



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

EDINALDO JOÃO COSTA DE LA-ROQUE

**Uma Nova Abordagem de Seleção de Célula e *Handover* para Redes
LTE Heterogêneas: Critérios Adicionais Baseados em Estimativa de
Capacidade e Velocidade de Usuário**

Belém - PA
2015



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO**

EDINALDO JOÃO COSTA DE LA-ROQUE

Uma Nova Abordagem de Seleção de Célula e *Handover* para Redes LTE Heterogêneas: Critérios Adicionais Baseados em Estimativa de Capacidade e Velocidade de Usuário

Dissertação de Mestrado submetida à banca examinadora do Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da UFPA, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

Área de Concentração: Sistema de Comunicação

Orientador: Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês

Belém - PA
2015

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

La-roque, Edinaldo João Costa de, 1965-

Uma nova abordagem de seleção de célula e handover para redes LTE heterogêneas: critérios adicionais baseados em estimativa de capacidade e velocidade de usuário / Edinaldo João Costa de La-roque. - 2015.

Orientador: Carlos Renato Lisboa Francês.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Ciências Exatas e Naturais, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Belém, 2015.

1. Sistemas de telefonia celular. 2. Tecnologia 4G. 3. Redes móveis heterogêneas. 4. Balanceamento de carga de redes. 5. Tecnologia 4G-Capacidade-Velocidade do usuário. I. Título.


CDD 22. ed. 621.38456

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO

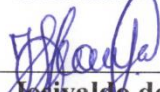
EDINALDO JOÃO COSTA DE LA-ROQUE

**UMA NOVA ABORDAGEM DE SELEÇÃO DE CÉLULA E HANDOVER PARA
REDES LTE HETEROGÊNEAS: CRITÉRIOS ADICIONAIS BASEADOS EM
ESTIMATIVA DE CAPACIDADE E VELOCIDADE DE USUÁRIO**

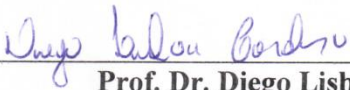
Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação, defendida e aprovada em 27/08/2015, pela banca examinadora constituída pelos seguintes membros:



Prof. Dr. Prof. Dr. Carlos Renato Lisboa Francês
Orientador – PPGCC/UFGA

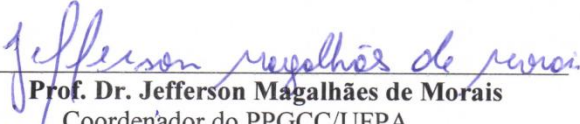


Prof. Dr. Josivaldo de Souza Araújo
Membro Interno – PPGCC/UFGA



Prof. Dr. Diego Lisboa Cardoso
Membro Externo – ITEC/UFGA

Visto:



Prof. Dr. Jefferson Magalhães de Moraes
Coordenador do PPGCC/UFGA

Prof. Dr. Jefferson Magalhães de Moraes
Coordenador do PPGCC
Mat.: SIAPE: 2378314

Agradecimentos

Agradeço a Deus por sua infinita bondade e misericórdia, por me amparar, me mostrar o caminho, me sustentar nos momentos difíceis, por colocar em minha trajetória pessoas que muito me ajudaram, por me dar força e coragem para perseverar com esforço e dedicação até alcançar mais esta valiosa conquista.

Agradeço pelo apoio da minha mulher, Rosiléa, apoio esse sem o qual essa caminhada certamente seria mais dificultosa. Aos meus filhos Ester, Esdras, Abia e Debora, bem como ao meu enteado, Rafael.

Agradeço ao meu amigo e ex-professor da graduação, Anderson Gregório Marques Soares, que muito me incentivou e me apontou caminhos para que eu não desistisse da ideia de cursar um mestrado, desde o incentivo para fazer a prova do POSCOMP em 2012, até os momentos que envolveram o processo de inscrição. Aproveitei também para incluir meu amigo e incentivador Paulo César Correia Guedes Mesquita.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Renato Lisboa Francês, que acreditou em mim durante o processo seletivo para o mestrado, que me permitiu apostar e permanecer em uma de suas frentes de pesquisa, redes móveis celulares LTE/4G, que me amparou nos momentos críticos dessa jornada (incluindo o amparo financeiro no momento da publicação do artigo), que teve muita paciência para com os meus muitos defeitos e poucas virtudes. Obrigado por sua aposta e confiança em mim.

Agradeço ao meu professor e parceiro, o doutorando Carlos Patrick Alves da Silva, por me ajudar nessa empreitada sobre Redes LTE Heterogêneas. Agradeço por toda a sua ajuda, dicas, compartilhamento de seus conhecimentos e pela paciência para comigo.

Agradeço aos meus professores (das disciplinas que cursei) Carlos Renato Lisboa Francês, João Crisóstomo, Jefferson Moraes, Nelson Sampaio e Sandro Bezerra.

Agradeço à minha equipe de estudos do PPGCC 2013.1, meus amigos e colegas Mauro Larrat, Michel Montenegro, Eduardo Raiol, Müller Miranda, Diego Silva, Renato Pina, Anderson Maia e Franciel Amorim.

Agradeço aos meus professores, amigos, ajudadores e colegas do laboratório LPRAD/UFGA (ordem alfabética): Antonio Jacob Jr., Ádamo Santana, André Donza, Bruno Lyra, Carlos Natalino, Delson Ferreira Oliveira, Diego Cardoso, Edvar Oliveira, Eulália da Mata, Evelin

Cardoso, Flavia Monteiro, Igor Natal, Jéssica Castilho, Jorge Cardoso, Jorge Jams Souza, Ketyllen Silva, José Jailton Junior, Liviane Ponte Rego, Marcelino Silva, Marcos Seruffo, Priscila Siqueira Aranha, Tássio Carvalho e Ulisses Weyl Costa.

Agradeço à CAPES pela bolsa de estudos de mestrado (bolsa essa que muito me ajudou com a dedicação exclusiva ao curso), à UFPA e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação (PPGCC) por todo o suporte e infraestrutura.

Por vezes sentimos que aquilo que fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma gota.

Madre Teresa de Calcutá

Sumário

Lista de Ilustrações	xi
Lista de Tabelas	xii
Lista de Siglas	xiii
Resumo	xvi
Abstract	xvii
Capítulo 1 - Introdução	18
1.1 Contextualização	18
1.2 Definição do Problema	19
1.3 Motivação	20
1.4 Objetivos	21
1.4.1 Objetivo Geral	21
1.4.2 Objetivos Específicos	21
1.5 Organização do Documento	22
Capítulo 2 - Fundamentação Teórica	24
2.1 Considerações Iniciais	24
2.2 LTE	24
2.3 LTE e outras Tecnologias <i>Wireless</i> de Banda Larga	25
2.3.1 WiMAX móvel	25
2.3.2 WiFi	26
2.4 LTE e LTE-Advanced	27
2.5 Comparação entre LTE e LTE-Advanced	27
2.6 Arquitetura Baseada no SAE do 3GPP	28
2.7 Visão Geral da Arquitetura Básica do Sistema envolvendo o LTE	28
2.8 Principais Elementos Lógicos da Arquitetura Básica	29
2.9 Redes Heterogêneas	31
2.10 Arquitetura de Rede LTE Heterogênea	32
2.11 O Processo de Seleção de Célula	34
2.12 Seleção e Re-Seleção de Célula	36
2.13 <i>Handover</i>	39
2.14 Balanceamento de Carga	40

2.15 Mecanismos que Proporcionam Alta Vazão para um UE	41
2.16 QoS no LTE	45
2.16.1 Inferências sobre a Qualidade do Canal para Maximização de Alocação de Recursos	46
2.16.2 Influência da Qualidade do Canal na Alocação de Recursos	48
2.16.3 Garantia de QoS para as Aplicações	49
2.16.4 Liberação de Recursos pela eNodeB com Base no QoS de uma Aplicação	53
2.16.5 Requisitos de QoS Diferentes para um mesmo UE	53
2.17 Modos de Transmissão MIMO	54
2.18 <i>Physical Downlink Shared Channel</i> (PDSCH)	54
2.19 Categorias de UE	55
2.20 Considerações Finais	56
Capítulo 3 - Trabalhos Correlatos	57
3.1 Considerações Iniciais	57
3.2 Estado da Arte	57
3.2.1 Cell Selection in 4G Cellular Networks	57
3.2.2 Analytical Modeling and Performance Evaluation of Cell Selection Algorithms for Mobile Networks with Backhaul Capacity Constraints	57
3.2.3 Load balancing in downlink LTE self-optimizing networks	58
3.2.4 Interference-Based Cell Selection in Heterogeneous Networks	59
3.2.5 Design and Evaluation of a Backhaul-Aware Base Station Assignment Algorithm for OFDMA-Based Cellular Networks	59
3.2.6 A Novel Cell Selection Strategy with Load Balancing for both Idle and RRC-Connected Users in 3GPP LTE Network	60
3.2.7 Handover Scenario and Procedure in LTE-based Femtocell Networks	60
3.2.8 Mitigation of Redundant Handovers to Femtocells by Estimation of <i>Throughput Gain</i>	61
3.2.9 A Novel Handover Mechanism between Femtocell and Macrocell for LTE based Networks	61
3.3 Síntese dos Trabalhos Correlatos	62
3.4 Contribuição do Trabalho	63
3.5 Considerações Finais	64
Capítulo 4 - Uma Nova Abordagem de Seleção de Célula e Handover para HetNets	65
4.1 Considerações Iniciais	65
4.2 Definição do Escopo	65

4.3 Visão Geral Sobre a Adoção dos Critérios Adicionais	65
4.4 Cálculo da Velocidade Média de Locomoção do UE	66
4.5 Estimativa de Capacidade da eNodeB via Canal PDSCH	69
4.6 Os Novos Processos de Decisão de Seleção de Célula e <i>Handover</i>	70
4.7 Fluxograma dos Algoritmos Propostos	72
4.8 Considerações Finais	73
Capítulo 5 - Avaliação de Desempenho e Resultados	74
5.1 Considerações Iniciais	74
5.2 Técnicas de Avaliação de Desempenho	74
5.2.1 Técnica da Medição	74
5.2.2 Técnica da Simulação Discreta	74
5.2.3 Técnica da Simulação Analítica	75
5.3 Validação por Simulação Discreta	75
5.3.1 O Simulador Discreto OPNET <i>Modeler</i>	75
5.3.2 Métricas Seleccionadas	76
5.3.3 Ambiente de Simulação LTE	76
5.3.3.1 Cenários de Simulação	77
5.3.3.2 Pressupostos da Simulação	79
5.4 Resultados da Simulação	80
5.4.1 Balanceamento de Carga da Rede	80
5.4.2 Melhoria de QoS	83
5.4.2.1 Quantidade de EPS <i>Bearers</i> GBR Admitidos e Rejeitados	83
5.4.2.2 Pacotes/Segundo Descartados no <i>Downlink</i>	84
5.4.2.3 <i>Delay</i> LTE	85
5.4.3 Análise de Sensibilidade	85
5.4.3.1 Variação do Peso da Disponibilidade de Recursos com Algoritmo de Velocidade de UE Desativado	86
5.4.3.2 Variação do Peso da Disponibilidade de Recursos com Limiar de Velocidade de UE Fixo em 5 km/h	87
5.4.3.3 Variação do Limiar de Velocidade de UE com Peso da Disponibilidade de Recursos Fixo em 75%	89
5.5 Considerações Finais	90
Capítulo 6 - Conclusão	92
6.1 Contribuições à Área	92
6.2 Dificuldades Encontradas	94

6.3 Trabalhos Futuros	94
Referências	96
Apêndice A - Determinação do Tamanho do Bloco de Transporte	99
A.1 Introdução	99
A.2 Determinação do Tamanho do Bloco de Transporte	99
A.2.1 TBs Não Mapeados à Multiplexação de Duas Camadas	99
A.2.2 TBs Mapeados à Multiplexação de Duas Camadas	105

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Evolução do LTE na linha do tempo	25
Figura 2 - Arquitetura Básica Envolvendo Somente a E-UTRAN	29
Figura 3 - Exemplo de Rede Heterogênea	31
Figura 4 - Exemplo de ambientes e interações entre diferentes tipos de estações base	32
Figura 5 - Arquitetura de Rede LTE Heterogênea	34
Figura 6 - Visão Geral de Processo de Seleção de Célula a Partir do Modo <i>Idle</i>	35
Figura 7 - Re-seleção de Célula	37
Figura 8 - <i>RRC_IDLE Cell Selection and Reselection</i>	38
Figura 9 - Fases do <i>handover</i>	39
Figura 10 - Estados de um UE quanto à mobilidade	40
Figura 11 - Esquemas de múltiplo acesso no LTE	41
Figura 12 - Inserção do CP no símbolo OFDM	42
Figura 13 - Estrutura básica de recursos do LTE	43
Figura 14 - Exemplo de MIMO para um único UE	44
Figura 15 - Faixas de frequência para FDD	45
Figura 16 - Faixas de frequência para TDD	45
Figura 17 - Procedimento de Solicitação de Feedback de Canal	46
Figura 18 - Constelações de Esquemas de Modulação aplicáveis à transmissão do PDSCH	48
Figura 19 - Arquitetura do Serviço EPS <i>Bearer</i>	51
Figura 20 - Arquitetura de internetworking 3G UMTS	52
Figura 21 - Exemplo de fluxo de mensagens para estabelecimento de <i>bearer</i> LTE/SAE	53
Figura 22 – Distância entre dois pontos no plano cartesiano	67
Figura 23 - Fluxograma do Algoritmo Proposto	72
Figura 24 - <i>Layout</i> dos Cenários LTE Simulados no OPNET	77
Figura 25 - Efeito do Balanceamento de Carga na Rede	81
Figura 26 - Desafogamento do Tráfego na Macro célula	82
Figura 27 - Comparação dos Algoritmos para a Femto1	82
Figura 28 - Melhor Caso de QoS	84
Figura 29 – Variação do peso da disponibilidade de recursos sem detecção de velocidade de UE	86
Figura 30 – Variação do peso da disponibilidade de recursos com limiar de velocidade de UE em 5 km/h	88
Figura 31 – Variação do limiar de velocidade de UE com peso da disponibilidade de recursos fixo em 75%	89

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparação entre LTE e LTE-Advanced	27
Tabela 2 - Largura de Banda Ocupada no Espectro de Frequências	42
Tabela 3 - <i>MCS Index</i> , Ordem de Modulação e <i>TBS Index</i> para o PDSCH	47
Tabela 4 - CQI (Informação sobre a Qualidade do Canal)	49
Tabela 5 - QCI para LTE	50
Tabela 6 - Resumo dos Modos de Transmissão no <i>downlink</i>	54
Tabela 7 - Categorias de UE	55
Tabela 8 - Síntese dos Trabalhos Correlatos	62
Tabela 9 – Fatores para Cálculo do Novo Índice de Prioridade	71
Tabela 10 - Parâmetros de Simulação LTE	78
Tabela 11 - Cenário REF – Taxa de Utilização do Canal LTE PHY PDSCH (%)	80
Tabela 12 - Cenário C&S – Taxa de Utilização do Canal LTE PHY PDSCH (%)	80
Tabela 13 - <i>Bearers</i> com Taxa de Bit Garantida	83
Tabela 14 - Pacotes Descartados por Segundo no <i>Downlink</i>	84
Tabela 15 - <i>Delay</i> LTE (em segundos)	85
Tabela 16 – Variação do Peso da Estimativa de Capacidade sem Detecção de Velocidade de UE	87
Tabela 17 - Variação do Peso da Estimativa de Capacidade com Limiar de Velocidade de UE em 5 km/h	88
Tabela 18 - Variação do Limiar de Velocidade do UE com Peso da Estimativa de Capacidade em 75%	90
Tabela 19 - Tamanho de Bloco de Transporte (TBS) (dimensão 27 x 110)	100
Tabela 20 - Tradução do TBS de Uma para Duas Camadas	106

