XI	1427.9 – 1447.9 MHz	1475.9 – 1495.9 MHz
XII	699 – 716 MHz	729 – 746 MHz
XIII	777 – 787 MHz	746 – 756 MHz
XIV	788 – 798 MHz	758 – 768 MHz
XIX	830 – 845 MHz	875 – 890 MHz
XX	832 – 862 MHz	791 – 821 MHz
XXI	1447.9 – 1462.9 MHz	1495.9 – 1510.9 MHz
XXII	3410 – 3490 MHz	3510 – 3590 MHz
XXV	1850 – 1915 MHz	1930 – 1995 MHz
XXVI	814 – 849 MHz	859 – 894 MHz
XXXII	N/A	1452 – 1496 MHz

Fonte: Adaptado de [19].

Diferentemente dos sistemas 2G, o 3G possui canais com portadoras espaçadas nominalmente de 5 MHz e sua frequência é designada pelo UTRA *Absolute Radio Frequency Channel Number* (UARFCN). No Brasil, os sistemas 3G licenciados pela ANATEL como SMP operam principalmente nas bandas I, V e VI, apesar de terem outros sistemas licenciados em outras bandas [18].

Atualmente, existem mais de 60 bandas compatíveis com os sistemas 4G, em tecnologias variadas como IoT e carros conectados [20]. Diferentemente das tecnologias legadas 2G e 3G, o 4G possui uma variedade superior de valores de larguras de banda, variando de 1,4 MHz até 20 MHz, facilitando assim, para as operadoras de telecomunicações, a gerência de espectro. Conforme a Tabela 4, encontram-se as bandas de operação E-UTRA licenciadas como SMP, para o 4G no Brasil, os modos de duplexação e as larguras de bandas compatíveis:

Tabela 4 - Bandas de operação E-UTRA ativas no Brasil

Banda de Operação	Faixa de Frequência <i>Uplink</i>	Faixa de Frequência <i>Downlink</i>	Largura de Banda do Canal (MHz)	Modo de Duplexação
1	1920 – 1980 MHz	2110 – 2170 MHz	5, 10	FDD
3	1710 – 1785 MHz	1805 – 1880 MHz	1.4, 3, 5, 10, 15, 20	FDD
5	824 – 849 MHz	869 – 894 MHz	1.4, 3, 5, 10	FDD
8	880 – 915 MHz	925 – 960 MHz	1.4, 3, 5, 10	FDD
28	703 – 748 MHz	758 – 803 MHz	3, 5, 10, 15, 20	FDD
31	451 – 458 MHz	461 – 468 MHz	1.4, 3, 5	FDD
40	2300 – 2400 MHz	2300 – 2400 MHz	5, 10, 15, 20	TDD
41	2496 – 2690 MHz	2496 – 2690 MHz	5, 10, 15, 20	TDD
42	3400 – 3600 MHz	3400 – 3600 MHz	5, 10, 15, 20	TDD

Fonte: Adaptado de [20] e [21].

A frequência da portadora, tanto para *uplink* e *downlink*, para o 4G é designada pelo *E-UTRA Absolute Radio Frequency Channel Number* (EARFCN), variando em um intervalo entre 0 e 262143 canais.

Os sistemas 5G funcionam em dois intervalos de faixas de frequência, denominados *Frequency Range 1* (FR1) ou faixa de frequência 1 e *Frequency Range 2* (FR2) ou faixa de frequência 2 que agregados, possuem um número superior a 70 bandas de operação compatíveis. O intervalo de ambos, FR1 e FR2, é apresentado na Tabela 5:

Tabela 5 - Intervalos de frequência 5G

Designação	Faixa de Frequência	Faixa de Frequência Correspondente
	FR1	410 – 7125 MHz
FR2	FR2-1	24250 – 52600 MHz
	FR2-2	52600 – 71000 MHz

Fonte: Obtido de [22].

A largura de banda de canal 5G sofre variação de acordo com o *Spacing Carrier* (SCS) ou espaçamento das subportadoras, que são transmitidas através do *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA), ou acesso múltiplo por divisão de frequência ortogonal, utilizada tanto no 4G como 5G. No 4G, o espaçamento das subportadoras possui o valor fixo de 15 KHz e já no 5G, o espaçamento é um número escalável de acordo com a faixa de

frequência, podendo ser empregado nos espaçamentos de 15 KHz, 30 KHz e 60 KHz, para a faixa FR1, 60 KHz e 120 KHz, para a faixa FR2-1 e 120 KHz, 480 KHz e 960 KHz, para a faixa FR2-2 [22]. De acordo com [21], na Tabela 6 encontram-se as principais bandas de operação licenciadas como SMP para o 5G no Brasil, com os modos de duplexação, largura de banda e SCS compatíveis.

No 5G, é utilizado o NR *Absolute Radio Frequency Channel Number* (NR-ARFCN) para identificação da posição dos canais de *uplink* e *downlink* e possuem intervalo de 0 a 3279165 canais [22].

2.6 Refarming

O termo *refarming* pode ser definido como a gestão dos recursos de radiofrequência com a realocação de banda e espectro [23]. De forma análoga, o *refarming* é um conceito caracterizado pela reutilização de frequências já utilizadas para novas tecnologias, tornando-a mais otimizada [24].

Adicionalmente, conforme [25], o *refarming* também pode ser implementado como compartilhamento de espectro, suportando diferentes gerações de redes móveis operando na mesma faixa de frequência, sendo categorizado, convencionalmente, em duas formas:

- *Overlay Spectrum Sharing*, que permite que os usuários secundários, de forma oportuna, utilizem a parte do espectro não utilizado dos usuários legados.
- *Underlay Spectrum Sharing*, que permite que os usuários co-transmitem informações utilizando a mesma banda.

Muitas operadoras ainda utilizam os sistemas 2G para a tecnologia *Machine to Machine* (M2M), ou seja, para a comunicação entre dispositivos, como leitores inteligentes. Devido as baixíssimas taxas de *throughput* necessárias para o funcionamento dos dispositivos M2M, o baixo custo de terminais e por ser um padrão global, o GSM ainda é muito atrativo para este tipo de implementação [17]. Neste cenário, o *Overlay Spectrum Refarming* é a forma mais propícia de utilização, garantindo a interoperabilidade entre GSM e LTE.

Tabela 6 - Bandas de operação 5G licenciadas no Brasil

Banda de Operação	Faixa de Frequência <i>Uplink</i>	Faixa de Frequência <i>Downlink</i>	SCS (KHz)	Largura de Banda do Canal (MHz)	Modo de Duplexação
n1	1920 – 1980 MHz	2110 – 2170 MHz	15	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 45, 50	FDD
			30	10, 15, 20, 25, 30, 40, 45, 50	
			60	10, 15, 20, 25, 30, 40, 45, 50	
n3	1710 – 1785 MHz	1805 – 1880 MHz	15	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	FDD
			30	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	
			60	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50	
n7	2500 – 2570 MHz	2620 – 2690 MHz	15	5, 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50	FDD
			30	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50	
			60	10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50	
n28	703 – 748 MHz	758 – 803 MHz	15	3, 5, 10, 15, 20, 25, 30, 40	FDD
			30	10, 15, 20, 25, 30, 40	
			60	-	
n40	2300 – 2400 MHz	2300 – 2400 MHz	15	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50	TDD
			30	10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	
			60	10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	
n78	3300 – 3800 MHz	3300 – 3800 MHz	15	5, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50	TDD
			30	10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	
			60	10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	
n258	24250 – 27500 MHz	24250 – 27500 MHz	60	50, 100, 200	TDD
			120	50, 100, 200, 400	

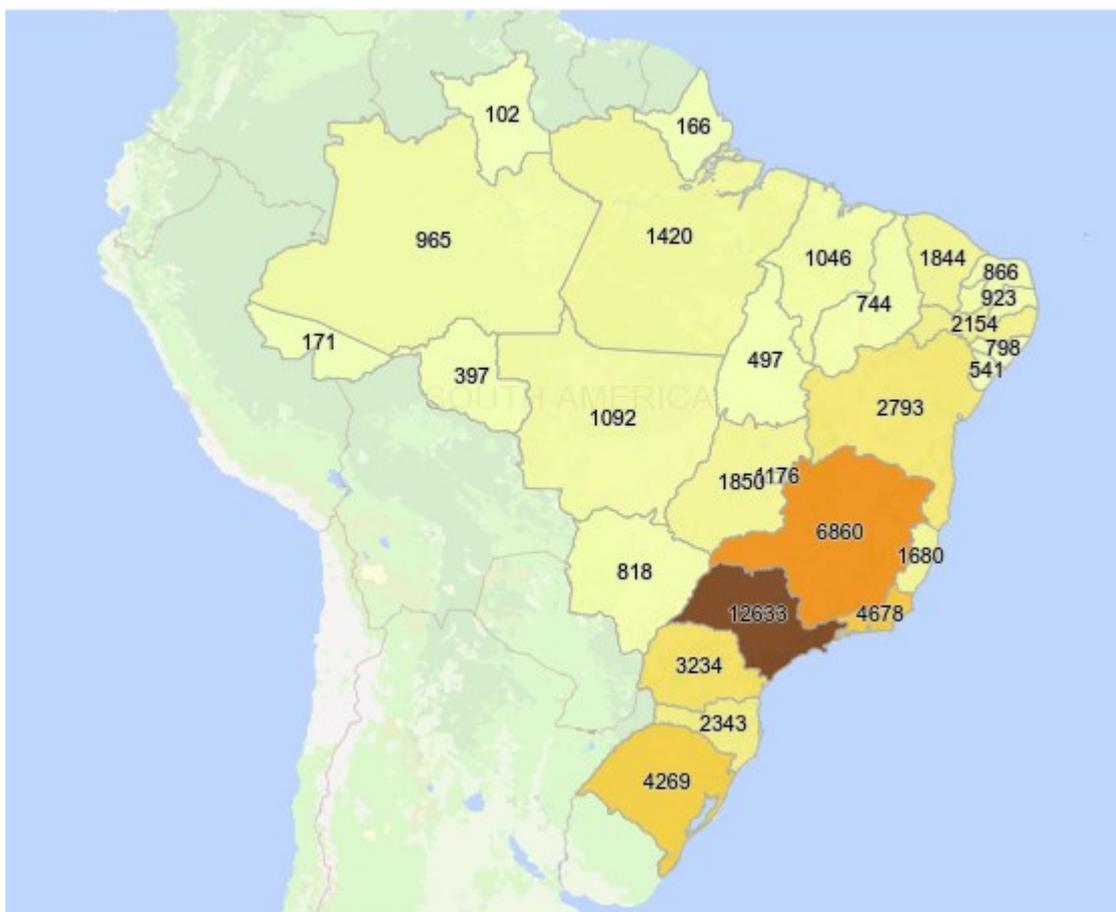
Fonte: Obtido de [21].

Devido à natureza do espectro de radiofrequência ser um recurso escasso e limitado, o *refarming* é uma solução promissora para as operadoras de telecomunicações, não somente por prover soluções com o melhor custo-benefício para os usuários, como também para solucionar os problemas relacionados a falta de espectro disponível. Por fim, a definição apresentada por [23] representa de forma mais adequada a proposta deste trabalho.

2.7 Cenário de Utilização das Faixas de Frequência no Brasil

Como pode ser visto na Figura 13, atualmente, existem mais de 56.000 ERBs 2G distribuídas pelo Brasil, licenciadas pela ANATEL como SMP.

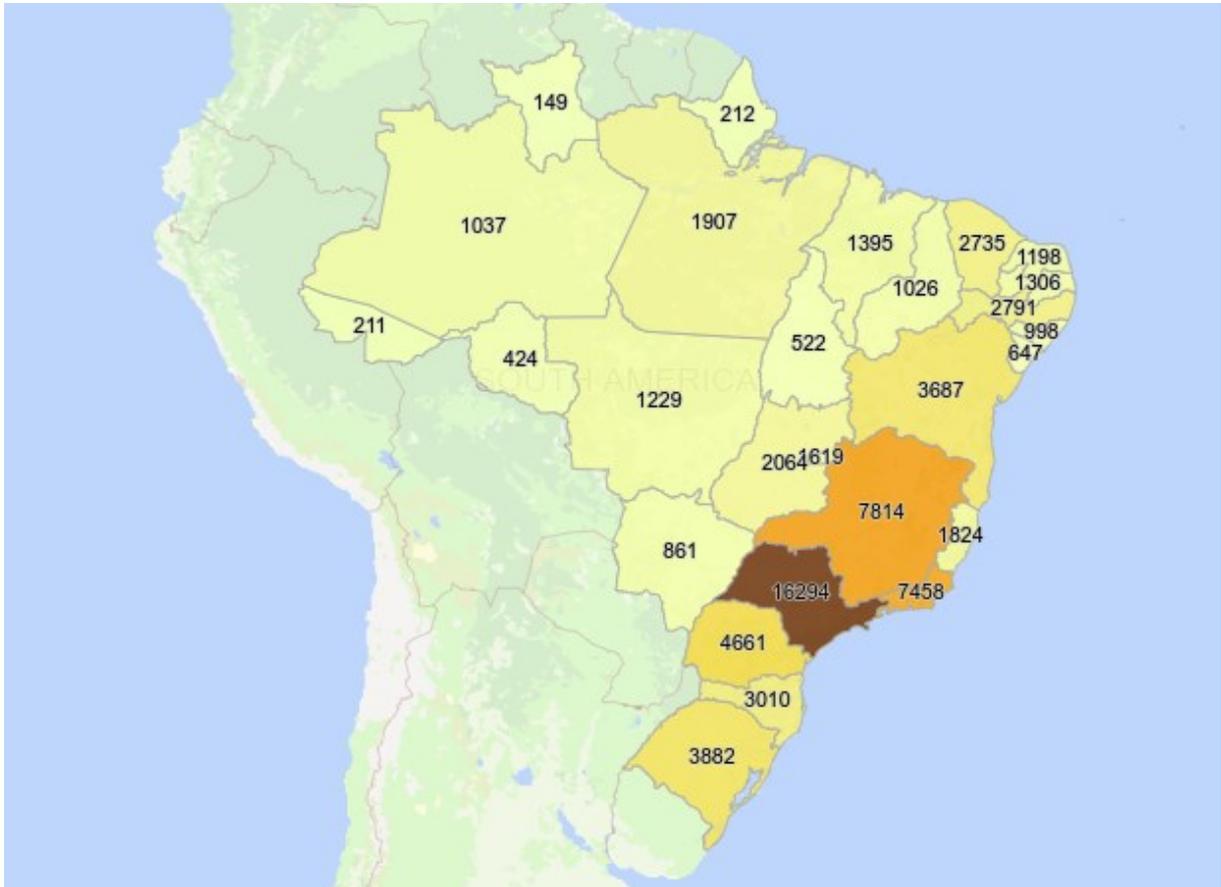
Figura 13 - ERBs 2G licenciadas no Brasil



Fonte: Obtido de [21].