Lista de Siglas

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
AoNDM	<i>All-or-Nothing Demand Maximization</i>
ARP	<i>Allocation and Retention Priority</i>
AS	<i>Access Stratum</i>
BLER	<i>Block Error Rate</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
CQI	<i>Channel Quality Information</i>
CSG	<i>Closed Subscriber Group</i>
CSI	<i>Channel State Information</i>
DCI	<i>Downlink Control Information</i>
DES	<i>Discrete-Event Simulation</i>
DSL	<i>Digital Subscriber Line</i>
DSP	<i>Digital Signal Processing</i>
ENB	<i>Evolved Node B</i>
eNodeB	<i>E-UTRAN Node B</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>
ETWS	<i>Earthquake and Tsunami Warning System</i>
E-UTRA	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access</i>
E-UTRAN	<i>Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
FAP	<i>Femto Access Point</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
F-GW	<i>Femto Gateway</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
FTTH	<i>Fiber to the Home</i>
FTTX	<i>Fiber to the x</i>
GBR	<i>Garanteed Bit Rate</i>
GPS	<i>Global Positioning System</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat reQuest</i>
HeNB	<i>Home eNodeB</i>
HSS	<i>Home Subscription Server</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
HTTPS	<i>Hypertext Transfer Protocol Secure</i>
IMS	<i>IP Multimedia Subsystem</i>
IPTV	<i>Internet Protocol Television</i>
ISI	<i>Inter-Symbol Interference</i>

ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
ITU-R	<i>International Telecommunication Union – Radiocommunication Sector</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MBR	<i>Maximum Bit Rate</i>
MCS	<i>Modulation and Coding Scheme</i>
MIMO	<i>Multiple Input Multiple Output</i>
MME	<i>Mobility Management Entity</i>
MMKP	<i>Multichoice Multidimensional Knapsack Problem</i>
NAS	<i>Non-Access Stratum</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiple Access</i>
OSG	<i>Open Subscriber Group</i>
PCEF	<i>Policy Control Enforcement Function</i>
PCRF	<i>Policy and Charging Rules Function</i>
PCM	<i>Pulse Code Modulation</i>
PDCCH	<i>Physical Downlink Control Channel</i>
PDN	<i>Packet Data Network</i>
PDSCH	<i>Physical Downlink Shared Channel</i>
P-GW	<i>PDN Gateway</i>
PDU	<i>Packet Data Unit</i>
P&D	<i>Pesquisa e Desenvolvimento</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PLMN	<i>Public Land Mobile Network</i>
PMI	<i>Precoding Matrix Index</i>
PRB	<i>Physical Resource Block</i>
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i>
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QCI	<i>QoS Class Identifier</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>
RAN	<i>Radio Access Network</i>
RAT	<i>Radio Access Technology</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RE	<i>Resource Element</i>
RI	<i>Rank Indicator</i>
RRC	<i>Radio Resource Control</i>
RSRP	<i>Reference Symbol Received Power</i>
RSRQ	<i>Reference Symbol Received Quality</i>
SAE	<i>System Architecture Evolution</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>

S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SLA	<i>Service Level Agreement</i>
SINR	<i>Signal-to-Noise Plus Interference Ratio</i>
SIM	<i>Subscriber Identity Module</i>
SIP	<i>Session Initiation Protocol</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SON	<i>Self-Optimizing Networks</i>
SONET	<i>Synchronous Optical Network</i>
TA	<i>Tracking Area</i>
TB	<i>Transport Block</i>
TBS	<i>Transport Block Size</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDD	<i>Time Division Duplexing</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TTI	<i>Transmission Time Interval</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UICC	<i>Universal Integrated Circuit Card</i>
UMa	<i>Urban Macro Channel Model (ITU-R)</i>
UMi	<i>Urban Micro Channel Model (ITU-R)</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
USIM	<i>Universal Subscriber Identity Module</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>

Resumo

As redes heterogêneas *Long Term Evolution* (LTE) representam uma abordagem interessante para a crescente demanda por cobertura e qualidade de serviço (QoS) pelos usuários móveis. As células de baixa potência desempenham um papel importante no trato com esta demanda, proporcionando um meio para os usuários móveis superarem o problema da falta de recursos nas redes móveis, ou, quando estes recursos estão disponíveis, uma forma de evitarem sua má qualidade de serviço em determinados cenários. No entanto, os procedimentos de seleção de célula e *handover* encontrados no LTE *Release 8* são ineficientes para cenários heterogêneos, uma vez que se baseiam apenas na potência do sinal de referência recebido (RSRP) e na qualidade do sinal de referência recebido (RSRQ). Nesta dissertação, é proposta a implementação de dois critérios adicionais como melhoria para os processos de seleção de célula e *handover*: estimativa de capacidade de estação base e velocidade média de locomoção do usuário. A partir dos resultados obtidos, o algoritmo proposto mostrou a vantagem de contribuir para eventuais “desafogamentos” da macrocélula, assim como para o balanceamento de carga de rede e a melhoria de QoS para o usuário.

Palavras-chave: LTE. HetNet. *Handover*. Estimativa de Capacidade. Velocidade de Usuário. Balanceamento de Carga. QoS.

Abstract

Long Term Evolution (LTE) heterogeneous networks represent an interesting approach to the ever increasing demand for coverage and Quality of Service (QoS) by the mobile users. Small cells play an important role in dealing with this demand by providing a means for the mobile user to overcome the problem of lack of mobile network resources or, when these resources are available, a way to dodge their poor service quality in certain scenarios. However, the cell selection and handover procedures found in LTE Release 8 are inefficient in heterogeneous scenarios, since they are based only on Reference Symbol Received Power (RSRP) and Reference Symbol Received Quality (RSRQ). In this dissertation, the implementation of two additional criteria is proposed as an improvement for the cell selection and handover procedures: base station capacity estimation and average user mobility speed. From the obtained results, the proposed algorithm has shown the benefit of eventually contributing to the macrocell offloading, as well as to the network load balancing, and the user QoS improvement.

Keywords: LTE. HetNet. Handover. Capacity Estimation. User Speed. Load Balancing. QoS.

Capítulo 1 - Introdução

Este capítulo contextualiza a área de interesse da dissertação, bem como apresenta a definição do tema sob estudo e seus objetivos neste trabalho.

1.1 Contextualização

Segundo a 4G Americas (2012a), a explosão do uso de dispositivos e aplicações móveis nos últimos anos, tem levado a uma sobrecarga da infraestrutura da rede responsável pelo escoamento desse tráfego, afetando tanto o desempenho da rede quanto a experiência do usuário. O volume de tráfego de dados em redes celulares vem crescendo exponencialmente nos últimos anos. As redes móveis enfrentam um constante crescimento do número de usuários com seus equipamentos dotados de capacidades de memória e processamento cada vez maiores, bem como a disponibilidade de aplicações cada vez mais vorazes quanto ao consumo de recursos de *hardware* e volume de tráfego (*throughput*), com exigências de respostas em tempo real (ou próximo disso) e demanda variável de largura de banda no espectro de frequências.

Como uma das soluções para enfrentar esse crescimento da demanda por mais recursos das redes móveis, as redes LTE (*Long Term Evolution*) representam uma nova proposta de tecnologia de rádio acesso, que provê uma migração suave rumo às redes de quarta geração (4G¹). É projetada para aumentar a capacidade, cobertura e velocidade, em comparação aos sistemas *wireless* anteriores (LIN et al., 2011). No entanto, como parte dos esforços contínuos, na busca de melhorias para enfrentar os constantes desafios de se conseguir mais recursos para os usuários por menores custos para as operadoras, torna-se necessário investigar os atuais padrões de comportamento dos sistemas, com o objetivo de identificar pontos passíveis de melhorias.

Segundo a 4G Americas² em (4G AMERICAS, 2012a), dispositivos e aplicações móveis voltados para o mercado de massa explodiram nos últimos anos. A proliferação de novas aplicações, dispositivos e serviços têm levado ao aumento na sinalização e no fluxo do tráfego de dados através das redes móveis banda larga HSPA³ e LTE.

¹ Os padrões *wireless* 3GPP *Long Term Evolution* (LTE) e IEEE 802.16e *Worldwide Interoperability for Microwave Access* (WiMAX), são considerados recomendações para redes móveis de quarta geração (4G), cujo espectro de frequências é licenciado (IBRAHIM et al., 2013).

² 4G Americas é uma associação setorial dos principais provedores de serviços e fabricantes do setor de telecomunicações, tendo as seguintes empresas como associadas: Alcatel-Lucent, América Móvil, AT&T, Cable & Wireless Communications, Cisco, Commscope, Entel, Ericsson, HP, Intel, Mavenir Systems, Nokia, Qualcomm, Sprint, T-Mobile e Telefonica (4G AMERICAS, 2015).

³ *High Speed Packet Access* (HSPA) é uma recomendação 3GPP para redes móveis de terceira geração (3G), antecessora do LTE (4G) (HOLMA & TOSKALA, 2011).

Em (4G AMERICAS, 2012a), são identificados alguns desafios que afetam tanto o desempenho das redes quanto a experiência do usuário final, tais como:

- I. O impacto do comportamento da plataforma (sistema operacional) dos dispositivos, tanto no plano de controle quanto no plano do usuário;
- II. Novas tendências no campo da segurança dos dispositivos, decorrentes dos riscos dos sistemas operacionais dos *smartphones*, como *malwares*, por exemplo;
- III. Impactos originados da tendência das redes, como *streaming*, processamento, armazenamento, jogos e vídeo.

Para mitigar os impactos impostos por esses desafios, são feitas algumas recomendações em (4G AMERICAS, 2012a), tais como:

- a. Melhorias na arquitetura de rede, incluindo a otimização dos ambientes de entrega de serviços, gerenciamento de tráfego e soluções que desafoguem o tráfego;
- b. Melhorias na arquitetura dos dispositivos, a fim de permitir a otimização dos recursos de rádio e percepção da rede;
- c. Orientações quanto ao desenvolvimento de aplicações que considerem o desafio do acesso *wireless*, do *cache* e do escalonamento;
- d. Melhorias que visem à segurança dos dispositivos, incluindo *firewalls*, detecção de intrusão, filtros de pacotes, etc;
- e. Educação dos usuários quanto ao uso consciente de dados/sinalização, escolha do acesso mais apropriado para o uso pesado de dados, suporte a alertas quanto ao uso dos dados das aplicações, etc.

Considerando esse cenário, o foco deste trabalho está diretamente relacionado com o item “a” supracitado. Ou seja, a busca de soluções que desafoguem o tráfego da rede.

1.2 Definição do Problema

Segundo (4G AMERICAS, 2012a), a adoção generalizada de *smartphones*, a pronta disponibilidade de plataformas de desenvolvimento de aplicações e de mercados de distribuição, estão fomentando a inovação nas aplicações em uma escala sem precedentes, levando a uma explosão no número e no uso de aplicações e, naturalmente, no uso mais intenso das redes de dados móveis.

Conseqüentemente, esse cenário obriga as operadoras de serviços de telecomunicações a aumentarem o número de estações base e de buscarem soluções que

otimizem o uso dos recursos dessas estações, bem como a ampliação e otimização da infraestrutura do *backhaul*⁴, responsável pela vazão massiva do tráfego das estações base. Nesse sentido, segundo (4G AMERICAS, 2012a), deve-se considerar o uso eficiente dos recursos de rádio através de inovações no que se refere ao desafogamento (*offloading*) do tráfego e ao uso do melhor acesso disponível, como Wi-Fi⁵, femtocélulas e picocélulas.

Diante disso, considerando a tecnologia LTE, em sua *release* 8 do 3GPP, lançada no ano de 2008, foram identificados dois processos presentes em redes heterogêneas, cuja otimização pode ajudar numa melhor distribuição do tráfego na rede, promovendo uma melhoria no balanceamento de carga, com consequente desafogamento de tráfego na macrocélula e melhoria na percepção de Qualidade de Serviço (QoS) para o usuário: os processos de seleção de célula e *handover*.

De acordo com os autores Sesia, Toufik e Baker (2011), os processos de seleção de célula e *handover* são baseados somente na potência (RSRP) e na qualidade (RSRQ) dos sinais de referência recebidos. Esses dois parâmetros são insuficientes para garantir um dos principais requisitos para as aplicações dos usuários, que é a garantia de QoS. O QoS tem relação direta com a satisfação do usuário, principalmente quanto à qualidade de acesso a serviços de alto consumo de banda e baixa latência da rede, como videoconferência, por exemplo, que exige respostas em tempo real ou muito perto disso. Pode-se afirmar que a falta da garantia de qualidade durante uma videoconferência, geralmente provoca grande insatisfação por parte do usuário desse tipo de serviço.

1.3 Motivação

A motivação desta pesquisa é a busca por soluções alternativas para o problema da distribuição desigual de carga nas redes móveis, provocando gargalos por sobrecarga de tráfego em certos pontos da rede, fato este que leva a problemas como, por exemplo, bloqueio de chamadas e QoS pobre (prioridade, latência e perda de pacotes inadequados) para as aplicações dos usuários.

Diante disso, ainda que vários estudos tenham explorado esse campo, esta dissertação apresenta mais uma contribuição para a comunidade, ao modelar uma solução simples e direta, que resulta no desafogamento de macrocélulas⁶ e no balanceamento de

⁴ O Transporte de Rádio, também conhecido como *Backhaul* Móvel, refere-se às soluções de transferência de dados entre as estações base e o núcleo da rede (HOLMA & TOSKALA, 2011).

⁵ Wi-Fi é a recomendação de Rede Local sem Fio (WLAN) IEEE 802.11, cujo espectro de frequências é de uso livre (não licenciado) (HOLMA & TOSKALA, 2011).

⁶ Macrocélulas são estações base com maior capacidade de atender um maior número de usuários e serviços, além de apresentar maior raio de cobertura *wireless*.

carga da rede, possibilitando que estações base de baixa potência⁷ (picocélulas e femtocélulas) assumam um volume maior de tráfego na rede, objetivando uma melhoria geral na capacidade do sistema, bem como a redução do congestionamento, através da introdução de uma nova abordagem para os processos de seleção de célula e *handover* em redes LTE heterogêneas (HetNets), que inclui como critérios adicionais a estimativa de capacidade das estações base candidatas, em termos de disponibilidade de Blocos de Recursos Físicos (PRBs – *Physical Resource Blocks*) - termo a ser definido posteriormente - bem como a velocidade média de locomoção dos usuários na tomada de decisão quanto à seleção de célula e *handover*.

1.4 Objetivos

Neste item, os objetivos deste trabalho são declarados levando-se em consideração a *Release 8* do LTE do 3GPP. No entanto, faz-se importante mencionar que, apesar da adoção da *Release 8* do LTE (liberada em 2008) para a implementação da solução proposta neste trabalho, fato devido à limitação da versão do simulador discreto utilizado para validação da proposta, a proposição aqui feita também se aplica à *Release 10* do LTE (LTE-Advanced), liberada no ano de 2011, conforme apresentado no capítulo 2.

1.4.1 Objetivo Geral

Implementação de dois critérios adicionais para os processos de seleção de célula e *handover*, a fim de melhorar o balanceamento de carga na rede e, conseqüentemente, melhorar também a percepção de QoS por parte dos usuários. Os critérios adicionais são:

- a. Estimativa de capacidade em termos de disponibilidade de Blocos de Recursos Físicos (PRBs – *Physical Resource Blocks*) das estações base e
- b. Velocidade média de locomoção do usuário.

1.4.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- a. Promover uma melhor distribuição do tráfego na rede, fazendo com que estações de baixa potência (picocélulas e femtocélulas) assumam mais tráfego de dados, através do desafogamento do tráfego na macrocélula, liberando-a para melhor atender às demandas dos usuários móveis;
- b. Promover uma melhora na percepção de qualidade de serviço para os usuários, através da possibilidade de se conectarem a estações base menos sobrecarregadas;

⁷ São estações base de baixa potência com raios de cobertura menores que os raios de cobertura de macrocélulas.

- c. Propor um método de estimativa de velocidade média de locomoção para usuários móveis, com o objetivo de proteger os usuários de femtocélulas contra tentativas de conexões e tráfegos de usuários que estejam se movendo em velocidade veicular⁸ (em contraste com velocidade de pedestre), incompatíveis com os curtos raios de cobertura dessas femtocélulas, o que provoca degradação na qualidade dos serviços para os usuários dessas estações de baixa potência;
- d. Propor um método de estimativa de disponibilidade de capacidade para as estações base, a ser utilizado na seleção de célula e *handover* para células menos sobrecarregadas;
- e. Desenvolver códigos em linguagem C++ a serem inseridos nos modelos de UE (dispositivos móveis de usuário) e eNodeB do simulador discreto OPNET *Modeler* versão 17.5, mais especificamente nos processos que envolvem a seleção de célula e *handover*, de maneira a fazer com que os UEs priorizem as estações base que ofereçam melhores garantias de disponibilidade de recursos para suas aplicações em execução;
- f. Validação da solução a partir da criação e simulação de cenários representativos, que utilizem os modelos de UEs e eNodeBs modificados no OPNET *Modeler*, visando à comparação com cenário padrão da *Release 8* do LTE do 3GPP, que utilizem os modelos originais de UEs e eNodeBs;
- g. Avaliação de desempenho da solução proposta, por intermédio de análises gráficas e numéricas que utilizem métricas extraídas de cenários simulados no OPNET *Modeler*.

1.5 Organização do Documento

Para um melhor entendimento sobre os conteúdos tratados neste trabalho, esta dissertação de mestrado está organizada da seguinte maneira:

No Capítulo 2, é realizada uma revisão bibliográfica com os principais fundamentos teóricos sobre as tecnologias de redes móveis, que envolvem o tema deste trabalho, tais como: as características de uma rede LTE, rede heterogênea e sua arquitetura, os processos de seleção, re-seleção de célula e *handover*, mecanismo de alocação de recursos para os usuários, garantia de QoS, modos de transmissão no *downlink* e categorias de dispositivos móveis.

⁸ A velocidade veicular mencionada aqui, também é citada na literatura como alta mobilidade, bem como velocidade de pedestre também é encontrada como baixa mobilidade (ZHANG, H. et al., 2010).

No Capítulo 3, é apresentado o estado da arte em relação ao foco deste trabalho e que servem de embasamento - e complementação à fundamentação teórica apresentada no Capítulo 2 - às investigações propostas neste documento, como: os processos de seleção de célula e *handover*, balanceamento de carga e QoS.

No Capítulo 4, é apresentada a proposta desta dissertação de mestrado, incluindo o escopo da proposta, uma visão geral sobre a adoção dos critérios adicionais aos processos de seleção de célula e *handover*, a metodologia de cálculo adotada para os critérios adicionais mencionados, o funcionamento proposto para os novos processos, bem como os fluxogramas dos algoritmos implementados no simulador OPNET.

O Capítulo 5 trata da avaliação de desempenho da solução proposta, fazendo uma breve introdução sobre as técnicas de avaliação de desempenho usadas em redes de computadores, definindo tanto a técnica quanto o software simulador escolhidos para validar e avaliar a proposta deste trabalho. O capítulo também apresenta as métricas escolhidas, os cenários e os pressupostos da simulação, bem como a apresentação dos resultados da simulação discreta, analisando as métricas que evidenciam os melhoramentos propostos: balanceamento de carga da rede, melhoria de QoS e desafogamento da macrocélula.

O Capítulo 6 apresenta a conclusão deste trabalho, as contribuições realizadas à área, as dificuldades encontradas durante a progressão deste trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 2 – Fundamentação Teórica

2.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, são apresentados os conceitos e modelos mais relevantes, extraídos de obras de referência sobre redes LTE, obras essas consultadas durante a fase de pesquisa bibliográfica. O enfoque do conteúdo a seguir é voltado para mecanismos que envolvem o dimensionamento e a alocação de recursos para UEs, e serve como base teórica para a proposta deste trabalho em relação aos processos de seleção de célula e *handover* em redes LTE heterogêneas, a ser apresentada posteriormente, com validação baseada em simulação discreta.

2.2 LTE

LTE (*The Long Term Evolution*) é uma tecnologia de rádio acesso móvel que representa um passo em direção aos sistemas de redes sem fio de quarta geração (4G), cuja padronização teve sua investigação inicial empreendida pelo 3GPP (*3rd Generation Partnership Project*), como tecnologia viável no ano de 2004. As expectativas para essa tecnologia sobre as demais tecnologias *wireless* incluíam vantagens traduzidas em melhoria de desempenho do sistema, como altas taxas de pico para dados, baixa latência e melhor eficiência quanto ao uso do espectro de frequências (ALI-YAHIYA, 2011a). Abaixo, algumas das principais expectativas sobre os sistemas 4G:

- a. Alta eficiência espectral;
- b. Latência muito baixa;
- c. Suporte a larguras de banda variáveis;
- d. Arquitetura simplificada de protocolos;
- e. Compatibilidade com as especificações 3GPP de redes anteriores (CDMA2000⁹, por exemplo);
- f. Técnicas de duplexação FDD¹⁰ e TDD¹¹ dentro de uma única tecnologia de rádio acesso;
- g. Transmissões mais eficientes nos modos *multicast* e *broadcast*.

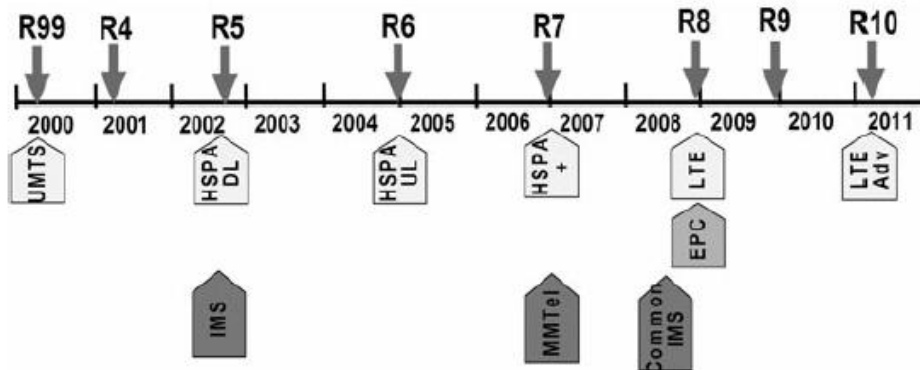
⁹ CDMA2000 é tecnologia 3G, desenvolvida a partir da tecnologia 2G, originada do padrão IS-95 que, por sua vez, se baseia no protocolo CDMA (*Carrier Sense Multiple Access*), segundo Dahlman, Parkvall e Sköld (2013). No CDMA, múltiplos usuários podem acessar o canal de transmissão, porém um por vez.

¹⁰ No FDD (*Frequency Division Duplexing*), os *subframes* tanto do *downlink* quanto do *uplink* são transmitidos simultaneamente em diferentes frequências portadoras, de acordo com Andrews, J., Ghosh, A. e Muhamed, R. (2007).

¹¹ No TDD (*Time Division Duplexing*), os *subframes* de *uplink* e *downlink* são transmitidos na mesma frequência portadora, porém em tempos diferentes, segundo Andrews et al. (2007).

Vale ressaltar que somente a partir da *Release* 10 (LTE-Advanced), o LTE passou a ser considerado como tecnologia de rádio acesso móvel 4G. Antes disso, era considerado como 3.9G. A Figura 1 mostra, ao longo da linha do tempo, a evolução do LTE em comparação com outras tecnologias correlatas.

Figura 1 - Evolução do LTE na linha do tempo



Fonte: Ali-Yahiya (2011a)

Observa-se que em 2008 tem-se o lançamento da *Release* 8 do 3GPP, compreendendo o LTE (rádio acesso móvel) e o EPC (núcleo da rede), sendo essa versão considerada como a primeira estável liberada para o mercado, segundo Ali-Yahiya (2011a). Em 2010, houve novos avanços consolidados na especificação do 3GPP *Release* 10, o LTE-Advanced (LTE-A).

2.3 LTE e Outras Tecnologias *Wireless* de Banda Larga

LTE não é a única solução para entrega de serviços móveis de banda larga, segundo Ali-Yahiya (2011a). Várias soluções proprietárias, particularmente para aplicações fixas, estão presentes no mercado. Dentre essas soluções, existem soluções alternativas padronizadas que, pelo menos em parte, se sobrepõem ao LTE, em especial para aplicações portáteis e móveis. Em um horizonte próximo, dentre essas alternativas, as mais importantes são sistemas celulares de terceira geração (3G) e sistemas WiFi baseados no padrão IEEE 802.11, conforme exposto a seguir.

2.3.1 WiMAX Móvel

WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) se refere ao padrão IEEE 802.16, para a implantação de redes wireless metropolitanas globais. Disponível nas versões fixa e móvel, seu uso é mais apropriado para rádio acesso fixo de banda larga (ALI-YAHIYA, 2011b), sendo similar aos serviços de banda larga DSL¹² (*Digital Subscriber Line*) e *cable*

¹² DSL é tecnologia de acesso fixo que entrega serviços de banda larga via cabos telefônicos de pares trançados, fornecendo taxa de dados da ordem de alguns poucos Mbit/s, segundo Andrews et al. (2007).

*modem*¹³. Em sua versão móvel, o WiMAX é baseado no padrão IEEE 802.16e e suporta tanto aplicações fixas quanto móveis.

A técnica de multiplexação OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) adotada pelo WiMAX móvel, lhe permite fornecer altas taxas de dados. Além disso, tem as características que permitem lidar com mobilidades a velocidades veiculares, com QoS (*Quality of Service*) comparável aos seus concorrentes de banda larga (ANDREWS, J., GHOSH, A. e MUHAMED, R., 2007 apud ALI-YAHIYA, 2011a). Dentre as características que garantem a melhoria no *throughput* de dados, encontram-se:

- a. Técnica de modulação AMC (*Adaptive Modulation and Coding*);
- b. Método de correção preditiva de erros HARQ (*Hybrid Automatic Repeat Request*);
- c. Técnica de duplexação TDD (*Time Division Duplexing*);
- d. Opera com frequência de 2,5 GHz;
- e. Alta tolerância à interferências multipercurso e auto-interferência.

2.3.2 WiFi

Sistemas WiFi (*Wireless Fidelity*) são utilizados para fornecer banda larga *wireless* e são baseados na família de padrões IEEE 802.11, basicamente constituindo-se em tecnologias de LAN (*Local Area Network*) sem fio (WLAN), projetadas para prover serviço de banda larga. Sistemas WiFi baseados no padrão IEEE 802.11a/g suportam taxas de pico de 54 Mbit/s para dados, com portadoras de 2,4 GHz ou 5 GHz, sendo geralmente utilizados tanto para ambientes *indoor* quanto *outdoor*, cobrindo poucas centenas de metros quadrados, o que as torna apropriadas para redes empresariais e para *hot spots*, tais como aeroportos e hotéis (PRASAD, R. & PRASAD, N., 2005 apud ALI-YAHIYA, 2011a).

No entanto, segundo Perahia e Stacey (2013), o padrão 802.11n introduziu melhorias significativas, basicamente pelo uso de multiplexação espacial usando MIMO e operação a 40 MHz, com taxas de 300 Mbit/s a 20 MHz e 600 Mbit/s a 40 MHz com portadoras de 2,4 GHz ou 5 GHz. Já um padrão mais recente, o 802.11ac, pode operar a 20, 40, 80 e 160 MHz, com taxas de dados que podem chegar a 6,5 Gbit/s, com portadora de 5 GHz. Esse último (roteador WiFi 802.11ac) encontra-se disponível no mercado.

¹³ *Cable Modem* é tecnologia de acesso fixo banda larga que entrega serviços de TV por cabo coaxial, de acordo com Andrews et al. (2007).

2.4 LTE e LTE-Advanced

Resumidamente, de acordo com Ali-Yahiya (2011a), em setembro de 2009, surgiu a proposta do LTE-Advanced, que seria a *Release 10* do LTE, ampliando o escopo do sistema, incluindo aprimoramentos que fossem além dos sistemas 3G (até então o LTE era considerado como 3.9G), elevando o LTE à categoria de sistema 4G. Algumas das principais características para essa nova versão do LTE seriam:

- a. Funcionalidade de alcance mundial e *roaming*¹⁴;
- b. Compatibilidade de serviços;
- c. Interação com outros sistemas de rádio acesso (UMTS¹⁵, WLAN e WiMAX, por exemplo);
- d. Melhoria nas taxas de pico para dados, a fim de suportar serviços e aplicações avançados (100 Mbit/s para alta mobilidade e 1 Gbit/s para baixa mobilidade¹⁶).

2.5 Comparação entre LTE e LTE-Advanced

Ali-Yahiya (2011a) compara de maneira resumida as principais características dos sistemas LTE e LTE-Advanced na Tabela 1, onde se percebe que as principais diferenças estão relacionadas com taxas de pico para dados e larguras de banda ocupadas no espectro de frequências.

Tabela 1 - Comparação entre LTE e LTE-Advanced

Parâmetro	LTE	LTE-Advanced
Taxa de pico de dados no <i>downlink</i>	300 Mbit/s	1 Gbit/s
Taxa de pico de dados no <i>uplink</i>	75 Mbit/s	500 Mbit/s
Largura de banda no <i>downlink</i>	20 MHz	100 MHz
Largura de banda no <i>uplink</i>	20 MHz	40 MHz
Mobilidade	Otimizada para baixas velocidades (<15 km/h), alto desempenho a velocidades de até 120 km/h, e consegue manter links com até 350 km/h.	Idêntico ao LTE.
Cobertura	Desempenho total até 5 km de distância.	Idêntico ao LTE.
Larguras de banda escaláveis	1,4, 3, 5, 10, 15 e 20 MHz	Até 100 MHz.

Fonte: Ali-Yahiya (2011a)

¹⁴ Segundo Holma & Toskala (2011), *roaming* é uma importante funcionalidade, onde as operadoras compartilham suas redes com assinantes de outras operadoras, ocorrendo geralmente entre operadoras que atendem a diferentes áreas geográficas, considerando que isto não causa conflito de concorrência entre tais operadoras, além de beneficiar os assinantes com uma área de cobertura combinada maior.

¹⁵ UMTS (*Universal Mobile Telephone System*) é uma das tecnologias móveis usadas na evolução dos sistemas 3G (ANDREWS et al., 2007).

¹⁶ Ali-Yahiya (2011a) considera baixa mobilidade velocidades entre 0 e 15 km/h e alta mobilidade de 15 a 120 km/h.

2.6 Arquitetura Baseada no SAE do 3GPP

Segundo Holma & Toskala (2011), após o início do processo evolutivo da interface de rádio, tornou-se evidente que a arquitetura do sistema como um todo também precisaria evoluir. Assim sendo, debates em torno da evolução do sistema seguiram-se, recebendo esse esforço evolutivo o acrônimo SAE (*System Architecture Evolution*), e tendo-se acordado que a agenda para a finalização dos trabalhos se daria na *Release 8* do 3GPP, situada na linha do tempo entre os anos de 2008 e 2009, conforme mostra a Figura 1, que é quando, além do LTE, passa-se a contar com o núcleo da rede também evoluído, o EPC. Nesse contexto, as principais metas para a *Release 8* do SAE, eram:

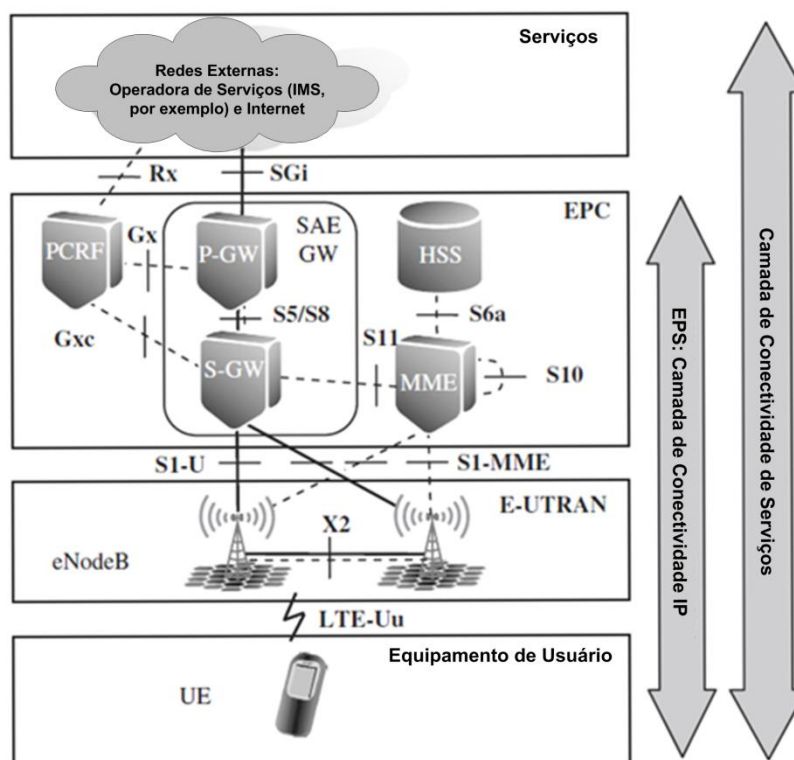
- a. Otimização geral dos serviços por comutação de pacotes, sem a necessidade de comutação de circuitos;
- b. Suporte otimizado para *throughputs* mais altos para usuários de altas taxas de dados;
- c. Melhoria dos tempos de resposta para ativação e configuração de *bearers* (mecanismos de criação de sessões para as aplicações com base nos perfis dos usuários);
- d. Melhoria dos *delays* de entrega de pacotes;
- e. Simplificação geral do sistema em comparação com versões existentes do 3GPP e de outros sistemas celulares;
- f. Interação otimizada com outras redes de acesso do 3GPP;
- g. Interação otimizada com outras redes de acesso *wireless*.