De forma similar, como consta na Figura 14, atualmente, existem mais de 70.000 ERBs 3G distribuídas pelo Brasil, licenciadas como SMP

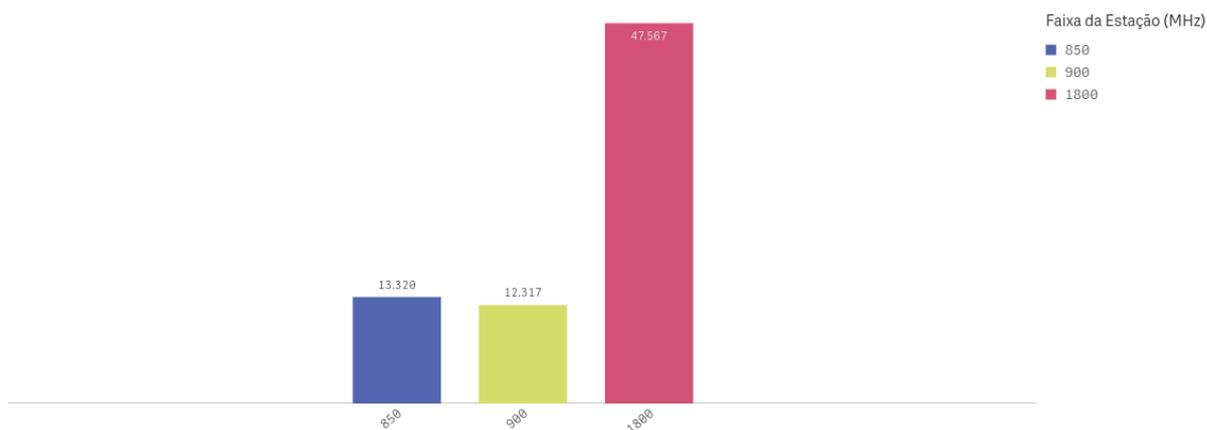
Figura 14 - ERBs 3G licenciadas no Brasil



Fonte: Obtido de [21].

Como pode ser observado na Figura 15, as faixas mais utilizadas pelas ERBs 2G são as faixas correspondentes as bandas de operação GSM 850 e DCS 1800.

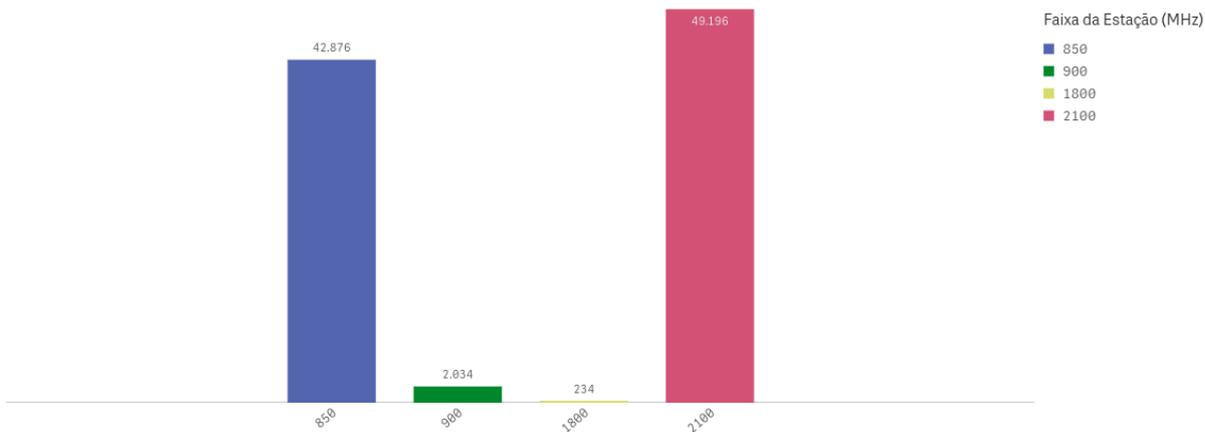
Figura 15 - Faixas de frequência licenciadas para o 2G



Fonte: Obtido de [21].

De forma similar, no 3G, as faixas mais utilizadas pelas ERBs são as faixas correspondentes as bandas de operação 1 e 5, conforme apresentado na Figura 16:

Figura 16 – Faixas de frequência licenciadas para o 3G



Fonte: Obtido de [21].

Conforme a resolução da ANATEL de nº 454, de 11 de dezembro de 2006, as seguintes subfaixas foram destinadas para atendimento SMP:

- Faixa de 1.800 MHz, de 1.755 MHz a 1.775 MHz e de 1.850 MHz a 1.870 MHz
- Faixa de 1.900 MHz, de 1.885 MHz a 1.900 MHz e de 1.920 MHz a 1.980 MHz
- Faixa de 800 MHz, de 806 MHz a 821 MHz e de 851 MHz a 866 MHz
- Faixa de 2.100 MHz, de 2.110 MHz a 2.170 MHz

E mantidas as destinações ao atendimento SMP, as subfaixas:

- Faixa de 800 MHz, de 824 MHz a 849 MHz e de 869 MHz a 894 MHz
- Faixa de 900 MHz, de 898,5 MHz a 901 MHz, de 943,5 MHz a 946 MHz, de 907,5 MHz a 915 MHz e de 952,5 MHz a 960 MHz
- Faixa 1.800 MHz, de 1.710 MHz a 1.755 MHz, 1.805 MHz a 1.850 MHz, 1775 MHz a 1785 MHz e de 1870 MHz a 1880 MHz

Nesta resolução, as faixas foram divididas em blocos de subfaixas adquiridos pelas operadoras de telecomunicações, no leilão ocorrido em 2007 [26]. Levando em consideração apenas a faixa de frequência de 1800 MHz, as subfaixas foram divididas conforme Tabela 7:

Tabela 7 - Blocos de subfaixas de extensão

Blocos de Subfaixas de Extensão	Faixa de Frequência <i>Uplink</i> (MHz)	Faixa de Frequência <i>Downlink</i> (MHz)
1	1.725 a 1.727,5	1.820 a 1.822,4
2	1.727,5 a 1.730	1.822,5 a 1.825
3	1.730 a 1.732,5	1.825 a 1.827,5
4	1.732,5 a 1.735	1.827,5 a 1.830
5	1.735 a 1.737,5	1.830 a 1.832,5
6	1.737,5 a 1.740	1.832,5 a 1835
7	1.775 a 1.777,5	1.870 a 1.872,5
8	1.777,5 a 1.780	1.872,5 a 1.875
9	1.780 a 1.782,5	1.875 a 1.877,5
10	1.782,5 a 1.785	1.877,5 a 1.880

Fonte: Obtido de [27].

O Quadro 1 apresenta a distribuição dos blocos de subfaixas adquiridos por cada operadora. Nos campos preenchidos por Vago, na licitação ocorrida não foi enviada nenhuma proposta por nenhuma operadora. Já para os campos preenchidos como ND, os vencedores dos blocos não foram homologados pela ANATEL [27]:

Quadro 1 - Blocos de subfaixas de extensão adquiridos por cada operadora

Área de Atuação		Faixas de frequências de extensão – 1800 MHz									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	SP 11	Claro				Tim			Oi		
2	SP Interior	Tim	Vago						Claro		
	Setor 33	Algar				Tim			Claro		
3	RJ	Oi	Vago		Tim			Claro			
	ES	Oi	ND					Claro			
4	MG	Oi	Tim					Vivo (Telemig)			
	Setor 3	Oi	Tim					Algar			
5	PR/SC	Tim				ND			Claro		
	Londrina	Sercomtel				Claro					
6	Rio G. do Sul	Vago						Claro			
	Pelotas	Tim			Vago			Claro			
7	C. Oeste	Vago						Claro			
	MS setor 22	Algar				Vago			Claro		
	GO setor 25	Algar				Vago	Options		Claro		
8	Norte	Oi	Vago					Claro			
9	BA/SE	Oi	Tim					Oi	Claro		
10	Nordeste	Oi	Tim					Claro			

Fonte: Adaptado de [27].

De maneira progressiva, a ANATEL realizou outras licitações nos anos seguintes com as sobras das subfaixas de extensão que não foram preenchidas. Para o restante das subfaixas que compõe a faixa de frequência de 1800 MHz, conforme o arranjo de blocos que consta na resolução nº 454, atualmente, a divisão das faixas para cada operadora pode ser vista na Tabela 8, de acordo com os dados de licenciamentos de estações obtidos em [21].

Tabela 8 - Subfaixas da faixa de frequência de 1800 MHz

	Faixa de Frequência <i>Uplink</i> (MHz)	Faixa de Frequência <i>Downlink</i> (MHz)	Prestadora
Subfaixa D	1710 a 1725	1.805 a 1.820	CLARO, TIM e VIVO
Subfaixa E	1740 a 1755	1835 a 1850	CLARO, TIM e VIVO
Subfaixa M	1755 a 1765	1850 a 1860	CLARO, TIM e VIVO
Subfaixa de Extensão	1.765-1.770 1.770-1.775	1.860-1.865 1.865-1.870	CLARO, TIM e VIVO

Fonte: Obtido de [20].

No Brasil, a princípio, a maior adesão das faixas de frequência 1800 MHz foram para os sistemas 2G, 3G [27] e apenas a partir de 2014, iniciaram-se as primeiras ativações desta faixa com o 4G [28]. Apesar da resolução da ANATEL de nº 454 ter sido revogada pela mais atual, de nº 757, de 08 de novembro de 2022, conforme consta na resolução vigente, os sistemas em operação previamente autorizados, podem continuar em operação até 22 de dezembro de 2032, ou pelo prazo remanescente da autorização de uso de radiofrequências, o que ocorrer primeiro. Este cenário implica a necessidade de uma eficiente gestão de espectro para o uso do 4G, visto que conforme as Figuras 15 e 16, as subfaixas contidas nas tabelas 7 e 8 ainda estão licenciadas para as tecnologias legadas 2G e 3G. Diante disto, o *refarming* do espectro utilizado pelo 2G e 3G, para as operadoras que ainda o utilizam, se mostra bastante eficaz devido a constatare demanda de tráfego móvel [29] e evolução e adesão de novas tecnologias, como o VoLTE.

Conforme [30], o *refarming* da faixa de frequência de 1800 MHz já vem sendo executado por algumas operadoras brasileiras e existe, de forma inicial, pela ANATEL, o planejamento de executar o *refarming* das subfaixas D e E [31].

2.8 Considerações Finais

Neste capítulo, foi apresentado um breve histórico acerca dos padrões de redes móveis existentes, do 1G até o padrão mais atual, 5G, detalhando-se suas respectivas arquiteturas de rede, os elementos constituintes da rede de acesso e *core* de rede.

Adicionalmente, foi definido o conceito de espectro eletromagnético bem como apresentado as principais faixas de frequências e suas devidas aplicações. Ademais, foi

explicado o conceito de alocação de banda, bem como demonstrado as faixas de frequências compatíveis com as redes 2G e 3G e as principais faixas de frequências ativas e licenciadas pela ANATEL no Brasil para as redes 4G e 5G.

Em sequência, foi exposto o conceito do *refarming* e apresentado algumas formas de aplicação, bem como demonstrado os atrativos para a utilização das redes legadas, como o 2G.

Ao final do capítulo, apresentou-se o cenário atual das faixas de frequências licenciadas para SMP e ativas para todas as gerações de redes móveis. De forma quantitativa, foi demonstrado a existência significativa de ERBs 2G e 3G, bem como detalhado a aquisição por parte das operadoras brasileiras das primeiras faixas de frequências designadas para SMP.

Definido estes pontos, o próximo capítulo além de contextualizar outros trabalhos acerca do tema, detalhará todo o processo de execução do *refarming*, desde o cenário inicial de uma rede móvel existente, apresentando as principais métricas de desempenho a serem analisadas e demonstrando a execução passo-a-passo do *refarming*.

3 Metodologia

Durante o processo de pesquisa de artigos relacionados ao tema objeto de estudo, foram encontrados trabalhos semelhantes sobre o processo de realocação de bandas, originalmente destinadas e utilizadas para o 2G, que através do *refarming*, os recursos de espectro foram disponibilizados para o 4G. Conforme [23], foi executado o *refarming* das faixas de frequência utilizadas previamente para o 2G, 800 MHz e 900 MHz, e alocado os recursos do espectro para o 4G, e assim, analisado os ganhos de cobertura do 4G com as novas bandas e o comportamento dos indicadores de qualidade 2G pós *refarming*.

De forma semelhante, conforme [32], foi proposto o *refarming* da faixa de frequência de 1800 MHz, primeiramente alocada para o padrão GSM, para implantação dos padrões LTE/LTE-A. Através de simulação computacional, foram analisados os indicadores: eficiência espectral e *throughput*, a partir de valores diferentes de larguras de bandas disponíveis, variando entre 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz.

O tema deste trabalho se assemelha ao artigo citado anteriormente, porém, analisando os ganhos do *refarming* da faixa de frequência de 1800 MHz em uma rede móvel real, sem simulação computacional, com a realocação dos recursos de espectro alocados inicialmente no 2G para o 4G existente.