2.7 Visão Geral da Arquitetura Básica do Sistema Envolvendo o LTE

Ainda segundo Holma & Toskala (2011), os nós lógicos e suas conexões mostrados na Figura 2, refletem a configuração básica do sistema, envolvendo essencialmente os quatro domínios de alto nível: o equipamento do usuário (UE), a rede de acesso E-UTRAN¹⁷, o núcleo da rede (EPC) e o domínio dos serviços.

¹⁷ O termo *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) refere-se à rede de acesso LTE, responsável pela interconexão *wireless* entre o UE e a eNodeB.

Figura 2 – Arquitetura Básica Envolvendo Somente a E-UTRAN



Fonte: adaptado de Holma & Toskala (2011)

O conjunto dos domínios que envolvem o UE, a E-UTRAN (LTE) e o EPC denomina-se EPS (*Evolved Packet System*). Ou seja, o EPS vai do UE até a borda da rede móvel, tendo como último nó roteador de saída o P-GW, excluindo portanto a rede externa.

2.8 Principais Elementos Lógicos da Arquitetura Básica

Holma & Toskala (2011) destacam os elementos lógicos necessários em uma configuração básica do sistema quando tanto a interface E-UTRAN quanto o EPC encontram-se envolvidos, conforme mostra a Figura 2:

- Equipamento do Usuário (UE):** UE é o dispositivo que o usuário final utiliza para comunicação. Pode ser um *smartphone*, um *tablet*, um *notebook*, etc.
- E-UTRAN NodeB (eNodeB):** A eNodeB é uma estação base que controla todas as funções de rádio acesso na parte fixa do sistema LTE. As eNodeBs são distribuídas pela rede dentro da área de cobertura, cada uma residindo próximo às antenas de rádio.
- PCRF (*Policy and Charging Rules Function*):** PCRF é o elemento de rede responsável por controlar as políticas de uso do sistema e pela cobrança/faturamento do usuário.

- d. **HSS (*Home Subscription Server*):** HSS é o repositório de dados das assinaturas de serviços contratados pelo usuário final. Também registra a localização do usuário no nível do nó que controla as redes visitadas por esse usuário, como o MME.
- e. **MME (*Mobility Management Entity*):** MME é o elemento que gerencia a mobilidade dos usuários, realiza a autenticação e autorização, possui habilidades de rastreamento e controle de acessibilidade e negocia a segurança.
- f. **S-GW (*Serving Gateway*):** O S-GW é um *gateway* que roteia e repassa pacotes de dados de usuários e também atua como âncora de mobilidade para os usuários durante o *handover* entre eNodeBs. O S-GW funciona como um agregador de eNodeBs.
- g. **P-GW (*PDN¹⁸ Gateway*):** O P-GW é um *gateway* que fornece conectividade entre os equipamentos de usuários (UEs) e redes externas. O P-GW é um roteador que dá acesso a redes IP externas, como a Internet.
- h. **Domínio de Serviços:** O domínio de serviços pode incluir vários subsistemas, que por sua vez podem incluir vários nós lógicos, conforme as categorias resumidamente apresentadas abaixo:
 - I. **Serviços de operadoras baseados em IMS:** O Subsistema de Multimídia IP (IMS) é baseado em máquinas utilizadas pela operadora, com a finalidade de prover serviços que utilizem o Protocolo de Iniciação de Sessão (SIP). Um exemplo de serviço que utiliza o SIP é uma chamada de Voz sobre IP (VoIP), porém vídeo também pode estar incluso na chamada. O IMS tem especificação própria de arquitetura pelo 3GPP (3GPP, 2008).
 - II. **Serviços de operadoras não baseados em IMS:** A arquitetura para esse tipo de serviço não é padronizada, podendo a operadora simplesmente disponibilizar um servidor na sua rede, ao qual os UEs se conectarão através de algum protocolo que tenha suporte em uma aplicação que rode no UE. Um exemplo desse tipo de serviço é o *streaming* de vídeo.
 - III. **Outros serviços não providos pelas operadoras:** São serviços disponibilizados na Internet e que não são padronizados pelo 3GPP, sendo suas arquiteturas dependentes dos serviços em questão. Um uso típico desse tipo de serviço é o acesso do UE a um servidor na Internet

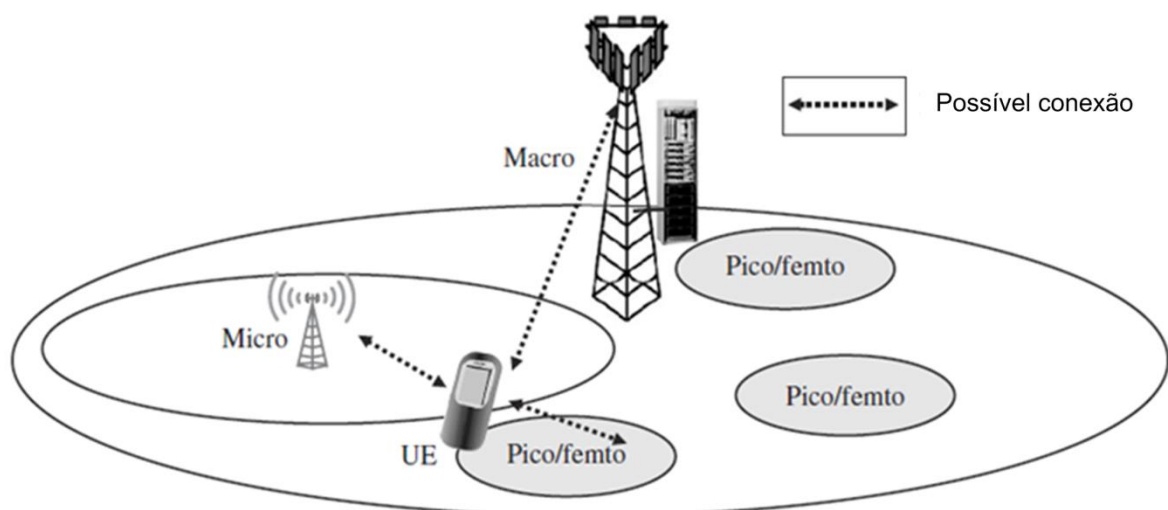
¹⁸ PDN (*Packet Data Network*) refere-se à rede IP externa à rede celular móvel.

para, por exemplo, fazer navegação web via browser HTTP ou, ainda, acessar um serviço de telefonia IP disponibilizado na Internet (ou seja, VoIP).

2.9 Redes Heterogêneas

Segundo Dahlman, Parkvall e Sköld (2013), redes heterogêneas são uma mistura de células com diferentes potências de transmissão de *downlink*, operando (parcialmente) com o mesmo conjunto de frequências e com coberturas geográficas que se sobrepõem, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 - Exemplo de Rede Heterogênea



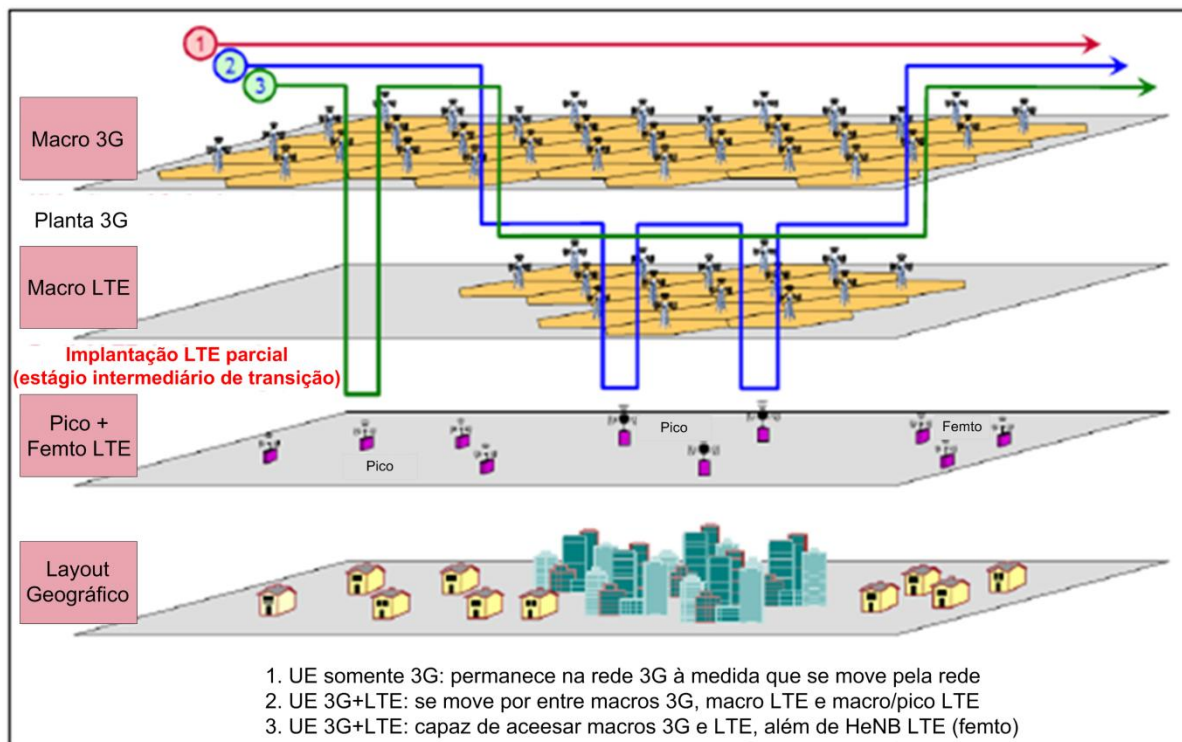
Fonte: adaptado de Holma & Toskala (2011)

Um exemplo típico é uma picocélula ou femtocélula colocada dentro da área de cobertura de uma macrocélula. Segundo Ali-Yahiya (2011a), em um ambiente heterogêneo, as estações móveis (UEs) podem se movimentar por entre as diferentes redes de acesso, se beneficiando das diferentes características de cada rede, como cobertura, banda, latência, consumo de potência, custo, etc.

Segundo (4G AMERICAS, 2012b), em redes LTE as femtocélulas podem ser ou empresariais ou estações domésticas, e neste último caso são chamadas de HeNB. As picocélulas também são chamadas de metrocélulas.

A Figura 4 ilustra um exemplo de *layout* geográfico sobre o qual são apresentadas três camadas, contendo tecnologias diferentes de estações base (3G Macro, LTE Macro e LTE Pico + Femto). Pode-se perceber, na ilustração, que as macrocélulas 3G ainda são onipresentes, enquanto que as estações LTE (4G) ainda encontram-se em fase de transição a médio prazo. Nesse cenário, as pico e femtocélulas apresentam-se intercaladas, interpenetrando as tecnologias 3G e 4G.

Figura 4 - Exemplo de ambientes e interações entre diferentes tipos de estações base



Fonte: adaptado de (4G AMERICAS, 2012b)

2.10 Arquitetura de Rede LTE Heterogênea

De acordo com Sesia et al. (2011), o uso de *small cells* (picocélulas e femtocélulas) está se tornando cada vez mais importante, devido à capacidade dessas estações base de proporcionarem aumento na capacidade do sistema, em comparação com redes homogêneas compostas por macrocélulas.

Geralmente, as *small cells* podem ser caracterizadas pelo uso de picocélulas (também conhecidas como *hotzone cells*), controladas por uma pico eNodeB, ou pelo uso de femtocélulas, controladas por uma *Home eNodeB* (HeNB). As definições de picocélulas e femtocélulas são um tanto variáveis. Porém, tipicamente, as principais características que fazem a distinção entre elas podem ser resumidas da seguinte maneira:

- Uma pico eNodeB geralmente controla múltiplas *small cells*, que são planejadas pela operadora da rede de forma similar às macrocélulas. Frequentemente, as picocélulas são instaladas em regiões de baixa elevação e operação com baixas potências em comparação com as macrocélulas. Em contraste, uma HeNB controla uma única célula e é instalada pelo próprio cliente (usuário registrado na operadora), normalmente sem qualquer planejamento.
- Femtocélulas são tipicamente células pertencentes a grupos fechados de assinantes (CSG – *Closed Subscriber Group*), acessíveis somente por um grupo

limitado de usuários. Isto contrasta com as picocélulas, que normalmente são abertas a todos os usuários (OSG – *Open Subscriber Group*), mas podem oferecer um tratamento diferenciado para alguns usuários, como por exemplo, para o *staff*¹⁹ de um estabelecimento privado.

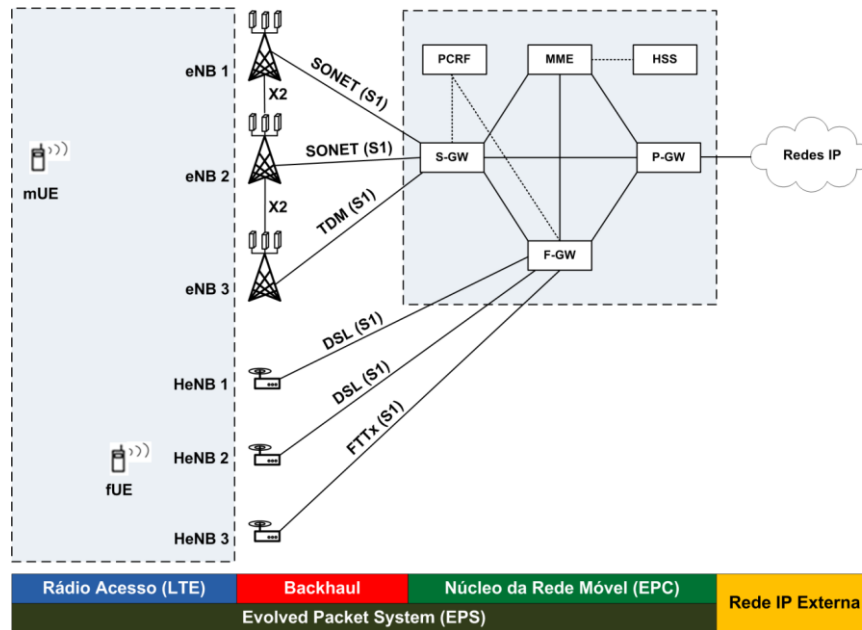
- c. As femtocélulas operam a baixas potências, sendo destinadas a áreas de coberturas que envolvem casas e apartamentos. Já as picocélulas operam com potências de transmissão mais altas, cobrindo empresas, *shopping centers* e outros tipos de *hotzones*. Podem também ser usadas simplesmente para estender a cobertura de macrocélulas.
- d. Femtocélulas não necessariamente têm as mesmas interfaces de rede das macro eNodeBs, enquanto que as pico eNodeBs (picocélulas) seguem os mesmos princípios de arquitetura lógica das macro eNodeBs (macrocélulas).