3.1 Ambiente Original de Radiofrequência

Como citado anteriormente no Quadro 1, a operadora Algar Telecom possui 8 blocos de subfaixas de extensão, subdivididos por uma largura de banda de 2,5 MHz, para a faixa de frequência de 1800 MHz, distribuídas em quatro regiões de atuação. Após um levantamento interno, foi constatado a possibilidade operacional de realização do *refarming*, em algumas cidades, dentro da região de operação da operadora, conforme setores do Plano Geral de Outorgas (PGO) [33], onde os blocos de subfaixas estavam alocados, de forma simultânea, para o 2G e 4G, conforme Tabela 9:

Tabela 9 - Blocos subfaixas de extensão da faixa de frequência de 1800 MHz – Algar Telecom

Área de Atuação	Bloco Subfaixa de Extensão	Faixa de Frequência <i>Uplink</i> (MHz)	Faixa de Frequência <i>Downlink</i> (MHz)	Tecnologia
Setor 22,25 e 33	1	1.725 a 1.727,5	1.820 a 1.822,4	2G
Setor 22,25 e 33	2	1.727,5 a 1.730	1.822,5 a 1.825	2G
Setor 22,25 e 33	3	1.730 a 1.732,5	1.825 a 1.827,5	4G
Setor 22,25 e 33	4	1.732,5 a 1.735	1.827,5 a 1.830	4G
Setor 3	7	1.775 a 1.777,5	1.870 a 1.872,5	2G
Setor 3	8	1.777,5 a 1.780	1.872,5 a 1.875	2G
Setor 3	9	1.780 a 1.782,5	1.875 a 1.877,5	4G
Setor 3	10	1.782,5 a 1.785	1.877,5 a 1.880	4G

Fonte: Adaptado de [27] e [33].

As cidades aptas para receberem o *refarming* da faixa de frequência de 1800 MHz estão contidas dentro do setor 3, conforme demonstrado na Tabela 9. As outras cidades localizadas nos setores 22, 25 e 23 estão fora do escopo de realização do *refarming* apresentado neste trabalho. As cidades do setor 3 possuem a característica comum de todas possuírem pelo menos uma ERB 2G, situada dentro do perímetro urbano da cidade com um setor omnidirecional, ou seja, que irradia em 360°, na faixa de frequência de 900 MHz. Na mesma área de atuação da Tabela 9, a Algar também possui a outorga para subfaixa de extensão da faixa de 900 MHz, com a faixa de frequência de *uplink* de 907,5 MHz a 910 MHz e a faixa de frequência de *downlink* de 952,5 MHz a 955 MHz [34]. Ao se utilizar de frequências mais baixas, conforme demonstrado na Fórmula 1, devido ao maior comprimento de onda, a perda de percurso é menor se comparado a outras faixas com frequências superiores. Diante disso, nestas localidades, ao se alocar os blocos das subfaixas utilizadas inicialmente no 2G, para o 4G, estas não sofrem nenhum tipo de prejuízo, seja por cobertura, ou por capacidade de tráfego de voz, visto que a demanda por esse tipo de serviço encontra-se cada vez menor.

Seguindo as orientações da Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD), o nome das cidades onde o *refarming* foi executado, em uma rede existente, não será divulgado. Devido a isso, as cidades foram classificadas conforme a seguir:

- Cidade A – Minas Gerais

- Cidade B – Minas Gerais
- Cidade C – Minas Gerais
- Cidade D – Minas Gerais

Na seção a seguir, apresentam-se as métricas utilizadas para mensuração da qualidade da rede 4G, pós *refarming*.

3.2 Métricas de Desempenho

3.2.1 *Throughput downlink e uplink*

Throughput, ou vazão, é definido como a taxa de transmissão em um determinado canal, por segundo. Essa métrica é expressa em unidades de bits/s. Nos sistemas móveis, esta taxa é expressa tanto no sentido *downlink* como no sentido *uplink*.

3.2.2 Eficiência espectral

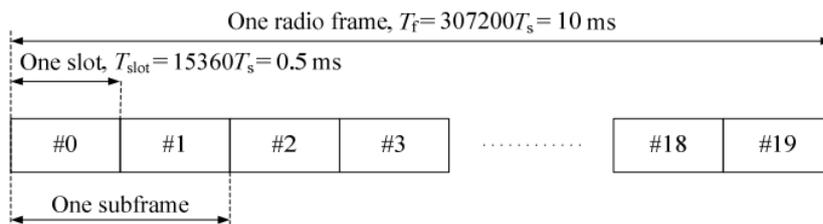
A eficiência espectral de um sistema é uma medida obtida pela comparação da razão entre a taxa de transmissão, em bits/s com a largura de banda disponível no canal de comunicação, em Hertz, sendo, portanto, expressa em bits/s/Hertz.

3.2.3 Uso de PRB

A menor unidade de recurso no LTE é conhecida como *Resource Element (RE)*. Cada RE consiste de uma subportadora, para o domínio da frequência e de um símbolo, de duração de 66,66 μ s, que é a menor porção de uma informação gerada a partir da modulação, para o domínio do tempo. O PRB é definido pelo conjunto de símbolos consecutivos e o conjunto de subportadoras [35]. Portanto, cada PRB é composto por uma série de elementos RE, correspondendo a um *slot* de duração de 0.5 ms no domínio do tempo e de 12 subportadoras de 15 KHz, totalizando uma largura de banda de 180 KHz, no domínio da frequência. Sendo assim, o PRB define a menor unidade de recurso que pode ser alocada para um usuário. Os *slots* são agrupados em duas subdivisões: *frame*, ou quadro e *subframe*, ou subquadro. A estrutura do quadro muda conforme o tipo de duplexação. Como o foco deste estudo são as faixas de frequência que utilizam o tipo de duplexação FDD, a estrutura apresentada será do tipo 1. Na

estrutura do *frame* tipo 1, a transmissão do sinal, em ambos os sentidos, *downlink* e *uplink*, é organizada por *frames* de rádio com 10 ms de duração, e 10 subquadros consecutivos, numerados de 0 a 9, com duração de 1 ms. Neste caso, o *subframe* é definido por dois *slots* de duração de 0.5 ms, utilizando o espaçamento entre portadoras de 15 KHz. A Figura 17 ilustra a representação de um quadro de rádio, onde T_s equivale a unidade básica de tempo do LTE, definida por $1/(15000 * 2048)$, sendo T_f a duração do quadro de rádio e T_{slot} a duração do slot.

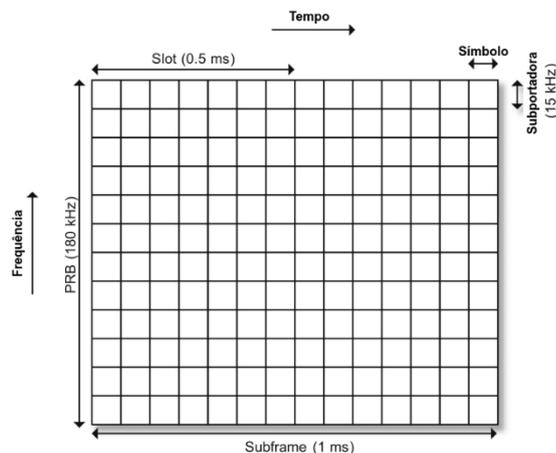
Figura 17 - Estrutura do quadro de rádio tipo 1



Fonte: Obtido de [35].

A quantidade de símbolos compreendidos na duração de um *slot*, em um PRB, pode sofrer variações de acordo com o parâmetro *cyclic prefix*, ou prefixo cíclico. Para o prefixo cíclico normal, são utilizados 7 símbolos por slot e para o prefixo cíclico estendido, são utilizados 6 símbolos por slot. Em geral, o prefixo cíclico normal é o mais utilizado [7], em ambos os sentidos, *downlink* e *uplink* e, portanto, será o padrão considerado neste trabalho. A Figura 18 ilustra a estrutura de um *subframe* contendo um par de PRBs:

Figura 18 - Estrutura de um *subframe*



Fonte: Adaptado de [36].

A quantidade de PRBs varia conforme a largura de banda utilizada, como apresentado na Tabela 10:

Tabela 10 - Quantidade de PRBs por largura de banda

Largura de Banda Total (MHz)	Quantidade de PRBs
1.4	6
3	15
5	25
10	50
15	75
20	100

Fonte: Adaptado de [7].

A métrica do uso de PRB será avaliada em valores percentuais, indicando o uso dos recursos da rede LTE.

3.3 Procedimentos para o *Refarming*

Para a execução do *Refarming*, foram utilizados os softwares de *Operations support system* (OSS) *Imaster MAE*, do Fabricante Huawei e o *software Netact*, do Fabricante Nokia. Através destas aplicações, é possível gerenciar, configurar e monitorar toda a rede de acesso Nokia e Huawei, além também de gerenciar variados elementos de *core* de rede. Ambos os *softwares* estão instalados em servidores dedicados na infraestrutura de *data center* da Algar Telecom. Essas aplicações podem ser acessadas via servidor web e por intermédio de *Virtual Private Network* (VPN).

As quatro cidades contidas dentro do escopo do *refarming*, possuem BTSs e *Node Bs* 2G e 3G Huawei e *eNodeBs* 4G Nokia. De forma similar a descrição feita das cidades onde o *refarming* foi realizado, a nomenclatura das ERBs constituintes de cada cidade, por motivos de concordância com a LGPD, é descrita conforme Tabela 11:

Tabela 11- ERBs contidas no escopo do *refarming*

Nome da ERB	Cidade	UF	Tecnologia	Frequência 2G (MHz)	Frequência 3G (MHz)	Frequência 4G (MHz)
ERB A	Cidade A	MG	2G – 3G – 4G	900 e 1800	850 e 2100	1800
ERB A2	Cidade A	MG	2G – 3G	900	850 e 2100	-
ERB B	Cidade B	MG	2G – 3G – 4G	1800	2100	1800
ERB B2	Cidade B	MG	2G	900 e 1800	-	-
ERB C	Cidade C	MG	2G – 3G – 4G	900 e 1800	850 e 2100	1800
ERB D	Cidade D	MG	2G – 3G – 4G	900 e 1800	850 e 2100	1800

Fonte: Elaborada pelo autor.

De forma preliminar, para a execução do *refarming*, todas as células 2G 1800 MHz, que ocupam os blocos de subfaixa de extensão 7 e 8, conforme Tabela 9, foram desativadas na aplicação *Imaster* MAE, evitando assim que ocorra qualquer tipo de interferência entre as portadoras do 4G e 2G. A Tabela 12 contém a informação quantitativa das células 2G desativadas por cidade e ERB.

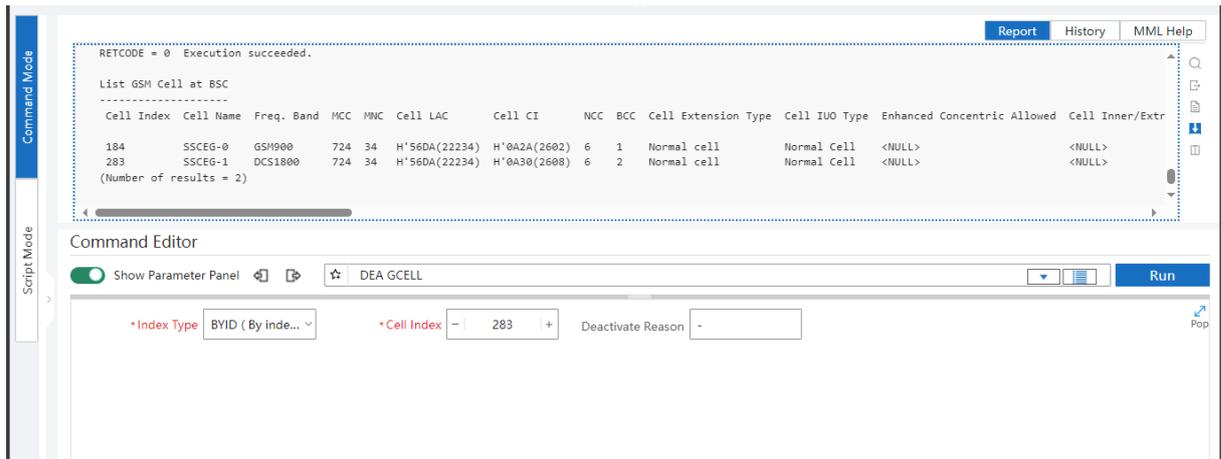
Tabela 12 – Quantidade de células desativadas por cidade

Nome da ERB	Cidade	UF	Quantidade de células 2G Desativadas
ERB A	Cidade A	MG	2
ERB A2	Cidade A	MG	3
ERB B	Cidade B	MG	3
ERB B2	Cidade B	MG	2
ERB C	Cidade C	MG	2
ERB D	Cidade D	MG	1

Fonte: Elaborada pelo autor.

As desativações ocorreram em dias alternados na semana, uma localidade por vez, sempre sendo executada em janela noturna, com baixo tráfego de usuários na rede. A desativação é feita de maneira lógica, através do comando pré-definido DEFA GCELL, como pode ser na Figura 19:

Figura 19 - Comando de desativação das células 2G Huawei



Fonte: Elaborada pelo autor.

Após realizada a desativação das células 2G, é possível então prosseguir com o aumento da largura de banda da portadora do 4G na faixa de frequência de 1800 MHz. De forma preliminar, antes de cada alteração, são verificados todos os alarmes pré-existentes associados ao funcionamento da ERB com a mesma sendo configurada em modo manutenção, na aplicação *Netact*, para evitar o acionamento dos técnicos de operação celular da Algar Telecom ao site em questão.

Figura 20 - Exemplo de uma ERB em modo manutenção na aplicação Nokia *Netact*

Severity	Alarm Time	Object...	Alarm Number	Alarm Text	Acknowl...	Correlat...	Distinguished Name	Troubl...	Ack...	Instance ...
Minor	2024-06-07 17:37:18	MRBTS	9251	NETWORK ELEMENT UNDER MAIN...			PLMN-PLMN/MRBTS-20496			1

Fonte: Elaborada pelo autor.

Após realizada a configuração do elemento em modo de manutenção, cujo status em *Alarm Text* é definido para *Network element under maintenance*, como ilustrado na Figura 20, é feita a modificação do canal EARFCN em todas as células 4G na frequência de 1800 MHz existentes em cada ERB. De acordo com [20], o canal EARFCN de *downlink* e *uplink*, respectivamente, é calculado conforme a seguir:

$$F_{DL} = F_{DL_low} + 0.1(N_{DL} - N_{offs-DL}). \quad (3)$$

$$F_{UL} = F_{UL_low} + 0.1(N_{UL} - N_{offs-UL}). \quad (4)$$

Onde:

- F_{DL} = Frequência central da portadora para *downlink*
- F_{DL_Low} = Menor frequência da banda de operação para *downlink*
- N_{DL} = Canal EARFCN para *downlink*
- N_{Offs_DL} = Offset utilizado para calcular o EARFCN para *downlink*
- F_{UL} = Frequência central da portadora para *uplink*
- F_{UL_Low} = Menor frequência da banda de operação para *uplink*
- N_{UL} = Canal EARFCN para *uplink*
- N_{Offs_UL} = Offset utilizado para calcular o EARFCN para *uplink*

A frequência central da portadora, de acordo com [37] é expressa da seguinte forma:

$$f_0 = \frac{f_1 + f_2}{2}. \quad (5)$$

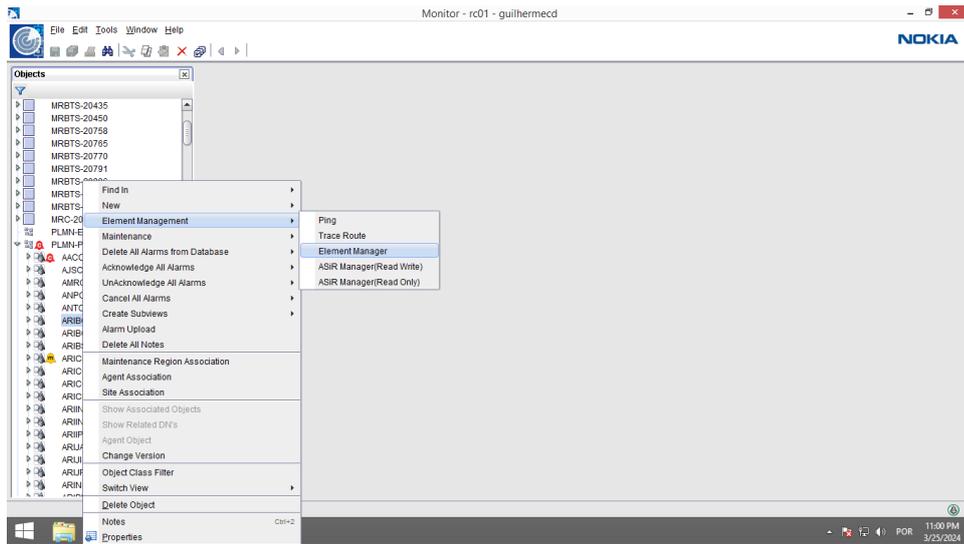
Onde:

- f_0 = Frequência central
- f_2 = Frequência superior
- f_1 = Frequência inferior

Levando em consideração que os blocos 7 e 8 da Tabela 9, após a desativação das células 2G na frequência de 1800 MHz ficaram livres, com a frequência inferior do bloco 7 e a frequência superior do bloco 10, para *downlink*, utilizando a Fórmula 5, obtêm-se o valor da frequência central da portadora para *downlink* de 1875 MHz. Utilizando a mesma fórmula, considerando como frequência inferior do bloco 7 e a frequência superior do bloco 10, para *uplink*, obtêm-se o valor de frequência central da portadora para *uplink* de 1780 MHz. Os valores de F_{DL_Low} , N_{Offs_DL} , F_{UL_Low} e N_{Offs_UL} são valores já pré-estabelecidos por [20] sendo, respectivamente, para a banda operacional E-UTRA 3, 1805 MHz, 1200, 1710 MHz e 19200. Atribuindo esses valores nas Fórmulas 3 e 4, obtêm-se os valores de EARFCN *dowlink* de 1900 e EARFCN *Uplink* de 19900.

Com os valores de EARFCN obtidos, para *downlink* e *uplink*, é realizada a configuração destes valores em cada uma das células constituintes de cada site na aplicação *Netact*. De forma geral, cada ERB possui 3 células 4G na frequência de 1800 MHz. Para acessar os parâmetros de cada estação, é necessário selecionar o host atribuído a ERB na árvore de objetos, através da opção *element manager*, como ilustrado na Figura 21

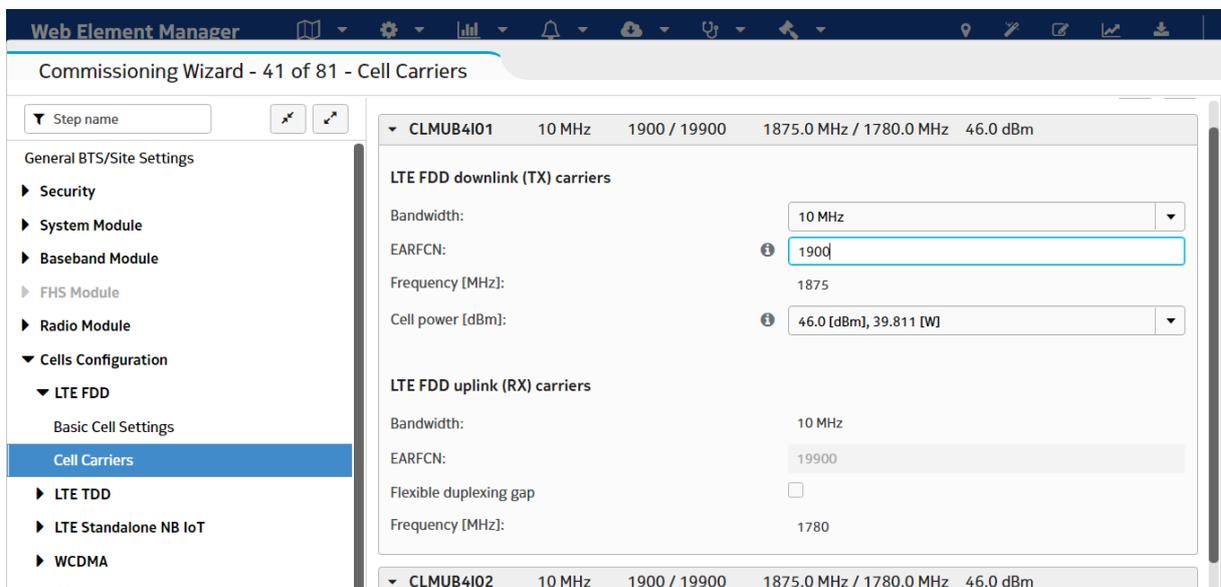
Figura 21 - Árvore de elementos OSS Nokia – Netact



Fonte: Elaborada pelo autor.

Feita a configuração dos canais EARFCN, é necessário realizar a validação das configurações realizadas, a fim de não encontrar nenhum tipo de erro para então, executar as modificações. Todo o processo leva em média 5 minutos. A Figura 22 ilustra o processo de mudança do parâmetro EARFCN nas células das ERBs:

Figura 22 - Configuração do EARFCN das células 4G 1800 MHz OSS Nokia – Netact



Fonte: Elaborada pelo autor.

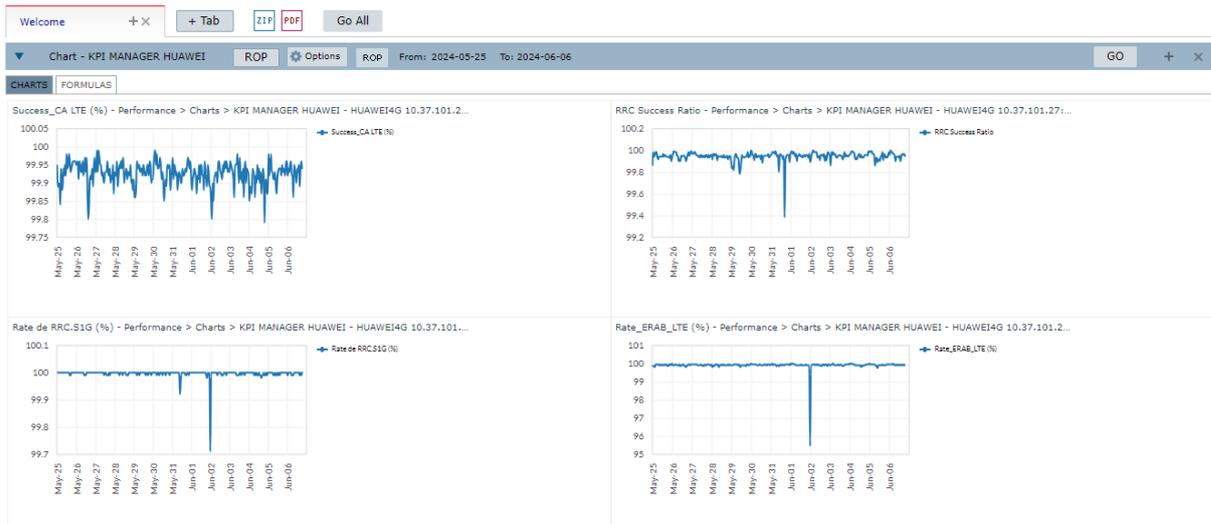
Após finalizada a alteração dos valores de EARFCN correspondentes a largura de banda de 10 MHz, como passo final, é necessário atualizar as configurações de resseleção das células

3G para o 4G. Estes ajustes se fazem necessários pois a resseleção entre 3G e 4G necessita do EARFCN atualizado. Por meio de *script*, contendo linhas de comando que são executadas diretamente na OSS Huawei, todas as células dos sites 3G vizinhos aos sites dentro do escopo *refarming* foram atualizadas com o novo EARFCN e removido o antigo. Por uma melhor parametrização da rede, as células 2G não tiveram seus parâmetros alterados, visto que se o usuário estiver em uma célula 2G, de forma preliminar, acontece a resseleção 2G para 3G e então, do 3G para o 4G. Os *scripts* utilizados para atualização do EARFCN nas células 3G encontram-se nos apêndices A, B, C e D deste trabalho.

3.4 Coleta dos Resultados

A execução do *refarming* foi feita de forma intercalada, em cada ERB e em cada cidade. O *Software* utilizado para realizar a coleta destas informações foi o *Netchart*, proprietário da empresa BWtech. Este *software* tem por finalidade apresentar de forma gráfica, todos os arquivos de *Performance Management* (PM), ou seja, todas as informações de desempenho de rede para todas as ERBs existentes. Dentro destas informações estão inclusas as métricas de desempenho analisadas neste trabalho, exceto a métrica de eficiência espectral, a qual será obtida por meio do cálculo explicado na seção 3.2.2, através das informações de *throughput downlink e uplink* coletadas. Estes arquivos são enviados de forma periódica pelas OSSs de cada fabricante, e manipulados pelo *Netchart* de maneira que seja fácil e intuitiva a visualização destas informações pelo analista, conforme ilustrado na Figura 23:

Figura 23 - Plataforma Netchart



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5 Considerações Finais

Este capítulo teve por finalidade detalhar os procedimentos necessários para a execução do *refarming*, descrever o cenário das ERBs e localidades envolvidas bem como apresentar as principais métricas de desempenho.

O próximo capítulo analisará de forma quantitativa e qualitativa, as métricas de desempenho obtidas com a execução do *refarming*.

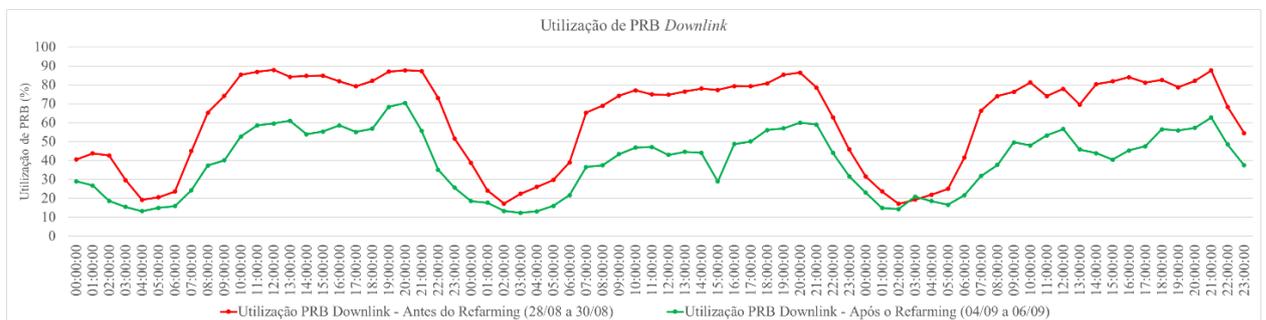
4 Resultados e Discussões

Os resultados provenientes do *refarming* executado nas quatro localidades são apresentados neste capítulo bem como as métricas apresentadas na seção 3.2. Foi definido o padrão de análise das métricas para cada cidade e ERB, de 144 amostras por gráfico, sendo 72 amostras (equivalente a três dias) na semana anterior ao *refarming* e 72 amostras na semana posterior ao *refarming*. Cada amostra foi coletada no intervalo de tempo de uma hora. Para obter o melhor cenário de comparação antes e após o *refarming*, foram utilizados os mesmos dias da semana espaçados em um intervalo de uma semana, entre as amostras observadas antes e após o *refarming*.

4.1 Cidade A

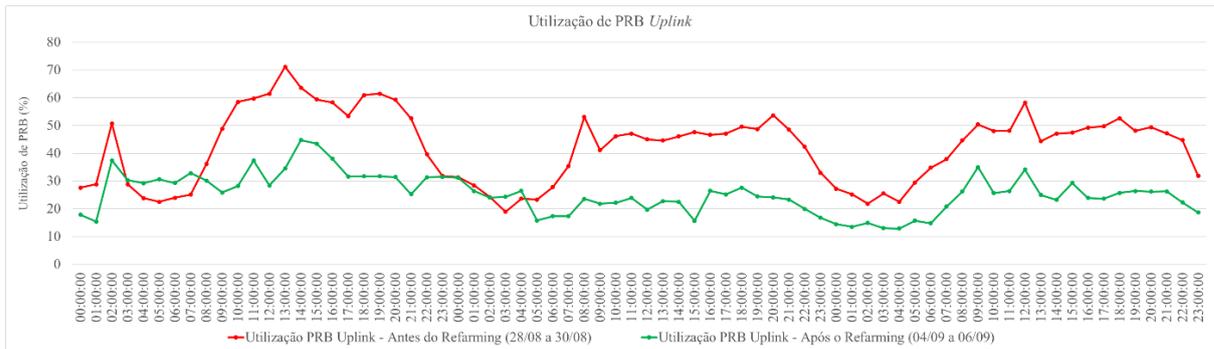
A seguir, encontram-se os resultados das métricas de desempenho coletados para a Cidade A. O intervalo de coleta utilizado foi dos dias 28/08 a 30/08, intervalo anterior a execução do *refarming* e dos dias 04/09 a 06/09, intervalo posterior a execução do *refarming*. O *refarming* da Cidade A foi executado no dia 01/09/2022.