Na Figura 5, podemos observar que, por exemplo, não existem interfaces X2 entre HeNBs para comunicação direta entre femtocélulas como existem entre as eNodeBs. Outra observação é que o *backhaul*, no caso de femtocélulas, normalmente utiliza links de acesso via Internet (DSL, por exemplo). A banda larga DSL pode, inclusive, ser um link genérico com a Internet, o que obviamente impacta sobre a qualidade de serviço (QoS) que a femtocélula pode oferecer. No entanto, segundo Ulvan, A., Bestak, R. e Ulvan, M. (2010), além de link de dados usando cabo (DSL), uma femtocélula pode também utilizar uma solução de fibra óptica (FTTH/FTTx) no *backhaul* com o núcleo da rede da operadora.

O uso de um agregador de femtocélulas, um femto gateway (F-GW) na Figura 5, é opcional, segundo Sesia et al. (2011). Porém, a interface com o EPC é sempre S1, como ocorre com as eNodeBs.

¹⁹ No dicionário da língua portuguesa brasileira Michaelis, encontramos duas definições para a palavra inglesa *staff*: 1. Grupo qualificado de pessoas que se supõe possuam aptidão ou competência; 2. Grupo qualificado de pessoas que assistem um chefe ou dirigente, em empresas privadas ou governamentais.

Figura 5 - Arquitetura de Rede LTE Heterogênea



Fonte: própria

2.11 O Processo de Seleção de Célula

De acordo com Amzallag et al. (2013), o mecanismo de seleção de célula determina a estação base (ou estações base) que fornece serviço a uma estação móvel, um processo que é executado quando uma estação móvel se junta à rede (chamado de seleção de célula), ou quando o dispositivo móvel se movimenta no modo *idle* (chamado de re-seleção de célula).

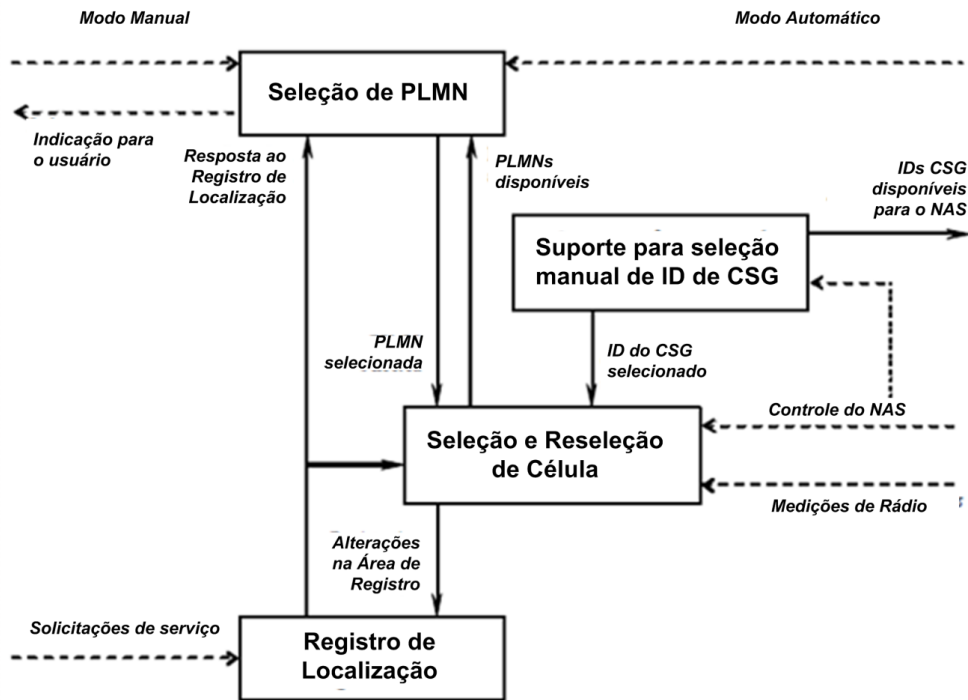
Na maioria dos sistemas celulares, o processo de seleção de célula é realizado através de um procedimento local, iniciado pelo dispositivo móvel, de acordo com a melhor SNR (*Signal-to-Noise Ratio*). Durante esse processo, o dispositivo móvel mede a SNR com relação a várias estações base que encontram-se dentro do alcance do rádio, mantém uma “fila de prioridade” com aquelas que são melhor detectadas (chamadas de conjunto ativo) e, então, envia uma solicitação oficial de serviço, candidatando-se a uma conexão com as estações base, seguindo a ordem da fila. Assim, a estação móvel é conectada à primeira estação base que responder positivamente à solicitação de serviço.

Segundo a especificação técnica do 3GPP em (3GPP, 2009), os procedimentos que incluem a seleção de célula podem ser divididos em quatro processos:

- a. Seleção de PLMN (*Public Land Mobile Network*);
- b. Seleção e re-seleção de célula;
- c. Registro de localização;
- d. Suporte à seleção manual de CSG ID (*Closed Subscriber Group ID*).

O relacionamento entre esses processos é ilustrado na Figura 6.

Figura 6 - Visão Geral de Processo de Seleção de Célula a Partir do Modo *Idle*



Fonte: adaptado de (3GPP, 2009)

Quando um UE é ligado, uma PLMN é selecionada pelo NAS (*Non-Access Stratum*). Para a PLMN selecionada, RATs (*Radio Access Technology*) associadas podem ser definidas. O NAS deve fornecer uma lista de PLMNs equivalentes, caso estejam disponíveis, que o AS (*Access Stratum*) usará para seleção e re-seleção de célula. No processo de seleção de célula, o UE procura por uma célula apropriada na PLMN selecionada e, então, escolhe aquela célula para fornecer serviços. Adicionalmente, o UE deverá sintonizar com o seu canal de controle. Esta escolha é conhecida como “acampar na célula” (*camping on the cell*). O UE deverá, se necessário, registrar sua presença por meio de um procedimento de registro do NAS, na área de rastreamento da célula escolhida e, como resultado de um Registro de Localização bem sucedido, a PLMN selecionada torna-se a PLMN registrada.

Caso o UE encontre uma célula mais apropriada, conforme o critério de seleção de célula, ele faz uma re-seleção para aquela célula e, então, acampa nessa célula. Se a nova célula não pertencer a pelo menos uma área de rastreamento à qual o UE esteja registrado, o procedimento de registro de localização é realizado. Se necessário, o UE deverá procurar por uma PLMN de prioridade mais alta a intervalos regulares de tempo e, então, procurar por uma célula apropriada, caso uma outra PLMN tenha sido selecionada pelo NAS. Se o UE perder a cobertura da PLMN registrada, uma nova PLMN é selecionada

automaticamente (modo automático), ou uma indicação de quais PLMNs estão disponíveis é dada ao usuário para que uma seleção manual possa ser feita (modo manual).

O Registro não é realizado somente nos casos de UEs que tenham a capacidade de usar serviços que não precisem de registro algum.

Os propósitos de acampar em uma célula no modo *idle* são:

- a. Habilita o UE a receber informações de sistema da PLMN.
- b. Quando registrado, e se o UE desejar estabelecer uma conexão RRC (*Radio Resource Control*), ele pode fazê-lo inicialmente acessando a rede através do canal de controle da célula na qual está acampado.
- c. Se a PLMN receber uma chamada para o UE registrado, ela conhece (na maioria dos casos) o conjunto de áreas de rastreamento (TA) onde encontra-se o UE. Então, a PLMN envia uma mensagem de *paging* para o UE através dos canais de controle de todas as células desse conjunto de áreas de rastreamento. Assim, o UE recebe a mensagem de *paging* porque está sintonizado no canal de controle de uma célula em uma das áreas de rastreamento registradas, e o UE poderá responder naquele canal de controle.
- d. Habilita o UE a receber notificações do ETWS (*Earthquake and Tsunami Warning System*).

Caso o UE não consiga encontrar uma célula apropriada para acampar ou caso o registro de localização venha a falhar, ele tenta acampar em uma célula independentemente da identidade da PLMN, e entra em um estado de “serviço limitado”, no qual pode apenas tentar fazer chamadas de emergência.

Um UE que não esteja equipado com um USIM (*Universal Subscriber Identity Module*) válido (ou seja, sem UICC (*Universal Integrated Circuit Card*) ou somente com um SIM (*Subscriber Identity Module*)), ou que deva considerar o USIM como inválido para serviços EPS, deve desabilitar todas as suas capacidades E-UTRAN (*Evolved UMTS Terrestrial Radio Access Network*) até que seja desligado ou até que o UICC que contém um USIM seja removido.

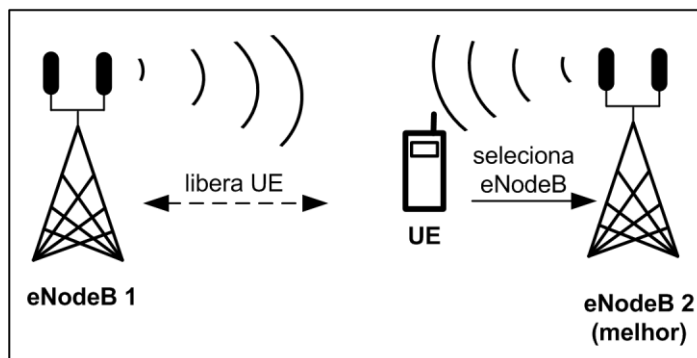
Observação: Isto se deve ao fato da *Release 8* do E-UTRAN/EPC não ter suporte a chamadas de emergência sem o USIM.

2.12 Seleção e Re-seleção de Célula

O UE deve realizar medições para os propósitos de seleção e re-seleção de célula, conforme especificado em (3GPP, 2009). A Figura 7 ilustra um cenário onde o UE faz uma

re-seleção, escolhendo a eNodeB 2 como sendo a melhor e levando-se em conta que cada uma das eNodeBs do exemplo é responsável pelo raio de cobertura de uma célula.

Figura 7 - Re-seleção de Célula



Fonte: própria

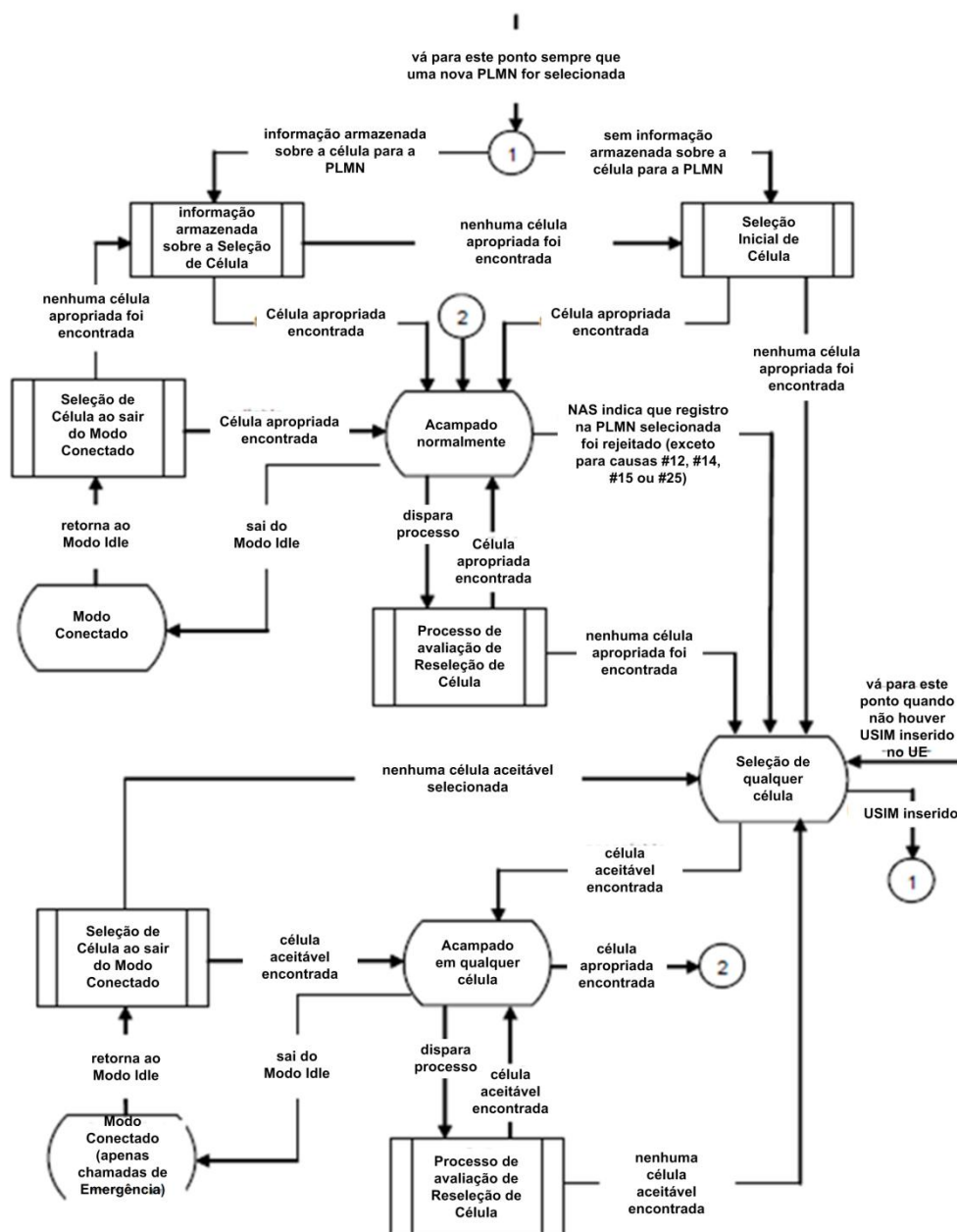
O NAS pode controlar os RATs nos quais a seleção de célula deve ser realizada, indicando, por exemplo, RATs associados à PLMN selecionada e mantendo uma lista de áreas de registro proibidas, bem como uma lista de PLMNs equivalentes. O UE deve selecionar uma célula apropriada, com base tanto em medições no modo *idle* quanto nos critérios de seleção de célula.

Com o objetivo de acelerar o processo de seleção de célula, informações armazenadas sobre vários RATs podem ser disponibilizadas no UE. Quando estiver acampado em uma célula, o UE deve regularmente procurar por uma célula melhor, de acordo com o critério de re-seleção de célula. Se uma célula melhor for encontrada, essa célula é selecionada. A mudança de célula pode implicar em uma mudança de RAT. Detalhes sobre os requisitos de desempenho para uma re-seleção de célula podem ser encontrados em (3GPP, 2009). O NAS é informado caso uma seleção ou re-seleção de célula resulte em mudança nas informações recebidas sobre o sistema, quando essas informações forem relevantes para o NAS. Para uma condição normal de serviço, o UE deve acampar em uma célula apropriada e sintonizar com o canal de controle dessa célula para que possa:

- a. Receber informações de sistema da PLMN; e
 - I. receber informações sobre a área de registro da PLMN; e
 - II. receber informações sobre outra AS e NAS; e
- b. caso esteja registrado:
 - I. receber mensagens de *paging* e notificações da PLMN; e
 - II. iniciar a transferência para o modo conectado.

A Figura 8 mostra os estados, as transições de estado e os procedimentos em RRC_IDLE. Sempre que uma nova seleção de PLMN for realizada, isso provoca uma saída para o ponto de número 1 na Figura 8.

Figura 8 - RRC_IDLE Cell Selection and Reselection



Fonte: adaptado de (3GPP, 2009)

Na Release 8 do LTE do 3GPP, o UE não leva em conta a capacidade oferecida pelas eNodeBs, mas apenas detecta as eNodeBs vizinhas, ranqueando essas estações por ordem decrescente de intensidade de sinal, o RSRP (*Reference Symbol Received Power*). Portanto, o RSRP é o parâmetro mais importante no processo de seleção de célula na Release 8. No entanto, o parâmetro RSRQ (*Reference Symbol Received Quality*), que além

da intensidade, leva também em consideração a interferência, é usado no processo de *handover* (etapa pós-seleção inicial) nessa *release* (SESIA et al., 2011).

Porém, a partir da *Release 9*, ambos RSRP e RSRQ são usados tanto no modo *IDLE* quanto no modo *CONNECTED*. Ou seja, na *Release 9*, RSRP e RSRQ são usados tanto no processo de seleção inicial de célula quanto em momentos de *handover*. Segundo Sesia et al. (2011), o uso de ambos, RSRP e RSRQ, mostram-se benéficos na obtenção de *handovers* de qualidade.