Figura 24 - Utilização de PRB *Downlink* – Cidade A



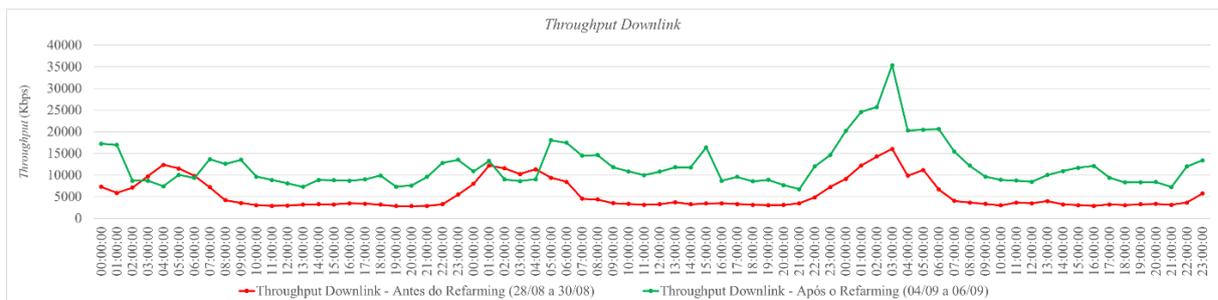
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 24, encontram-se os valores de utilização de PRB *downlink*. É nítido a redução da utilização de PRB com decréscimo da média de utilização geral de PRB, em termos percentuais, de 36,73%. A redução do uso de PRB é esperada conforme explicado na seção 3.2.3.

Figura 25 - Uso de PRB *Uplink* – Cidade A

Fonte: Elaborada pelo autor.

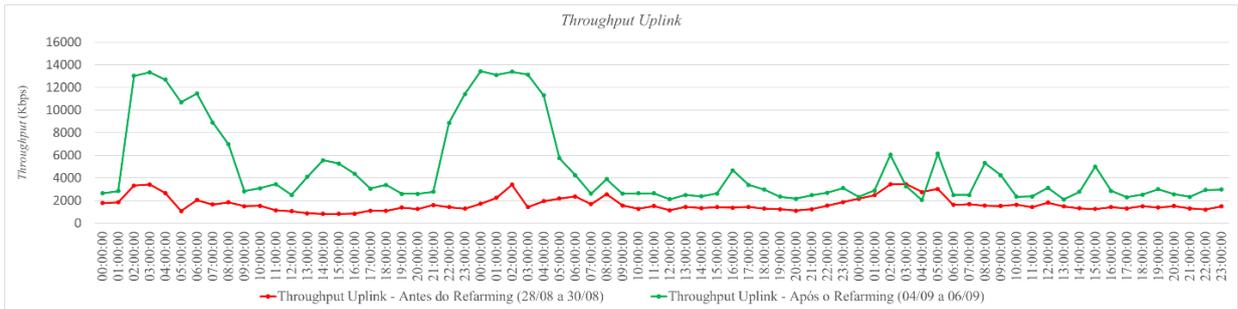
Na Figura 25, encontram-se os valores do uso de PRB *uplink*. De modo semelhante ao *downlink*, após a realização do *refarming*, a utilização de PRB *uplink* sofreu decréscimo da média geral, em termos percentuais, de 39,95%.

Figura 26 - *Throughput Downlink* – Cidade A

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 26, encontram-se os valores de *throughput downlink*. Após a realização do *refarming*, os valores de *throughput* sofreram um aumento da média geral, em termos percentuais, de 116,46%.

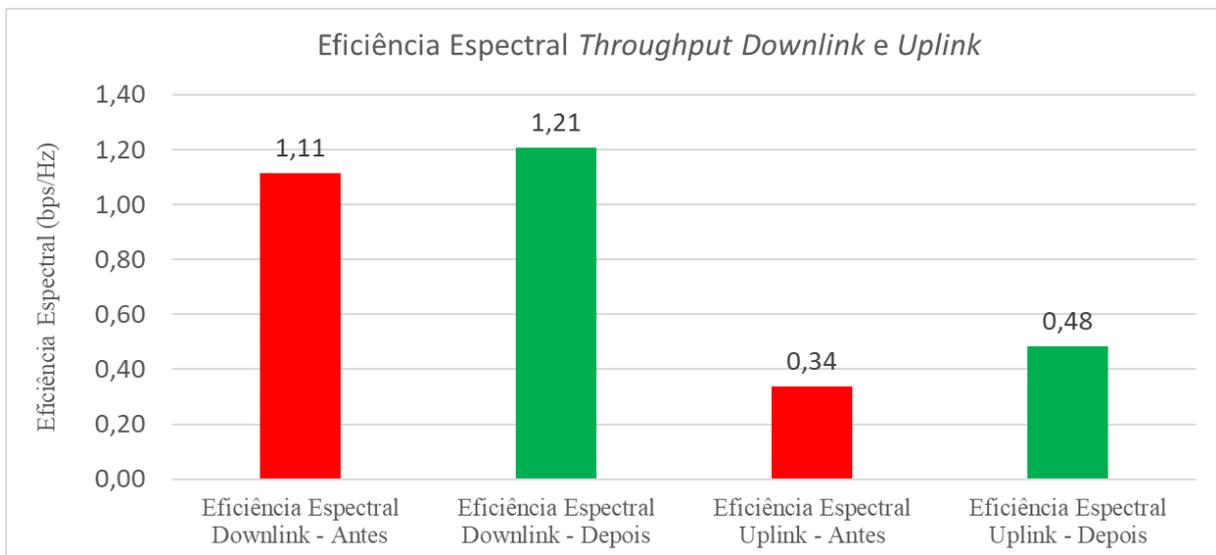
Figura 27 - *Throughput Uplink* – Cidade A



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 27, encontram-se os valores de *throughput uplink*. Após a realização do *refarming*, os valores de *throughput* sofreram um aumento da média geral, em termos percentuais, de 185,58%.

Figura 28 - Eficiência Espectral *Downlink* e *Uplink* – Cidade A



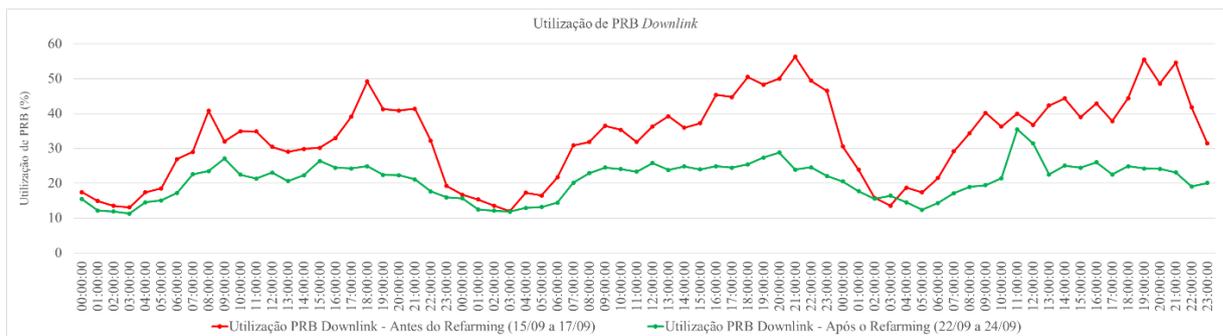
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 28, encontram-se os valores referentes a média aritmética da métrica de eficiência espectral de *throughput downlink* e *uplink*. Para o *throughput downlink*, a eficiência espectral apresentou um acréscimo, em termos percentuais, de 9,01% enquanto para *uplink*, apresentou um acréscimo de 41,18%.

4.2 Cidade B

A seguir, encontram-se os resultados das métricas de desempenho coletados para a Cidade B. O intervalo de coleta utilizado foi dos dias 15/09 a 17/09, intervalo anterior a execução do *refarming* e dos dias 22/09 a 24/09, intervalo posterior a execução do *refarming*. O *refarming* da Cidade A foi executado no dia 20/09/2022.

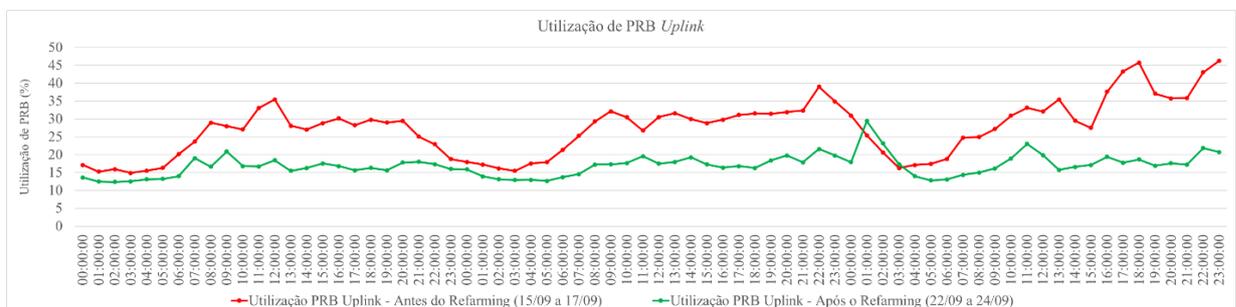
Figura 29 - Uso de PRB *Downlink* – Cidade B



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 29, encontram-se os valores para a métrica utilização de PRB *downlink*. Em termos de média geral de uso, após a realização do *refarming*, a utilização de PRB sofreu um decréscimo de 36,73%.

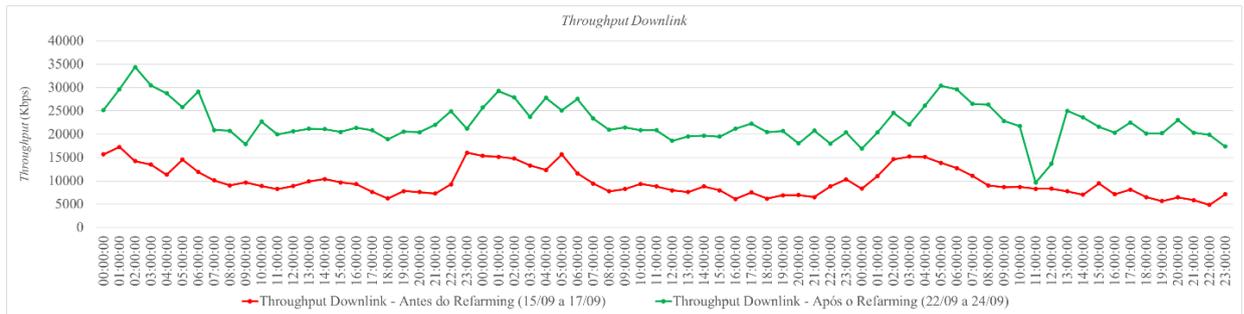
Figura 30 - Uso de PRB *Uplink* – Cidade B



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 30, encontram-se os valores para a métrica utilização de PRB *uplink*. Em termos de média geral de uso, após a realização do *refarming*, a utilização de PRB *uplink* sofreu um decréscimo de 38,33%.

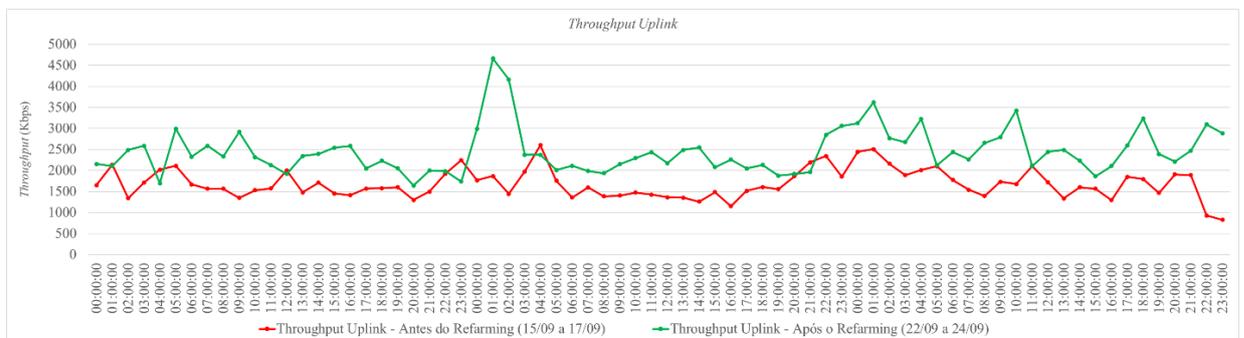
Figura 31 - *Throughput downlink* - Cidade B



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 31, encontram-se os valores para a métrica *throughput downlink*. Em termos de média geral de uso, após a realização do *refarming*, o *throughput downlink* sofreu um acréscimo de 128,26%.