2.13 Handover

Segundo Ali-Yahiya (2011a), o *handover* é um mecanismo essencial para garantir a mobilidade em uma rede móvel, tendo por função principal a manutenção da conexão com tráfego à medida que o UE se move. A concepção por trás desse mecanismo é simples: quando um UE sai da cobertura de uma célula, entrando na cobertura de outra, é necessário que uma nova conexão com a célula de destino seja estabelecida, e que a conexão com a célula anterior seja desfeita. Portanto, normalmente o *handover* acontece quando o sinal da estação base atual se deteriora, em consequência degradando a qualidade das comunicações do UE com a rede. No entanto, é bom deixar claro que um procedimento de *handover* só ocorre quando o UE encontra-se no estado conectado (RRC_CONNECTED). Ou seja, *handover* só acontece após ter ocorrido um processo de seleção de célula que, por sua vez, ocorre quando o UE encontra-se no modo *idle* (RRC_IDLE), conforme descrito no item 2.12 (Seleção e Re-seleção de Célula).

Além disso, por necessidade de balanceamento de carga da rede, o *handover* pode ocorrer mesmo que o sinal da célula atual esteja bom. Um outro potencial contexto para a ocorrência de um *handover* é a expectativa de um QoS melhor, custo menor, largura de banda, etc, o que pode fazer com que o UE procure por estações que ofereçam melhores condições, como as citadas.

O processo de *handover* pode ser dividido em três fases: medição, decisão e execução, conforme mostra a Figura 9.

Figura 9 – Fases do *handover*

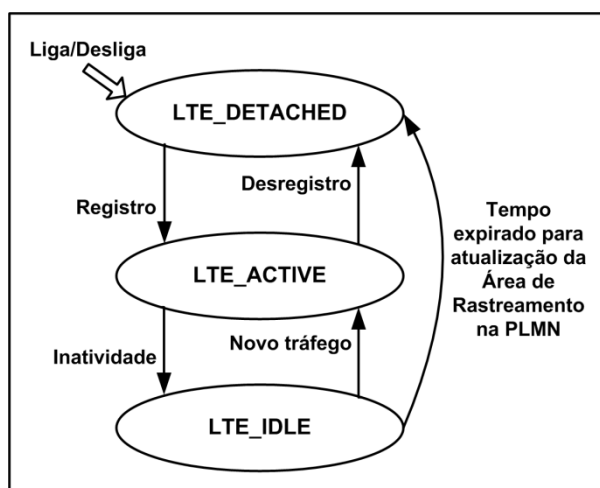


Fonte: adaptado de ALI-YAHIYA (2011a)

Segundo Ali-Yahiya (2011a), um UE pode estar em um desses três estados: LTE_DETACHED, LTE_IDLE e LTE_ACTIVE, conforme ilustrado na Figura 10.

O estado LTE_DETACHED é transitório e acontece quando o UE é ligado e está em processo de busca e registro em uma rede. No estado LTE_ACTIVE, o UE já encontra-se registrado na rede e possui uma conexão de rádio (RRC) com uma eNodeB. Nesse estado, a rede sabe à qual célula o UE pertence, podendo transmitir e receber dados do UE. LTE_IDLE é um estado de economia energética de bateria, no qual o UE normalmente não transmite nem recebe pacotes. Nesse estado, não há contexto²⁰ do UE armazenado na eNodeB. A única entidade que conhece o UE nesse estado, é o gerenciador de mobilidade (MME) e isto apenas em uma área de rastreamento (TA), que consiste em múltiplas eNodeBs, na qual o UE encontra-se registrado. É necessário um processo de *paging* para que o UE seja rastreado e localizado em uma célula, já que o MME conhece a última TA onde o UE encontrava-se registrado.

Figura 10 – Estados de um UE quanto à mobilidade



Fonte: adaptado de ALI-YAHIYA (2011a)

2.14 Balanceamento de Carga

Segundo Lobinger et al. (2010), em redes auto-organizáveis (SON), o balanceamento de carga é um mecanismo que tenta melhorar o desempenho da rede, realizando ajustes em parâmetros dessa rede, de forma a fazer com que células sobrecarregadas possam redistribuir seus tráfegos para células que apresentem menores níveis de carga.

Nesse contexto, um algoritmo de balanceamento de carga tem por objetivo, por exemplo, encontrar uma boa estratégia de *handover* entre células sobrecarregadas e possíveis células candidatas para as quais os tráfegos possam ser direcionados, resultando

²⁰ De acordo com Ali-Yahiya (2011a), o contexto de um UE inclui parâmetros de serviços de *bearer* IP e informações de roteamento interno da rede, bem como informações sobre o contexto de segurança e o contexto de RB (*Radio Bearer*).

em melhoria de desempenho da rede, através de uma melhor distribuição de cargas e redução da sinalização, cujos altos níveis (de sinalização) são presentes em redes sobrecarregadas devido às constantes tentativas de conexão, obtendo como resposta bloqueios de chamadas.

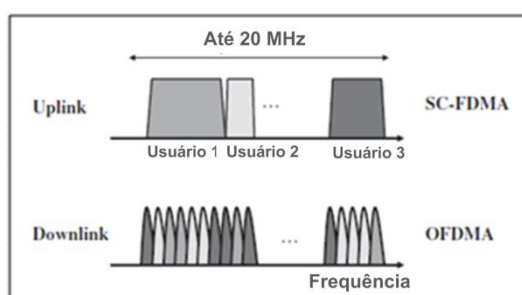
2.15 Mecanismos que Proporcionam Alta Vazão para um UE

O rádio acesso LTE se utiliza de um conjunto de tecnologias que garantem a alta eficiência espectral (capacidade de dados) em sua interface wireless com o UE. As principais tecnologias adotadas pelo LTE apresentam sua maior vazão no *downlink* com o UE. Os conceitos básicos sobre as técnicas de múltiplo acesso usadas pela rede são apresentadas a seguir, com base nos autores Holma & Toskala (2011).

O esquema de múltiplo acesso que o LTE utiliza no *downlink* é o OFDMA (Múltiplo Acesso por Divisão de Frequências Ortogonais). No *uplink*, o esquema utilizado é o SC-FDMA (Múltiplo Acesso por Divisão de Frequências por Portadora Única). Ambos os esquemas são derivados do FDMA e permitem comunicação simultânea com múltiplos dispositivos de usuário (UEs).

Para a *Release 8* do LTE, a máxima largura de banda disponibilizada por esses esquemas é de 20 MHz. Essas soluções fornecem ortogonalidade entre suas subportadoras, o que reduz a interferência e melhora a capacidade da rede. A Figura 11 ilustra a distribuição de usuários e subportadoras no espectro de frequências.

Figura 11 – Esquemas de múltiplo acesso no LTE



Fonte: adaptado de Holma & Toskala (2011)

A alocação de recursos no domínio da frequência ocorre com uma resolução de 180 KHz por bloco de recurso (RB). Isto é válido tanto para o *downlink* quanto para o *uplink*. Cada RB é composto por um conjunto de 12 subportadoras, cada uma com largura de banda de 15 KHz de ocupação no espectro de frequências. Ou seja, $1 \text{ RB} = 12 \text{ subportadoras} \times 15 \text{ KHz} = 180 \text{ KHz}$, cabendo em um *time slot* de 0,5 ms, o que também equivale a um bloco de recurso físico (PRB). A alocação de recurso acontece a cada Intervalo de Tempo de Transmissão (TTI) de 1 ms, que corresponde a um par de RBs (ou PRBs). Desta forma, para a menor banda alocada sendo 1,4 MHz, temos 6 RBs e para a

máxima banda de 20 MHz, temos 100 RBs disponíveis para alocação para os UEs, chegando a 1.200 subportadoras. A Tabela 2 resume as capacidades em RBs para cada banda em MHz.

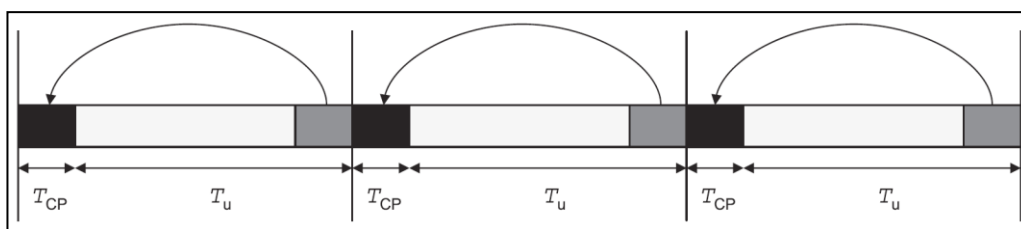
Tabela 2 – Largura de Banda ocupada no espectro de frequências

Largura de Banda (MHz)	1,4	3	5	10	15	20
Número de RBs	6	15	25	50	75	100

Fonte: adaptado de Ghaleb et al. (2013)

No LTE, a menor unidade de recurso é o Elemento de Recurso (RE), que consiste em uma subportadora de 15 KHz com o tempo de duração de um símbolo OFDM. Um RB corresponde a 84 REs para o caso de um tamanho normal de prefixo cíclico (CP) e 72 REs para o caso do prefixo cíclico estendido.

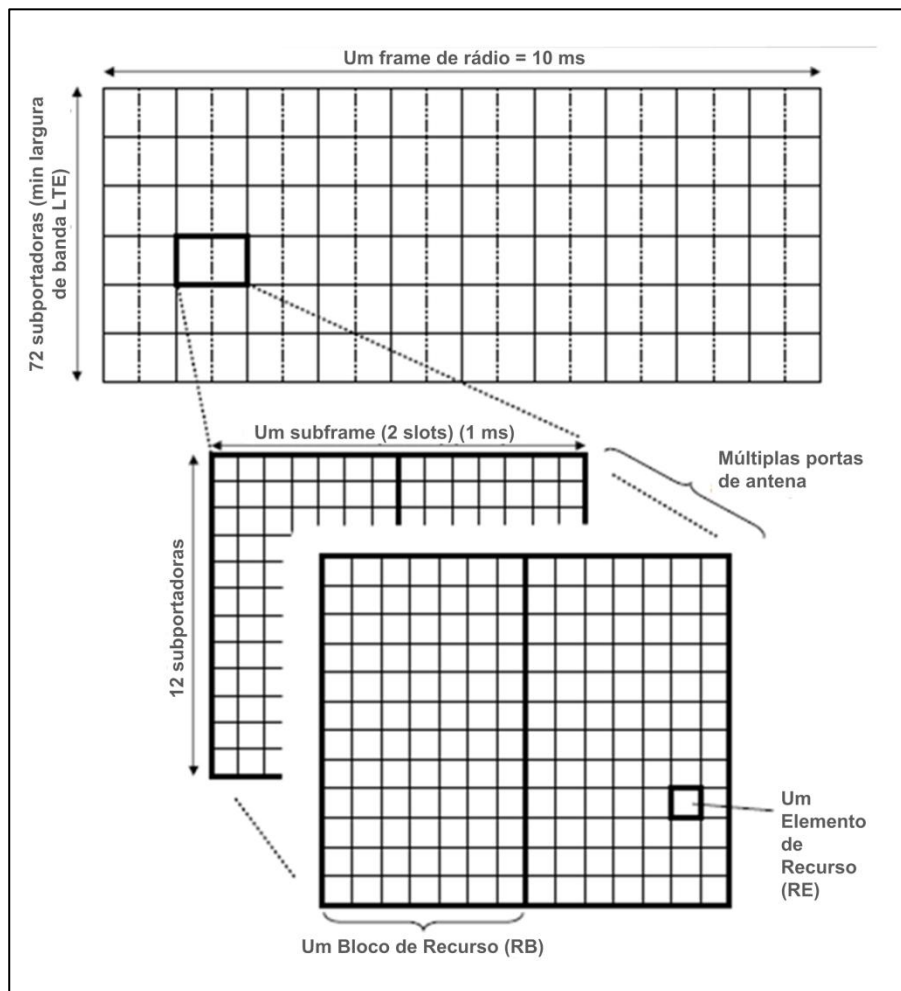
Figura 12 - Inserção do CP no símbolo OFDM



Fonte: Sesia et al. (2011)

O CP é um parâmetro usado no LTE para minimizar a interferência entre símbolos (ISI), e pode ser de tamanho normal ou estendido. O CP corresponde a um tempo de guarda colocado no início de cada símbolo OFDM a ser transmitido e é uma cópia do final do próprio símbolo, conforme ilustrado na Figura 12, e tem por objetivo eliminar o impacto da ISI causada pela propagação multipercurso, que é quando um mesmo sinal de origem chega ao seu destino por vários caminhos diferentes, resultando em tempos diferentes de chegada desses sinais idênticos. A estrutura básica de recursos que podem ser alocados pelo LTE é ilustrada na Figura 13.

Figura 13 - Estrutura básica de recursos do LTE



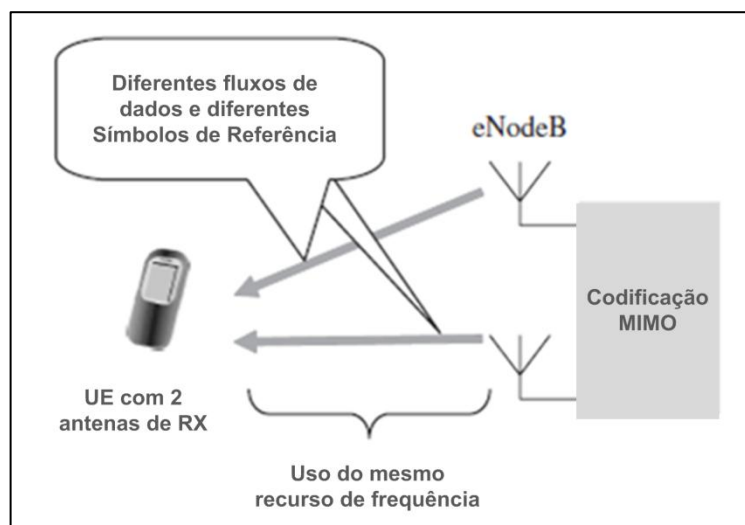
Fonte: adaptado de Sesia et al. (2011)

O consumo dos RBs por parte dos UEs depende das demandas de banda originadas das aplicações em execução nos UEs, bem como da autorização da entidade de gerenciamento de mobilidade (MME), que após consultar a base de dados de assinantes (HSS) e a base de dados de política de uso (PCRF) para um determinado UE, decide por liberar ou não mais recursos para esse dispositivo móvel. Isso depende do nível de serviço contratado pelo usuário (SLA – *Service Level Agreement*) e do nível de sobrecarga da rede.

O *throughput* que se pode obter dos RBs depende do esquema de modulação e da taxa de codificação usados no canal. As opções de métodos de modulação são QPSK (2 bits por símbolo), 16QAM (4 bits por símbolo) e 64QAM (6 bits por símbolo). A escolha da ordem de modulação depende da qualidade do canal e da categoria do UE (poder de processamento, algoritmos otimizados, tecnologias de processamento digital de sinais (DSP), quantidade de memória, etc). Quanto melhor a qualidade do canal e maior a categoria do UE, maior a ordem de modulação que pode ser utilizada, sendo que a máxima é 64QAM. Quanto à taxa de codificação, à medida que as condições de rádio se deterioram,

o sistema aumenta a taxa de codificação e reduz o tamanho do bloco de transporte alocado (TBS²¹). O *throughput* também depende do número de antenas usadas (MIMO), tanto na eNodeB quanto no UE, Figura 14.

Figura 14 - Exemplo de MIMO para um único UE



Fonte: adaptado de Holma & Toskala (2011)

A baixa qualidade de sinal obriga as estações a reduzirem a ordem (esquema) de modulação (de 64QAM caindo 16QAM ou para QPSK, por exemplo), o que degrada a eficiência espectral (a quantidade de bits por hertz) e, conseqüentemente, reduz a capacidade de disponibilização de recursos da estação base.

No caso do *uplink*, a alocação de recursos é contígua, viabilizando assim a transmissão por portadora única. Para o *downlink*, onde a banda liberada para o usuário é geralmente muito maior, os recursos são alocados livremente de diferentes partes do espectro de frequências. A solução de portadora única no *uplink* foi projetada de maneira a promover a eficiência energética para o amplificador de potência do UE, já que sua capacidade de bateria é infinitamente limitada quando comparada à capacidade de uma eNodeB.

O LTE é flexível quanto ao uso do espectro de frequências, permitindo que a largura de banda a ser transmitida possa ser selecionada entre valores que vão de 1.4 MHz até 20 MHz. A largura de banda de 20 MHz consegue fornecer até 150 Mbit/s no *downlink* como taxa de dados de usuário, no caso de uso de MIMO 2 X 2. No caso de MIMO 4 X 4, o LTE suporta até 300 Mbit/s de taxa de dados no *downlink*. Com relação ao *uplink*, a taxa de pico pode chegar à 75 Mbit/s.

²¹ O método adotado para o LTE Release 8 para a determinação do TBS, consta do Apêndice A deste trabalho.

Para tratar de erros nos pacotes de dados, o LTE usa um mecanismo de retransmissão na camada física, conhecido como Solicitação de Retransmissão Automática Híbrida (HARQ). Para mais detalhes sobre HARQ, pode-se consultar Sesia et al. (2011).

Quanto ao espectro de frequências reservado para *wireless*, as faixas especificadas para o LTE pelo 3GPP podem ser pareadas (usadas aos pares), no caso de duplexação por divisão de frequência (FDD), ou não pareadas para o caso de duplexação por divisão no tempo (TDD), conforme mostrado nas Figuras 15 e 16.

Figura 15 - Faixas de frequência para FDD

Operating band	3GPP name	Total spectrum	Uplink (MHz)	Downlink (MHz)
Band 1	2100	2 × 60 MHz	1920–1980	2110–2170
Band 2	1900	2 × 60 MHz	1850–1910	1930–1990
Band 3	1800	2 × 75 MHz	1710–1785	1805–1880
Band 4	1700/2100	2 × 45 MHz	1710–1755	2110–2155
Band 5	850	2 × 25 MHz	824–849	869–894
Band 6	800	2 × 10 MHz	830–840	875–885
Band 7	2600	2 × 70 MHz	2500–2570	2620–2690
Band 8	900	2 × 35 MHz	880–915	925–960
Band 9	1700	2 × 35 MHz	1750–1785	1845–1880
Band 10	1700/2100	2 × 60 MHz	1710–1770	2110–2170
Band 11	1500	2 × 25 MHz	1427.9–1452.9	1475.9–1500.9
Band 12	US700	2 × 18 MHz	698–716	728–746
Band 13	US700	2 × 10 MHz	777–787	746–756
Band 14	US700	2 × 10 MHz	788–798	758–768
Band 17	US700	2 × 12 MHz	704–716	734–746
Band 18	Japan800	2 × 15 MHz	815–830	860–875
Band 19	Japan800	2 × 15 MHz	830–845	875–890
Band 20	EU800	2 × 30 MHz	832–862	791–821
Band 21	1500	2 × 15 MHz	1447.9–1462.9	1495.9–1510.9
Band 22	3500	2 × 90 MHz	3410–3500	3510–3600
Band 23	S-band	2 × 20 MHz	2000–2020	2180–2200
Band 24	L-band	2 × 34 MHz	1626.5–1660.5	1525–1559

Figura 16 - Faixas de frequência para TDD

Operating band	3GPP name	Total spectrum	Uplink and downlink (MHz)
Band 33	UMTS TDD1	1 × 20 MHz	1900–1920
Band 34	UMTS TDD2	1 × 15 MHz	2010–2025
Band 35	US1900 UL	1 × 60 MHz	1850–1910
Band 36	US1900 DL	1 × 60 MHz	1930–1990
Band 37	US1900	1 × 20 MHz	1910–1930
Band 38	2600	1 × 50 MHz	2570–2620
Band 39	UMTS TDD	1 × 40 MHz	1880–1920
Band 40	2300	1 × 100 MHz	2300–2400
Band 41	2600 US	1 × 194 MHz	2496–2690

Fonte: Holma & Toskala (2011)

2.16 QoS no LTE

Conforme descrito por Ali-Yahiya (2011a), QoS é um termo amplo usado para descrever a experiência global que um usuário ou aplicação irá receber (ou perceber) ao longo da rede. Envolve uma ampla gama de tecnologias, arquiteturas e protocolos, a partir dos quais as operadoras de rede alcançam uma qualidade de serviço fim-a-fim, através da garantia de que os elementos de rede darão um tratamento consistente aos fluxos de dados à medida que atravessam essa rede.

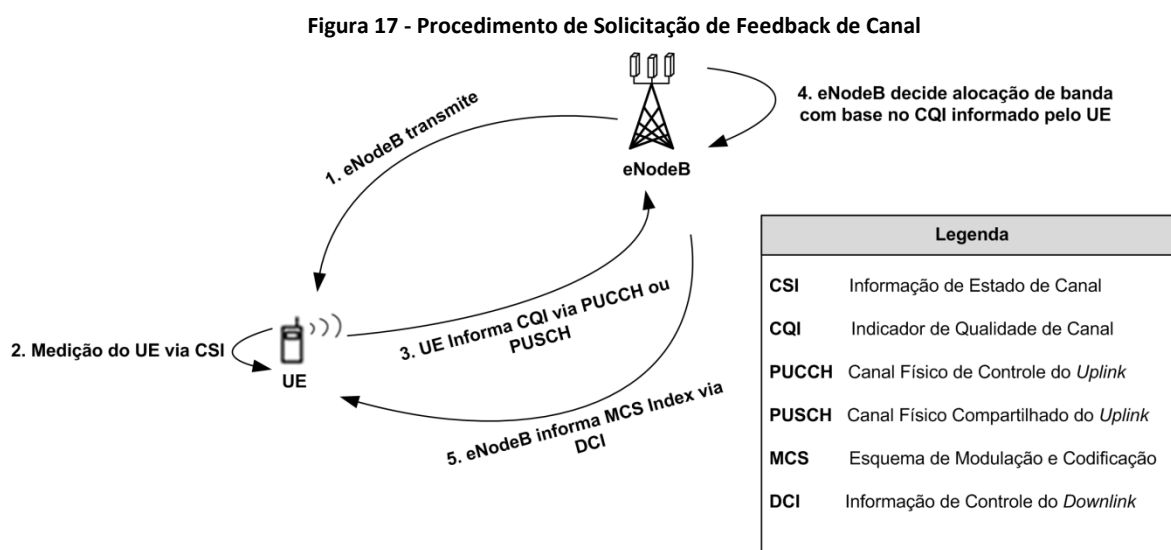
Alguns dos compromissos das redes de acesso LTE constituem-se em prover o suporte a altos valores de *throughput*, baixa latência, facilidades *plug and play*, os modos de

duplexação FDD e TDD, tudo na mesma plataforma, o que proporcionará uma qualidade de experiência melhor e mais rica para os usuários, bem como a habilidade de fornecer serviços e aplicações sofisticados, tais como VoIP, *streaming* de vídeo de alta definição, jogos em ambiente móvel, além de transferência de arquivos no modo ponto-a-ponto. Portanto, as tecnologias adotadas no *backhaul* devem suportar de maneira eficiente esses serviços que exigem intenso uso de largura de banda, garantindo qualidade e persistente aderência a SLAs fim-a-fim. Assim sendo, a tecnologia deve prover suporte a qualquer serviço, de qualquer ponto para qualquer ponto, em qualquer escala, ao menor custo por bit. Os subitens se seguem abordam elementos que guardam relação com QoS em redes LTE.

2.16.1 Inferências sobre a Qualidade do Canal para Maximização de Alocação de Recursos

De acordo com Holma & Toskala (2011), a eNodeB solicita medição do CSI (*Channel State Information*) ao UE que, ao fornecer *feedback* através dos canais de controle PUCCH (*Physical Uplink Control Channel*) ou PUSCH²² (*Physical Uplink Shared Channel*), informa um dos principais indicadores de qualidade do canal, o CQI (*Channel Quality Information*), conforme Tabela 4 adiante. No entanto, além do CQI, o UE pode informar também um RI (*Rank Indicator*) e um PMI (*Precoding Matrix Index*), brevemente descritos adiante.

Com base no CQI informado pelo UE, a eNodeB envia um MCS Index (*Modulation and Coding Scheme Index*), conforme Tabela 3, ao UE, indicando o esquema de modulação e codificação equivalente ao máximo de banda que o canal suporta, conforme ilustrado na Figura 17.



Fonte: adaptado de Holma & Toskala (2011)

²² O canal PUSCH é essencialmente usado para o tráfego de dados no *uplink*. Porém, em certos momentos, também pode ser utilizado para o tráfego de sinalização também referente ao *uplink*.

Na *Release 8* do LTE, o UE pode informar à eNodeB itens como, por exemplo, o CQI, a categoria do UE, o RI e o PMI. No entanto, RI e PMI só são usados em casos de operação com MIMO (uso de múltiplas antenas). Porém, deve-se considerar que o *MCS Index* informado pela eNodeB pode não equivaler ao máximo de vazão suportável pelo canal, pois está no poder da eNodeB conceder ou não a vazão indicada pelo UE, processo este que depende de fatores como, por exemplo, sobrecarga nos recursos da rede e controle admissão das eNodeBs, que podem restringir a criação de *Dedicated EPS bearers* (mecanismo de criação de sessões para as aplicações, com níveis de QoS) com base no perfil de serviço contratado pelo usuário, etc.

Tabela 3 - *MCS Index*, Ordem de Modulação e *TBS Index* para o PDSCH

MCS Index I_{MCS}	Modulation Order Q_m	TBS Index I_{TBS}
0	2	0
1	2	1
2	2	2
3	2	3
4	2	4
5	2	5
6	2	6
7	2	7
8	2	8
9	2	9
10	4	9
11	4	10
12	4	11
13	4	12
14	4	13
15	4	14
16	4	15
17	6	15
18	6	16
19	6	17
20	6	18
21	6	19
22	6	20
23	6	21
24	6	22
25	6	23
26	6	24
27	6	25
28	6	26
29	2	reserved
30	4	
31	6	

Fonte: (3GPP, 2008)

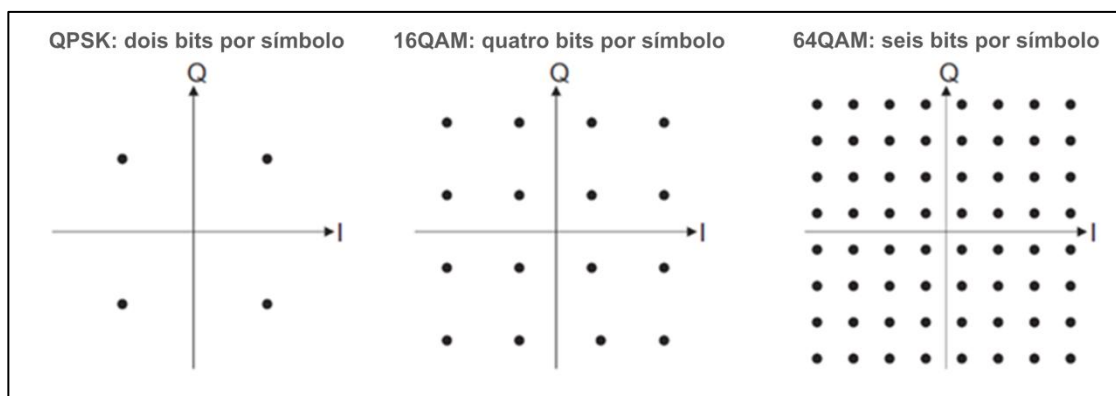
Ainda de acordo com os autores Holma & Toskala (2011), dentre as informações enviadas do UE à eNodeB, o CQI é a mais importante, pelo fato de fornecer informações sobre os parâmetros de adaptação do link que o UE espera suportar por ocasião da geração do CQI, levando em conta:

- a. Modo de transmissão (Tabela 6);
- b. Tipo de receptor;
- c. Número de antenas;
- d. Situação de interferência experimentada pelo UE.

2.16.2 Influência da Qualidade do Canal na Alocação de Recursos

O CQI, que reflete a qualidade do canal percebida pelo UE, é definido por uma tabela que contém 16 entradas, cada uma equivalendo a um esquema de modulação (QPSK, 16QAM e 64QAM) e a uma taxa de codificação, conforme ilustrado na Figura 18 (esquemas de modulação) e detalhado na Tabela 4.

Figura 18 - Constelações de Esquemas de Modulação aplicáveis à transmissão do PDSCH



Fonte: adaptado de Sesia et al. (2011)

O UE relata à eNodeB o mais alto índice de CQI, que corresponda ao MCS e TBS (*Transport Block Size*) para o qual a BLER (*Block Error Rate*) não exceda 10% do bloco de transporte de *downlink*, estimado na recepção do sinal da eNodeB pelo UE.

O RI é a recomendação do UE com relação ao número de camadas (streams) a serem utilizadas na multiplexação espacial. O RI só é reportado quando o UE está operando nos modos MIMO com multiplexação espacial (modos de transmissão 3 e 4, descritos adiante). No caso de operação com uma única antena ou no caso de diversidade de transmissão, o RI não é reportado (SESIA et al., 2011).

Tabela 4 – CQI (Informação sobre a Qualidade do Canal)

Índice de CQI	Modulação	Taxa de Codificação x 1024	Redundância Inserida (overhead) ²³	Bits por Elemento de Recurso (RE)
0		fora da faixa		
1	QPSK	78		0,1523
2	QPSK	120		0,2344
3	QPSK	193		0,3770
4	QPSK	308		0,6016
5	QPSK	449		0,8770
6	QPSK	602		1,1758
7	16QAM	378		1,4766
8	16QAM	490		1,9141
9	16QAM	616		2,4063
10	64QAM	466		2,7305
11	64QAM	567		3,3223
12	64QAM	666		3,9023
13	64QAM	772		4,5234
14	64QAM	873		5,1152
15	64QAM	978		5,5547

Fonte: adaptado de Holma & Toskala (2011)

O PMI fornece informação sobre a matriz de pré-codificação preferida, no caso de pré-codificação baseada em *codebook*. Da mesma forma que o RI, o PMI só é relevante nos casos de operação MIMO. A operação MIMO com *feedback* PMI é chamada de *Closed-Loop* MIMO. O *feedback* do PMI é restrito aos modos de transmissão 4, 5 e 6, descritos adiante. O número de matrizes de pré-codificação no *codebook* depende do número de portas de antena na eNodeB: para o caso de duas portas de antena, existem sete matrizes para escolha, enquanto que para quatro portas de antena, o número total pode chegar a 64, dependendo do RI e da capacidade do UE (SESIA et al., 2011).

2.16.3 Garantia de QoS para as Aplicações

Segundo Sesia et al. (2011), várias aplicações podem estar em execução ao mesmo tempo no UE, cada uma com seu requisito de QoS. Por exemplo, um UE pode estar em uma chamada VoIP enquanto, ao mesmo tempo, pode estar navegando em uma página web ou fazendo transferência de arquivos via FTP. Já a aplicação VoIP tem exigências mais críticas quanto a QoS em termos de *delay* e *jitter* em comparação com navegação web (HTTP/HTTPS) ou transferência de arquivos via FTP, enquanto que o FTP exige uma taxa de perda de pacotes muito mais baixa. Sendo assim, com o propósito de fornecer suporte aos múltiplos requisitos de QoS, *bearers* diferentes são configurados no EPS, cada um associado a um nível de QoS.

Um *bearer* é uma espécie de túnel ao qual são associados uma Classe de QoS (QCI) e uma Prioridade de Alocação e Retenção (ARP), este último governando à preempção durante o estabelecimento de um novo *bearer* em casos de congestionamento

²³ O *overhead* está representado à direita pela cor vermelha.

da rede (SESIA et al., 2011). Em termos gerais, os *bearers* podem ser classificados em duas categorias, dependendo do tipo de QoS que eles fornecem:

- a. **Bearers com Garantia Mínima de Taxa de Bit (GBR):** usados para aplicações como VoIP. Esses *bearers* têm valores de GBR a eles associados e para os quais recursos de transmissão são **alocados de forma permanente**, no momento da criação ou modificação do *bearer*. Essa alocação permanente pode ser realizada, por exemplo, por uma função de controle de admissão na eNodeB. Taxas de bit mais altas que o GBR podem ser permitidas ao *bearer* desde que haja recursos disponíveis. Nesses casos, um parâmetro de Taxa Máxima de Bit (MBR), que também pode ser associado a um *bearer* GBR, estabelece um limite superior de taxa de bit que pode ser esperado por esse *bearer* GBR.
- b. **Bearers Não-GBR:** não garantem quaisquer taxas de bit em particular. Podem ser usados para navegação web ou transferência de arquivos usando FTP. Nesses casos, esses *bearers* não recebem **nenhuma alocação permanente** de largura de banda.