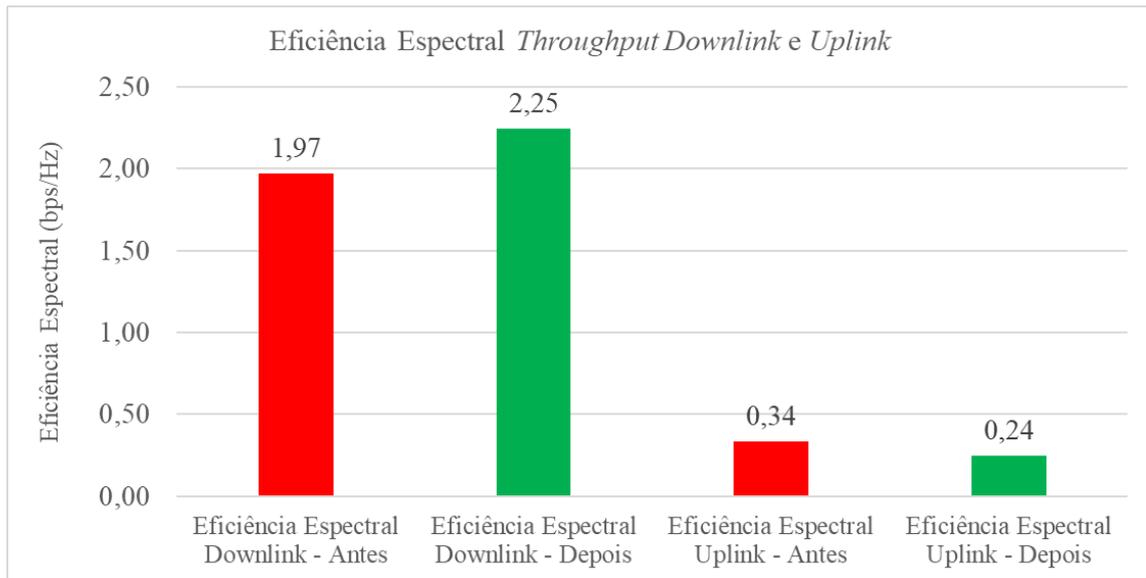
Figura 32 - *Throughput uplink* - Cidade B



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 32, encontram-se os valores para a métrica *throughput uplink*. Em termos de média geral de uso, após a realização do *refarming*, o *throughput uplink* sofreu um acréscimo de 45,49%.

Figura 33 - Eficiência Espectral *Downlink* e *Uplink* - Cidade B

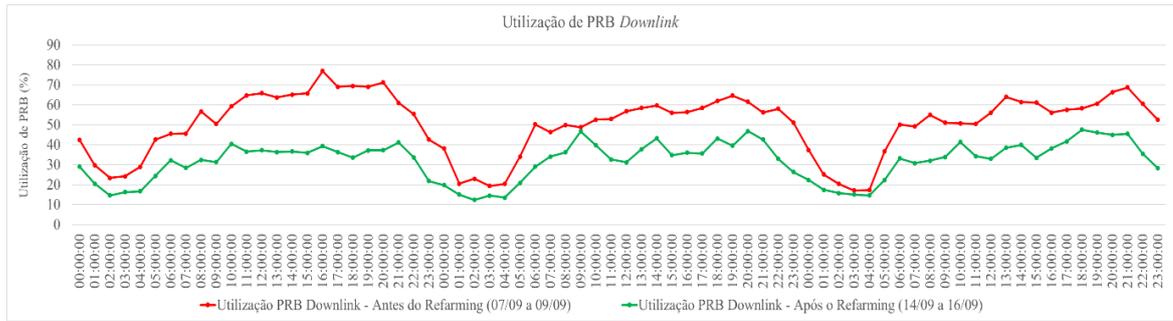


Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 33, encontram-se os valores referentes a média aritmética da métrica de eficiência espectral de *throughput downlink* e *uplink*. Para o *throughput downlink*, a eficiência espectral apresentou um acréscimo, em termos percentuais, de 14,13% enquanto para *uplink*, apresentou um decréscimo de 27,26%.

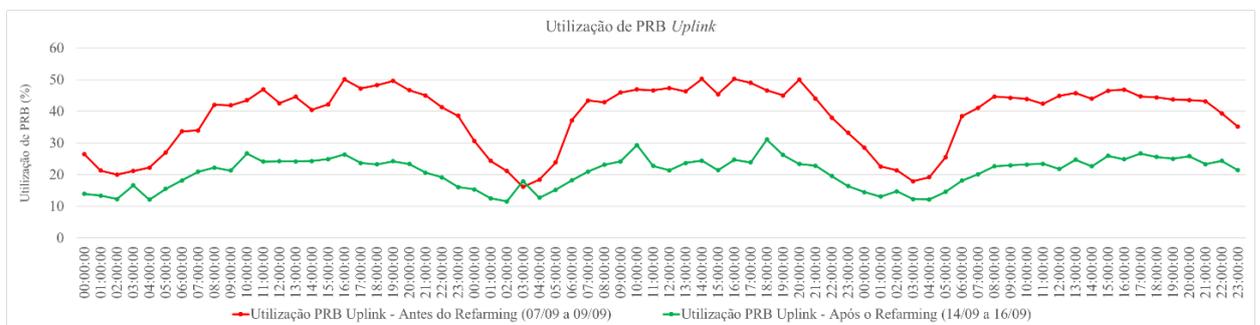
4.3 Cidade C

A seguir, encontram-se os resultados das métricas de desempenho coletados para a Cidade C. O intervalo de coleta utilizado foi dos dias 07/09 a 09/09, intervalo anterior a execução do *refarming* e dos dias 14/09 a 16/09, intervalo posterior a execução do *refarming*. O *refarming* da Cidade A foi executado no dia 13/09/2022.

Figura 34 - Uso de PRB *Downlink* - Cidade C

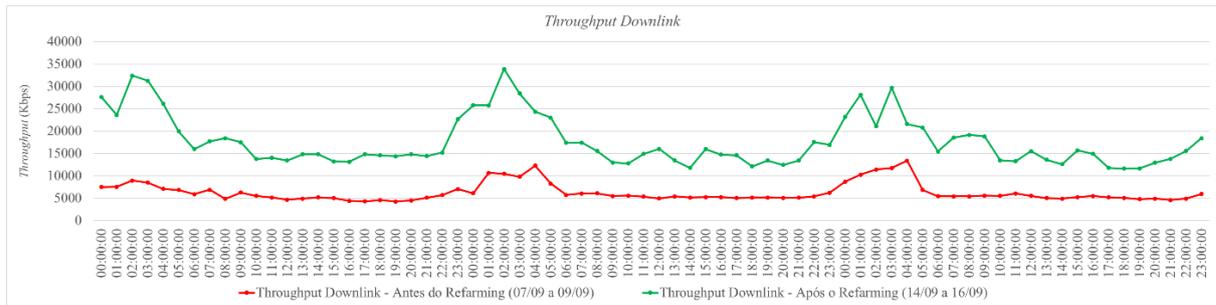
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 34, encontram-se os valores para a métrica utilização de PRB *downlink*. Em termos de média geral de uso, após a realização do *refarming*, a utilização de PRB sofreu um decréscimo de 36,55%.

Figura 35 - Uso de PRB *Uplink* - Cidade C

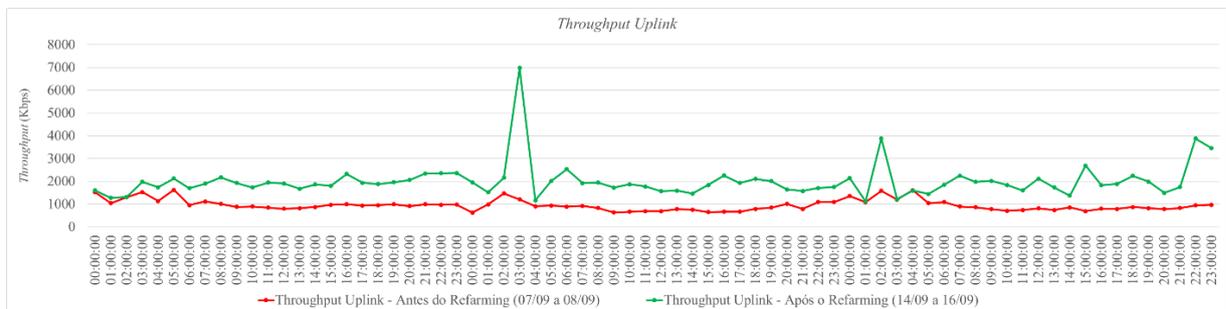
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 35, encontram-se os valores para a métrica utilização de PRB *uplink*. Em termos de média geral de uso, após a realização do *refarming*, a utilização de PRB sofreu um decréscimo de 45,87%.

Figura 36 - *Throughput Downlink* - Cidade C

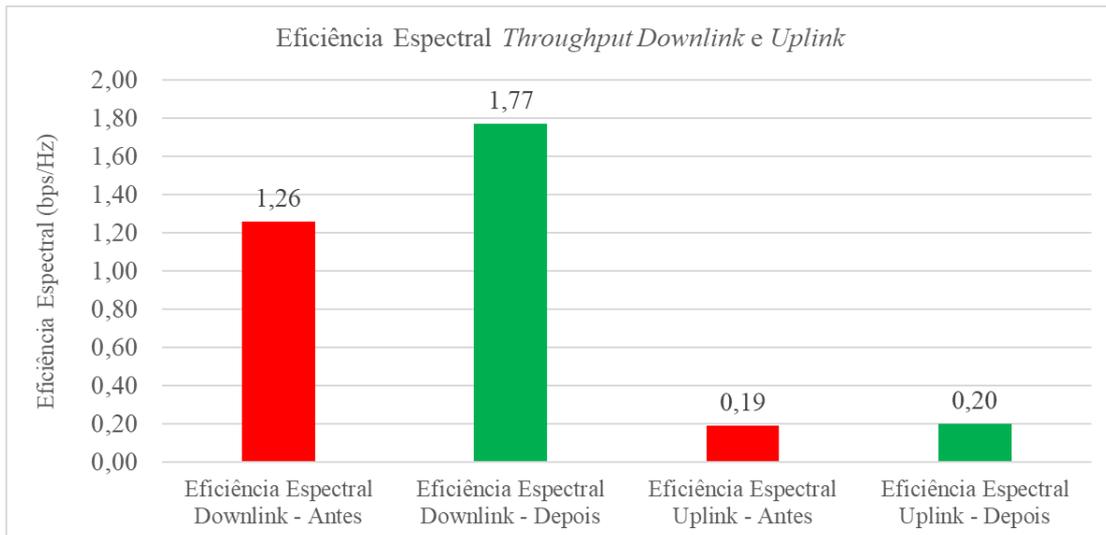
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 36, encontram-se os valores para a métrica *throughput downlink*. Em termos de média geral de uso, após a realização do *refarming*, o *throughput downlink* sofreu um acréscimo de 181,32%.

Figura 37 - *Throughput Uplink* - Cidade C

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 37, encontram-se os valores para a métrica *throughput uplink*. Em termos de média geral de uso, após a realização do *refarming*, o *throughput uplink* sofreu um acréscimo de 110,14%.

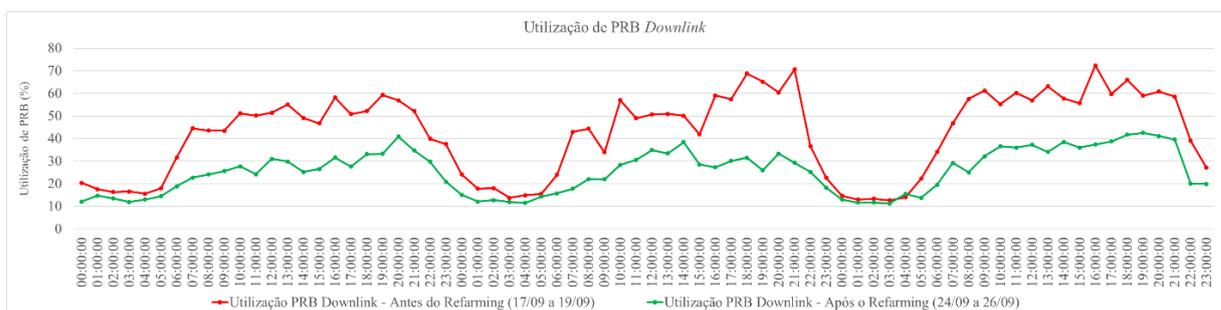
Figura 38 - Eficiência Espectral *Downlink* e *Uplink* - Cidade C

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 38, encontram-se os valores referentes a média aritmética da métrica de eficiência espectral de *throughput downlink* e *uplink*. Para o *throughput downlink*, a eficiência espectral apresentou um acréscimo, em termos percentuais, de 40,34% enquanto para *uplink*, apresentou um acréscimo de 5,07%.

4.4 Cidade D

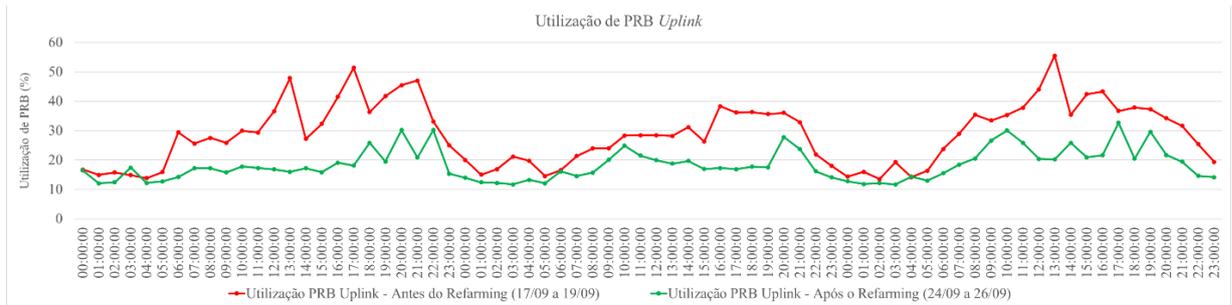
A seguir, encontram-se os resultados das métricas de desempenho coletados para a Cidade D. O intervalo de coleta utilizado foi dos dias 17/09 a 19/09, intervalo anterior a execução do *refarming* e dos dias 24/09 a 26/09, intervalo posterior a execução do *refarming*. O *refarming* da Cidade A foi executado no dia 20/09/2022.

Figura 39 - Uso de PRB *Downlink* - Cidade D

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 39, encontram-se os valores para a métrica utilização de PRB *downlink*. Em termos de média geral de uso, após a realização do *refarming*, a utilização de PRB sofreu um decréscimo de 39,60%.

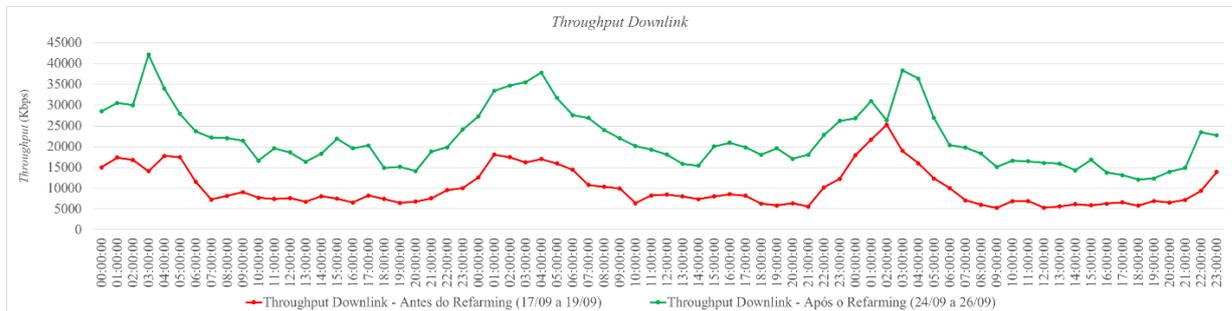
Figura 40 - Uso de PRB *Uplink* - Cidade D



Fonte: Elaborada pelo autor.

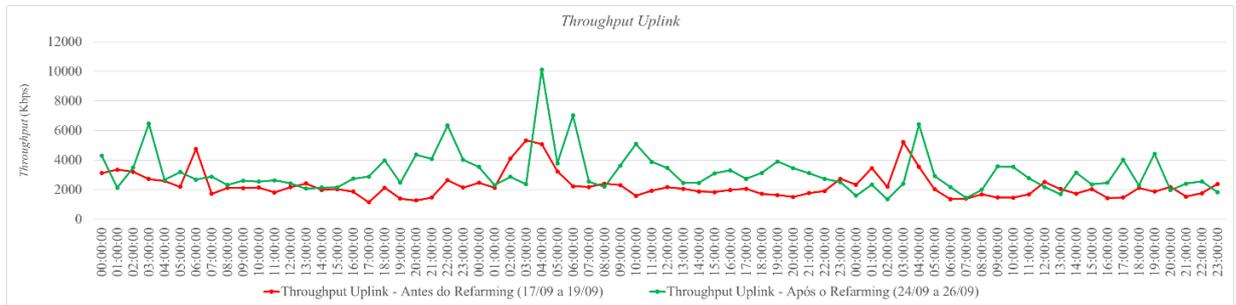
Na Figura 40, encontram-se os valores para a métrica utilização de PRB *uplink*. Em termos de média geral de uso, após a realização do *refarming*, a utilização de PRB sofreu um decréscimo de 36,53%.

Figura 41 - *Throughput Downlink* - Cidade D



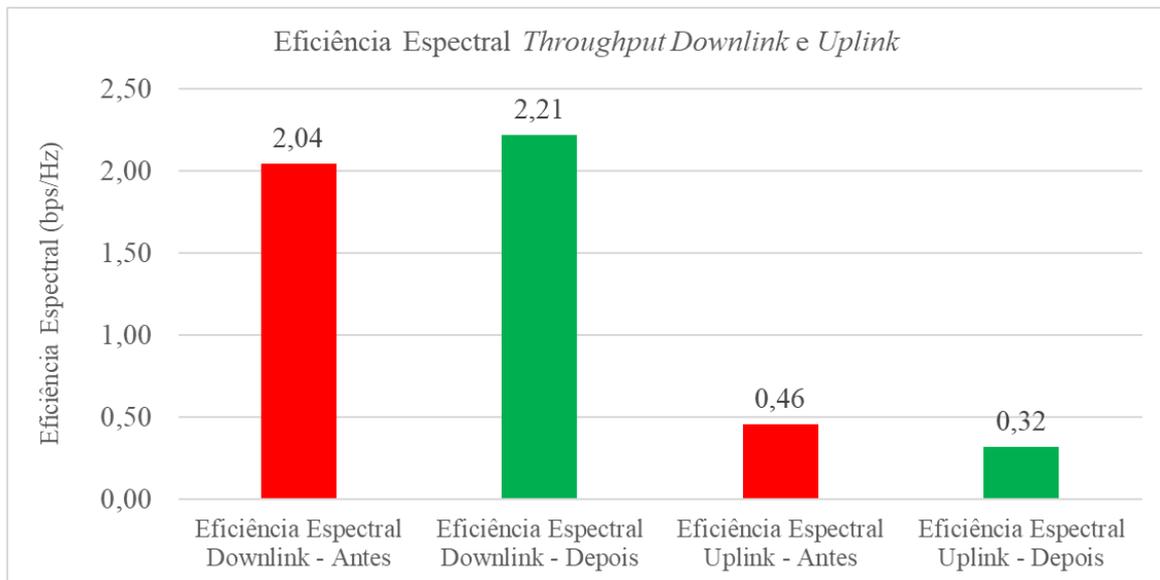
Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 41, encontram-se os valores para a métrica *throughput downlink*. Em termos de média geral de uso, após a realização do *refarming*, os valores de *throughput downlink* sofreram um acréscimo de 116,95%.

Figura 42 - *Throughput Uplink* - Cidade D

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 42, encontram-se os valores para a métrica *throughput uplink*. Em termos de média geral de uso, após a realização do *refarming*, os valores de *throughput uplink* sofreram um acréscimo de 38,74%.

Figura 43 - Eficiência Espectral *Downlink* e *Uplink* - Cidade D

Fonte: Elaborada pelo autor.

Na Figura 43, encontram-se os valores referentes a média aritmética da métrica de eficiência espectral de *throughput downlink* e *uplink*. Para o *throughput downlink*, a eficiência espectral apresentou um acréscimo, em termos percentuais, de 8,47% enquanto para *uplink*, apresentou um decréscimo de 30,63%.

4.5 Análise Geral dos Resultados

Para melhor compreensão e visão geral dos resultados, a Tabela 13 apresenta de forma sumarizada, os respectivos valores das métricas de desempenho: uso de PRB e *throughput downlink* e *uplink* obtidas após a execução do *refarming*:

Tabela 13 - Visão geral das métricas de desempenho pós *refarming*

Localidades	Métricas de Desempenho – Pós <i>Refarming</i>			
	Uso de PRB <i>Downlink</i>	Uso de PRB <i>Uplink</i>	<i>Throughput</i> <i>Downlink</i>	<i>Throughput</i> <i>Uplink</i>
Cidade A	-36,73%	-39,95%	116,46%	185,58%
Cidade B	-36,73%	-38,33%	128,26%	45,49%
Cidade C	-36,55%	-45,87%	181,32%	110,14%
Cidade D	-39,60%	-36,53%	116,95%	38,74%

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como apresentado na seção 3.2.3, era esperado o decréscimo dos valores de utilização das métricas de uso de PRB *downlink* e *uplink*, devido ao aumento do número de PRBs causado pela duplicação da largura de banda das portadoras das frequências de 1800 MHz. As 4 cidades apresentaram reduções semelhantes, destacando-se a cidade D, pelo maior decréscimo no uso de PRB *downlink* e a cidade C, pelo maior decréscimo no uso de PRB *uplink*. Para as métricas de desempenho de *throughput downlink* e *uplink*, como apresentado pela Fórmula 2, levando em consideração que a relação sinal-ruído manteve-se constante, visto que a potência de transmissão não foi modificada, com o aumento da largura de banda ocasionado pelo *refarming*, a capacidade de transmissão de cada ERB sofreu um aumento expressivo, ocasionando uma melhora significativa dos valores de *throughput* e, conseqüentemente, uma melhor experiência de navegação para os usuários. A cidade C apresentou o maior acréscimo para *throughput downlink* enquanto a Cidade A, o maior acréscimo *throughput uplink*.

Para a métrica de eficiência espectral, os valores obtidos para as 4 localidades são mostrados na Tabela 14:

Tabela 14 - Comparativo média aritmética eficiência espectral antes e após *refarming*

Eficiência Espectral – Comparativo antes e após <i>Refarming</i>				
Localidade	<i>Throughput Downlink</i> Antes (bps/Hz)	<i>Throughput Downlink</i> Após (bps/Hz)	<i>Throughput Uplink</i> Antes (bps/Hz)	<i>Throughput Uplink</i> Após (bps/Hz)
Cidade A	1,11	1,21	0,34	0,48
Cidade B	1,97	2,25	0,34	0,24
Cidade C	1,26	1,77	0,19	0,20
Cidade D	2,04	2,21	0,46	0,32

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como pode ser observado na Tabela 14, para o *throughput downlink*, os valores de eficiência espectral foram superiores em todas as 4 cidades, o que era esperado tendo em vista o aumento significativo da média de *throughput downlink*. Analisando a eficiência espectral para o *throughput uplink*, com exceção da localidade A e C, nas 2 localidades restantes a eficiência espectral diminuiu. Conforme explicado na seção 3.2.2, levando em consideração que o aumento no denominador (largura de banda) utilizado no cálculo da eficiência espectral foi superior aos valores de elevação do numerador (*throughput uplink*), conforme observado nos gráficos para as duas cidades, numericamente, a eficiência espectral diminuiu. Nas cidades A e C, houve amostras em determinados horários que foram significativamente maiores quando se comparado em relação a largura de banda anterior, o que teve impacto para o valor superior de eficiência espectral. Entretanto, apesar do valor menor de eficiência, em todas as cidades os valores de *throughput uplink* foram maiores aos valores anteriores ao *refarming*, o que em termos práticos, resulta em uma melhor experiência de navegação ao usuário.

4.6 Considerações Finais

Este capítulo teve por finalidade apresentar todos os resultados provenientes da execução do *refarming* através das métricas de desempenho. Analisando os resultados, observou-se que nas 4 localidades, houve um decréscimo significativo dos níveis de utilização de PRB tanto para *downlink* como para *uplink* destacando-se as Cidade D, com a maior redução no sentido *downlink* e a cidade C, no sentido *uplink*. Para o *throughput*, de forma análoga, em todas os 4 cenários houve acréscimos, destacando-se a Cidade C e A, com os maiores índices de *throughput downlink* e *uplink*, respectivamente. Para a métrica eficiência espectral, em todos os cenários de execuções a eficiência foi superior quando se comparado antes ao *refarming*.

Apesar das Cidades B e D apresentarem redução da eficiência, conforme explicado na seção 4.5, em termos práticos, para o usuário final, a experiência de uso foi superior após a execução do *refarming*.

Sendo assim, mostra-se que o *refarming* otimizou a utilização dos recursos da rede, com a redução do uso de PRBs além de aumentar a capacidade da rede 4G, que teve como consequência a melhora da experiência de uso para os usuários.

Apresentado e discutido os resultados, o próximo capítulo contém a conclusão deste trabalho bem como sugestões de possíveis trabalhos futuros relacionados ao tema.

5 Conclusão

Este trabalho propõe analisar os ganhos obtidos nas métricas de desempenho analisadas a partir da execução do *refarming* em uma rede celular existente. Através do entendimento do cenário de radiofrequências vigente no Brasil, regulado pela ANATEL, foi constatado a existência de um número considerável de ERBs licenciadas para as tecnologias legadas, o que evidencia que ainda é pertinente para as operadoras, um plano eficiente de gestão de espectro para as redes 4G.

Conforme demonstrado nos resultados e discussões, em todas as cidades observadas, houve decréscimo dos indicadores de uso de PRB, com os valores de média aritmética bem similares nos 4 cenários. Neste quesito, destaca-se a cidade A, conforme observado nos gráficos, as amostras de PRB *downlink* em determinado momento (*antes do refarming*) atingiram valores superiores a 80%, implicando em perda de qualidade e eminente esgotamento de recursos para os usuários. Para a métrica de *throughput*, de forma similar, nas 4 cidades os valores após a execução do *refarming* foram superiores quando comparados com os valores anteriores a execução. De forma análoga, destaca-se a cidade C, com o maior acréscimo nos valores de *throughput downlink*, implicado em melhor experiência de navegação para o usuário.

Desta forma, o *refarming* demonstrou-se ser uma viável e eficiente técnica de otimização celular, tendo em vista o caráter de escassez do espectro e a eminente coexistência dos sistemas 4G com as redes legadas.

Como trabalho futuro, dando continuidade ao *refarming* das faixas de frequência ociosas, sugere-se o estudo e viabilidade desta técnica para os cenários de outras frequências, como a faixa 2100 MHz, que atualmente, é a faixa mais utilizada nas ERBs 3G.

Referências

- [1] GOLDSMITH, Andrea. **Wireless Communications**. Cambridge University Press, 2005.
- [2] ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. **ANATEL homologa resultado do leilão 5G**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/anatel-homologa-resultado-do-leilao-do-5g>>. Acesso em: 29 jul. 2023.
- [3] Ministério da Economia. **Maior leilão da história das telecomunicações do Brasil, 5G garante R\$ 47,2 bilhões em investimentos**. Disponível em: <<https://www.gov.br/economia/pt-br/assuntos/noticias/2021/novembro/maior-leilao-da-historia-das-telecomunicacoes-do-brasil-5g-garante-r-47-2-bilhoes-em-investimentos>> . Acesso em: 30 jul.2023.
- [4] GSMA. **The mobile economy 2023**. Disponível em < <https://www.gsma.com/solutions-and-impact/connectivity-for-good/mobile-economy/wp-content/uploads/2023/03/270223-The-Mobile-Economy-2023.pdf> >. Acesso em: 26 nov.2023.
- [5] RAPPAPORT, Theodore S. **Wireless Communications: Principles and Pratices**. 2nd. ed. Prentice Hall, 2002.
- [6] LEE, William C.Y. **Wireless and cellular telecommunications**. 3rd ed. Mcgraw-Hill, 2006.
- [7] COX, Christopher. **An introduction to LTE: LTE, LTE-advanced, SAE, VoLTE and 4G mobile communication systems**. 2nd. ed. Wiley, 2014.
- [8] GTA/UFRJ – Grupo de Teleinformática e Automação. **UMTS, HSDPA, HSUPA e LTE**. Disponível em: <[https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/marden/HSDPA\(HighSpeedDownlinkPacketAccess\).html](https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel879/trabalhos_vf_2008_2/marden/HSDPA(HighSpeedDownlinkPacketAccess).html)>. Acesso em: 26 nov.2023.
- [9] HOLMA, Harri.; TOSKALA, Antti.; NAKAMURA, Takehiro. **5G Technology: 3GPP New Radio**. Wiley, 2020.
- [10] 3GPP – 3rd Generation Partnership Project. **3GPP TR 21.915 V15.0.0: Technical Specification Group Services and System Aspects: Release 15 description**. 3GPP, 2019.
- [11] Summit Ridge Group. **The Spectrum Handbook 2018**. Disponível em <<https://summitridgegroup.com/wp-content/uploads/Spectrum-Handbook-2018.pdf>>. Acesso em: 30 nov. 2023.
- [12] TRONCO, T. R.; AVILA, L. F. **Fundamentos de Comunicações Ópticas**. 1. ed. UNICAMP, 2007.
- [13] ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. **Plano de Uso do Espectro de Radiofrequências no Brasil**. Disponível em <<https://sistemas.anatel.gov.br/anexarapi/publico/anexos/download/81b4ddd8ca406093d50ba9f305d9865>>. Acesso em 01 dez. 2023.

- [14] A.H. Systems, inc. **Frequency Banda Designations**. Disponível em: <<https://www.ahsystems.com/notes/frequency%20band%20designations.php>>. Acesso em: 01 dez.2023.
- [15] IFSC – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia. **Radiotransmissão**. Disponível em: <<https://wiki.sj.ifsc.edu.br/images/0/09/EspectroRDT1.pdf>>. Acesso em: 05 dez.2023.
- [16] 3GPP – 3rd Generation Partnership Project. **3GPP TS 45.005 V13.1.0**: Technical Specification Group GSM/EDGE Radio Access Network: Radio transmission and reception (Release 13). 3GPP, 2016.
- [17] LIN, Xingqin.; VISWANATHAN, Harish. Dynamic Spectrum Refarming with Overlay for Legacy Devices. **IEEE Transactions on Wireless Communications**. [S.I], v. 12, n. 10, pp. 5282-5293, out. 2013.
- [18] Mosaico. **Emissões**. Disponível em: <https://sistemas.anatel.gov.br/se/public/view/b/licenciamento.php_>. Acessado em: 21 jan. 2024.
- [19] 3GPP – 3rd Generation Partnership Project. **3GPP TS 25.101 V17.0.0**: Technical Specification Group Radio Access Network: User Equipment (UE) radio transmission and reception (FDD) (Release 17). 3GPP, 2012.
- [20] 3GPP – 3rd Generation Partnership Project. **3GPP TS 36.101 V18.4.0**: Technical Specification Group Radio Access Network: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): User Equipment (UE) radio transmission and reception (Release 18). 3GPP, 2023.
- [21] ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações. **Estações do SMP**. Disponível em: <<https://informacoes.anatel.gov.br/paineis/outorga-e-licenciamento/estacoes-do-smp>>. Acesso em: 30 maio. 2024.
- [22] 3GPP – 3rd Generation Partnership Project. **3GPP TS 38.104 V18.4.0**: Technical Specification Group Radio Access Network: NR: Base Station (BS) radio transmission and reception (Release 18). 3GPP, 2023.
- [23] MARIYAM, P. D.; ANGGRAINI, V. G.; ALIFIAWAN, A.; APRIONO, C. Refarming Performance Analysis of Mobile Broadband System in Indonesia. **IEEE International Conference on Industry 4.0 Artificial Intelligence, and Communications Technology (IAICT)**. [S.I], pp. 157-161, 2020.
- [24] ROSALINA, Arjani.; FAHMI, Arfianto.; MUNADI, Rendy. Coexistence LTE with GSM and UMTS: Performance Analysis using SEAMCAT Simulation. **IEEE International Conference on Communications, Networks and Satellite (COMNETSAT)**. [S.I], pp. 68-73, 2015.
- [25] HAN, Shiyong.; LIANG, Y. C.; SOONG, B. H. Spectrum Refarming: A New Paradigm of Spectrum Sharing for Cellular Networks. **IEEE Transactions on Communications**. [S.I], v. 63, n. 15, pp. 1895-1906, mai. 2015.

- [26] Teleco. **Banda para Telefonia Celular: Bandas de 900, 1800, 1900 e 2100 MHz.** Disponível em: <https://www.teleco.com.br/tutoriais/tutorialbandcel/pagina_5.asp>. Acesso em: 10 jan. 2024.
- [27] Teleco. **Frequências de Celular: 1700 MHz e 1800 MHz.** Disponível em: https://www.teleco.com.br/3g_freq.asp. Acesso em: 22 jan. 2024.
- [28] Tudo Celular. **TIM começa a implementar rede 4G na faixa de 1800 MHz.** Disponível em: <<https://www.tudocelular.com/planos/noticias/n48613/tim-4g-1800-buzios.html>>. Acesso em: 22 jan. 2024.
- [29] Tiinside. **Tráfego de dados móveis aumentou quase 300 vezes em 10 anos, segundo a Ericsson.** Disponível em: <[https://tiinside.com.br/30/11/2021/trafego-de-dados-moveis-aumentou-quase-300-vezes-em-10-anos-segundo-a-ericsson/#:~:text=O%20tr%C3%A1fego%20de%20dados%20da,Fixo%20Sem%20Fio%20\(FWA\)](https://tiinside.com.br/30/11/2021/trafego-de-dados-moveis-aumentou-quase-300-vezes-em-10-anos-segundo-a-ericsson/#:~:text=O%20tr%C3%A1fego%20de%20dados%20da,Fixo%20Sem%20Fio%20(FWA))>. Acesso em: 23 jan. 2024.
- [30] Jornal Z norte. **TIM realiza ação especial em Sorocaba e Votorantim para divulgar cobertura 4G.** Disponível em: <<https://jornalznorte.com.br/sorocaba/tim-realiza-acao-especial-em-sorocaba-e-votorantim-para-divulgar-cobertura-4g>>. Acesso em: 23 jan. 2024.
- [31] Tele.Síntese. **Anatel fará grandes refarmings das bandas A, B, D, E, usadas pelo 3G do celular.** Disponível em: <<https://telesintese.com.br/anatel-fara-grandes-refarmings-das-bandas-a-b-d-e-usadas-pelo-3g-do-celular/>>. Acesso em: 25 jan. 2024.
- [32] NUNOO, Solomon.; ALHASSAN, Musah. Re-Farming of Existing 1800 MHz GSM Spectrum for LTE/LTE-A Deployment in Ghana. **Ghana Journal of Technology**. Gana, v. 3, n. 2, pp. 1-8, 2019.
- [33] BRASIL. Decreto Nº 6.654, de 20 de novembro de 2008. Aprova o Plano Geral de Outorgas de Serviço de Telecomunicações prestado no regime público. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 21 nov. 2008. Disponível em: <<https://legislacao.presidencia.gov.br/atos/?tipo=DEC&numero=6654&ano=2008&ato=831gXVU50dVpWT885>>. Acesso em: 30 jan. 2024.
- [34] Teleco. **Frequências de celular: 850 MHz e 900 MHz.** Disponível em: <<https://www.teleco.com.br/Bandac.asp>>. Acesso em: 30 jan. 2024.
- [35] ETSI – European Telecommunications Standards Institute. **ETSI TS 136 211 V17.1.0: LTE: Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 17.1.0 Release 17).** ETSI, 2022.
- [36] LIBERG, O.; SUNDBERG, M.; WANG, Y. P. E.; BERGMAN, J.; SACHS, J.; WIKSTRÖM, G. **Cellular Internet of Things: From Massive Deployments to critical 5G Applications.** 2nd. Ed. Elsevier, 2020.
- [37] SORRENTINO, Roberto.; BIANCHI, Giovanni. **Microwave and RF Engineering.** Wiley, 2020.


```
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
```

```
\\Células ERB 3G_1 (850 MHz)
```

```
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
```

```
\\Células ERB 3G_2 (2100 MHz)
```

```
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
```

```
\\Células ERB 3G_2 (850 MHz)
```

```
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
```

```
\\Criação das novas células 4G para resseleção 3G<>4G com BW 10MHz e ajuste de parâmetros de prioridade
```

```
\\Células ERB 3G_1 (2100 MHz)
```

```
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
```

```
\\Células ERB 3G_1 (850 MHz)
```

```
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
```

```
\\Células ERB 3G_2 (2100 MHz)
```

```
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
```

```
\\Células ERB 3G_2 (850 MHz)
```


Apêndice B - *script* células 3G Cidade B

Informação da ERB B

Estação	Cell Name	Frequ	LAC/TAC	CELLID	PCI	Canais (UL/DL)
ERB B	XXX01	1800	XXXXX	7xx-3x-XXXXX-XXXXXXX	X	1925 ~-> 1900
ERB B	XXX02	1800	XXXXX	7xx-3x-XXXXX-XXXXXXX	X	1925 ~-> 1900
ERB B	XXX03	1800	XXXXX	7xx-3x-XXXXX-XXXXXXX	X	1925 ~-> 1900

\\Verifica a versão de software da nodeB, para R9

LST UNODEB:LSTTYPE=ByNodeBid,NODEBID=XXX; (ERB 3G_1)

MOD UNODEB:IDTYPE=BYID,NODEBID=XXX,NODEBPROTCLVER=R9; (ERB 3G_1)

CÉLULA	FREQ.	TEC.	CGI	ERB 3G_1
XXXXXX01	2100	3G	7xx-3x-XXXXX-XXXXXXX	
XXXXXX02	2100	3G	7xx-3x-XXXXX-XXXXXXX	
XXXXXX03	2100	3G	7xx-3x-XXXXX-XXXXXXX	
XXXXXX04	2100	3G	7xx-3x-XXXXX-XXXXXXX	
XXXXXX05	2100	3G	7xx-3x-XXXXX-XXXXXXX	
XXXXXX06	2100	3G	7xx-3x-XXXXX-XXXXXXX	

\\Cria as celulas vizinhas 4G

MOD ULTECELL:LTECELLINDEX=XX,LTECELLNAME="XXX01",EUTRANCELLID=XXXXXXX,MCC="7xx",MNC="3x",TAC=XXXXX,CNOPGRPINDEX=0,CELLPHYID=X,LTEBAND=3,LTEARFCN=1900;

MOD ULTECELL:LTECELLINDEX=XX,LTECELLNAME="XXX02",EUTRANCELLID=XXXXXXX,MCC="7xx",MNC="3x",TAC=XXXXX,CNOPGRPINDEX=0,CELLPHYID=X,LTEBAND=3,LTEARFCN=1900;

MOD ULTECELL:LTECELLINDEX=XX,LTECELLNAME="XXX03",EUTRANCELLID=XXXXXXX,MCC="7xx",MNC="3x",TAC=XXXXX,CNOPGRPINDEX=0,CELLPHYID=X,LTEBAND=3,LTEARFCN=1900;

\\Criação dos novos apontamentos para as células 4G com a nova BW de 10 MHz

\\3G <> 4G - ERB 3G_1 (2100 MHz)

ADD ULTENCELL:RNCID=1,CELLID=XXXXXXX,LTECELLINDEX=XX;
 ADD ULTENCELL:RNCID=1,CELLID=XXXXXXX,LTECELLINDEX=XX;

\\Remoção do apontamento das células 4G com BW 5 MHz

\\Células ERB 3G 1 (2100 MHz)

RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
 RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
 RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
 RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
 RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
 RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;

\\Criação das novas células 4G para resseleção 3G<>4G com BW 10MHz e ajuste de parâmetros de prioridade

\\Células ERB 3G 1 (2100 MHz)

ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
 ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
 ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;


```
ADD ULTENCELL:RNCID=1,CELLID=XXXXXXX,LTECELLINDEX=XX;
```

\\Remoção do apontamento das células 4G com BW 5 MHz

\\Células ERB 3G 1 (850 MHz)

```
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
```

\\Células ERB 3G 1 (2100 MHz)

```
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
RMV UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1925;
```

\\Criação das novas células 4G para resseleção 3G<>4G com BW 10MHz e ajuste de parâmetros de prioridade

\\Células ERB 3G 1 (850 MHz)

```
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,
EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
```

\\Células ERB 3G 1 (2100 MHz)

```
ADD UCELLNFREQPRIOINFO:CELLID=XXXXXXX,EARFCN=1900,NPRIORITY=7,THDTHIGH=3,EMEASBW=D25,
EQRXLEVMIN=-64,BLACKLSTCELLNUMBER=D0;
```

\\Configuração dos Switchs SIB19-1 para as novas células 3G

\\Células ERB 3G 1 (850 MHz)

```
MOD UCELLSIBSWITCH:CELLID=XXXXXXX,SIBCFGBITMAP=SIB19-1;
MOD UCELLSIBSWITCH:CELLID=XXXXXXX,SIBCFGBITMAP=SIB19-1;
MOD UCELLSIBSWITCH:CELLID=XXXXXXX,SIBCFGBITMAP=SIB19-1;
MOD UCELLSIBSWITCH:CELLID=XXXXXXX,SIBCFGBITMAP=SIB19-1;
MOD UCELLSIBSWITCH:CELLID=XXXXXXX,SIBCFGBITMAP=SIB19-1;
MOD UCELLSIBSWITCH:CELLID=XXXXXXX,SIBCFGBITMAP=SIB19-1;
```

\\Células ERB 3G 2 (2100 MHz)

```
MOD UCELLSIBSWITCH:CELLID=XXXXXXX,SIBCFGBITMAP=SIB19-1;
MOD UCELLSIBSWITCH:CELLID=XXXXXXX,SIBCFGBITMAP=SIB19-1;
```

```
MOD UCELLSIBSWITCH:CELLID=XXXXXXX,SIBCFGBITMAP=SIB19-1;  
MOD UCELLSIBSWITCH:CELLID=XXXXXXX,SIBCFGBITMAP=SIB19-1;  
MOD UCELLSIBSWITCH:CELLID=XXXXXXX,SIBCFGBITMAP=SIB19-1;  
MOD UCELLSIBSWITCH:CELLID=XXXXXXX,SIBCFGBITMAP=SIB19-1;
```