Na rede de acesso, é de responsabilidade da eNodeB assegurar que o QoS necessário a um *bearer* seja alcançado na interface de rádio (SESIA et al., 2011). Cada QCI é caracterizado por sua prioridade, *delay* de pacote e uma taxa aceitável de perda de pacotes. O *label* do QCI de um *bearer* determina a forma como será tratado na eNodeB. O conjunto de QCIs padronizados e suas características, a partir das quais o PCRF em um EPS pode selecionar, são mostrados na Tabela 5:

Tabela 5 - QCIs para LTE

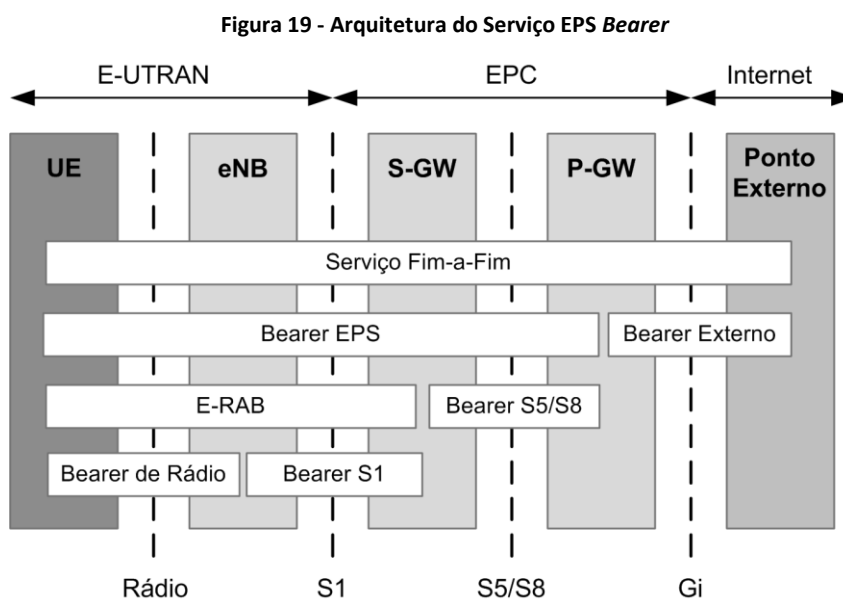
QCI	Tipo de recurso	Prioridade	Retardo de pacote (ms)	Taxa de perda por erro de pacote	Exemplo de serviços
1	GBR	2	100	10^{-2}	Conversação por voz (VoIP)
2		4	150	10^{-3}	Conversação por vídeo (<i>streaming</i> ao vivo)
3		5	300	10^{-6}	Vídeo sem conversação (<i>streaming</i> bufferizado)
4		3	50	10^{-3}	Jogo em tempo real
5	Não-GBR	1	100	10^{-6}	Sinalização IMS
6		7		10^{-3}	Voz, vídeo (<i>streaming</i> ao vivo) e jogo interativo
7		6	300	10^{-6}	Vídeo (<i>streaming</i> bufferizado)
8		8			Aplicações baseadas em TCP, como www, e-mail, bate-papo, FTP, compartilhamento de arquivos p2p, vídeo progressivo, etc.
9		9			

Fonte: Adaptado de Holma & Toskala (2011) e Sesia, Toufik e Baker (2011)

Segundo os autores Holma & Toskala (2011), o propósito geral da adoção da lógica dos *bearers* é minimizar a necessidade de conhecimento sobre QoS e de configuração no UE, de forma a tornar viável o controle de recursos pela própria rede, que decide como os

parâmetros relativos a QoS serão configurados. O parâmetro ARP de um *bearer* é usado para o controle de admissão de chamadas. Ou seja, serve para decidir se um *bearer* deve ou não ser estabelecido em caso de congestionamento dos recursos de rádio. Além disso, o ARP governa a priorização do *bearer* quanto à preempção relativa à solicitação de estabelecimento de um novo *bearer*.

A Figura 19 mostra que um *EPS Bearer* só pode garantir QoS dentro dos limites do sistema que compreende o rádio acesso LTE (E-UTRAN) e o EPC (núcleo da rede). Ou seja, partindo do UE, o EPS só garante o QoS até o roteador de saída da rede móvel, o P-GW. A partir do P-GW e entrando na Internet, o QoS só poderá ser garantido por outro mecanismo, que na Figura 19 é indicado como *External Bearer*.

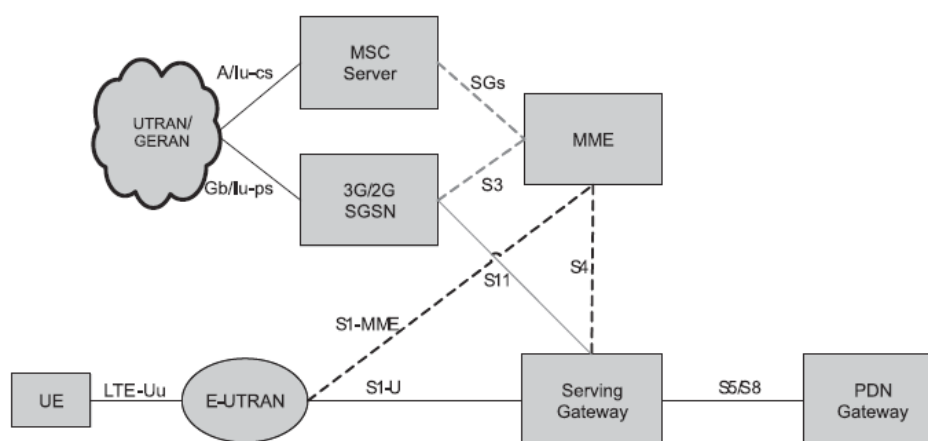


Fonte: Adaptado de SESIA et al. (2011)

De acordo com os autores Holma & Toskala (2011), como parte do procedimento através do qual o UE se conecta à rede, o UE recebe um endereço IP atribuído pelo P-GW e pelo menos um *bearer* é estabelecido: o **Default Bearer**, que permanece estabelecido durante todo o tempo em que durar a conexão com a PDN (*Packet Data Network*), com a finalidade de fornecer uma conectividade IP sempre ativa com aquela PDN. Os valores iniciais para esse *default bearer* são atribuídos pela Entidade Gerenciadora de Mobilidade (MME), com base nos dados da assinatura do usuário (contrato de serviço com o usuário) recuperados do servidor onde ficam armazenadas essas informações, o HSS (*Home Subscription Server*). O PCEF (*Policy Control Enforcement Function*) pode alterar esses valores através de interação com o PCRF ou de acordo com alguma configuração local. No entanto, *bearers* adicionais, chamados de **Dedicated Bearers**, também podem ser estabelecidos a qualquer momento durante ou depois do processo de conexão estar

completo. Um *dedicated bearer* pode ser do tipo GBR ou Não-GBR. O *default bearer* sempre será do tipo Não-GBR, já que ele fica estabelecido permanentemente. A diferença entre *default* e *dedicated bearer* deve ser transparente para a rede de acesso (E-UTRAN, por exemplo). No caso de *dedicated bearers*, os valores do parâmetro de QoS em nível de *bearer* são atribuídos pelo PCRF, que os envia ao P-GW (roteador que dá acesso à rede IP externa) que, por sua vez, os repassa ao S-GW (roteador que agrega as eNodeBs). De maneira transparente, o MME apenas repassa esses valores recebidos do S-GW, através do ponto de referência S11 (indicado na Figura 20), ao E-UTRAN (rede de acesso LTE).

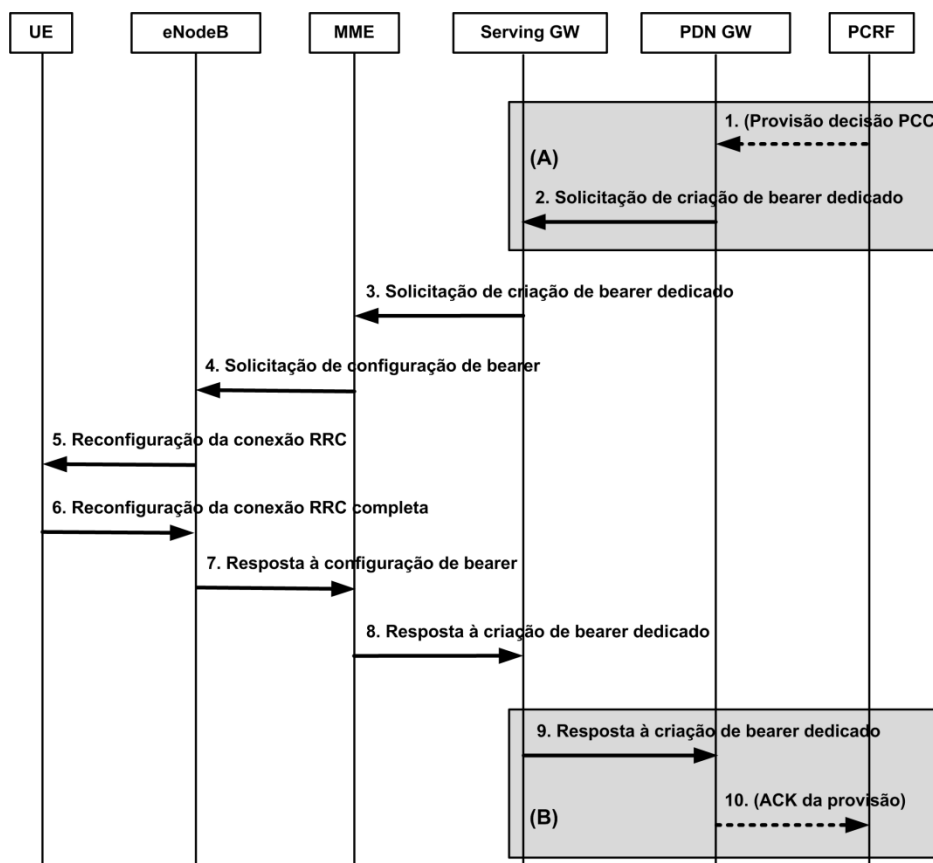
Figura 20 - Arquitetura de internetworking 3G UMTS



Fonte: Holma & Toskala (2011)

A Figura 21 ilustra um exemplo de fluxo de mensagens entre os componentes EPS para o estabelecimento de um *bearer* LTE/SAE.

Figura 21 - Exemplo de fluxo de mensagens para estabelecimento de *bearer* LTE/SAE



Fonte: adaptado de Holma & Toskala (2011)

Segundo Holma & Toskala (2011), as mensagens de 6 a 10 servem para confirmar que os *bearers* foram configurados corretamente.

2.16.4 Liberação de Recursos pela eNodeB com Base no QoS de uma Aplicação

Ao receber o QCI enviado pelo UE, a eNodeB vai liberando RBs (*Resource Blocks*) em quantidade suficiente para garantir o QoS para a aplicação, desde que a quantidade de RBs necessários esteja disponível ou que possa ser retirada de outro(s) UE(s) que tenham prioridade mais baixa que o UE solicitante (HOLMA & TOSKALA, 2011).

2.16.5 Requisitos de QoS Diferentes para um mesmo UE

A cada aplicação no cliente (UE) corresponde um endereço IP (único) do UE e uma porta (TCP ou UDP) vinculada à aplicação (por exemplo, 80/TCP para *web browsing*, 20/TCP e 21/TCP para transferência de arquivos via FTP, etc). Então, para cada par IP/porta, a eNodeB cria um *EPS Bearer*, que corresponde a um QoS específico a cada aplicação em execução. Ou seja, um UE pode ter várias *EPS Bearers* ativas simultaneamente em um dado momento (HOLMA & TOSKALA, 2011).

Caso a eNodeB não consiga atender ao requisito de QoS mínimo para uma determinada aplicação, ela rejeita a criação da *Dedicated EPS Bearer*, informando ao UE que não há recursos suficientes para atender ao QoS solicitado.

2.17 Modos de Transmissão MIMO

Com o objetivo de obter uma operação robusta e eficiente, o UE precisa conhecer com antecedência que tipo de transmissão deverá ocorrer, para que possa evitar decodificações às cegas (ALI-YAHIYA, 2011a), aumento na complexidade do receptor e, possivelmente, um aumento no número de erros de sinalização (HOLMA & TOSKALA, 2011). Aliás, o UE depende do modo de transmissão a ser usado para que possa fornecer um *feedback* significativo sobre o canal. Por exemplo, o CQI depende do modo de transmissão a ser adotado.

Portanto, cada UE é configurado semi-estaticamente, via sinalização RRC, para um determinado modo de transmissão. O modo de transmissão define que tipo de transmissão no *downlink* o UE deve esperar que ocorra (diversidade de transmissão ou multiplexação espacial *closed-loop*, por exemplo) e isso restringe o *feedback* do canal aos modos correspondentes à operação desejada. Conforme mostra a Tabela 6, são sete os modos de transmissão definidos para a *Release 8* do LTE, cujos detalhes podem ser obtidos dos autores Holma & Toskala (2011):

Tabela 6 - Resumo dos modos de transmissão no *downlink*

Modo	Nome
1	Antena com uma única porta (porta 0)
2	Diversidade de transmissão
3	Multiplexação espacial <i>open-loop</i>
4	Multiplexação espacial <i>closed-loop</i>
5	MIMO multiusuário
6	Pré-codificação com <i>Rank = 1 closed-loop</i>
7	Antena com uma única porta (porta 5). Pode ser usado na operação com <i>beamforming</i>

Fonte: Holma & Toskala, 2011

2.18 Physical Downlink Shared Channel (PDSCH)

De acordo com Sesia et al. (2011), no LTE, o PDSCH é o principal canal de dados no *downlink*, sendo utilizado para todos os dados do usuário, bem como para o *broadcast* de informações de sistema. O PDSCH transporta dados em unidades conhecidas como *Transport Blocks* (TBs), sendo que cada TB corresponde a um *Protocol Data Unit* (PDU) da camada *Medium Access Control* (MAC).

A transmissão de dados é feita durante o tempo de um *subframe* de rádio, que é de 1 ms, que corresponde a 1 TTI (*Time Transmission Interval*). Quando o canal PDSCH é

utilizado para transmissão de dados, um ou dois TBs podem ser transmitidos por UE por *subframe*. Para mais detalhes sobre o canal PDSCH, consultar Sesia et al. (2011).

2.19 Categorias de UE

Segundo Holma & Toskala (2011), o LTE *Release 8* do 3GPP define cinco categorias de terminais (UE), com diferentes capacidades quanto às taxas de bit suportadas. A categoria 1 é a de mais baixa capacidade, com taxas de 10 Mbit/s no *downlink* e 5 Mbit/s no *uplink*. Já a categoria 5 é a de mais alta capacidade, com taxas de 300 Mbit/s no *downlink* e 75 Mbit/s no *uplink*. Na prática, a taxa de bits é definida como o máximo Tamanho do Bloco de Transporte (TBS) que um UE é capaz de processar em um intervalo de tempo de 1 ms.

Todas as categorias de UE devem suportar todas as opções de largura de banda de RF, que vão de 1.4 até 20 MHz no espectro de frequências, bem como suportar a técnica de modulação 64QAM no *downlink* e de 1 a 4 setores de transmissão nas antenas das eNodeBs. A diversidade de antenas na recepção torna-se obrigatória, dependendo das exigências de desempenho. O suporte de transmissão MIMO depende da categoria do UE. A categoria 1, por exemplo, não necessita de suporte a qualquer tipo de MIMO, enquanto que as categorias 2, 3 e 4 suportam MIMO 2x2. A categoria 5 suporta MIMO 4x4 (SESIA et al., 2011). A técnica de modulação no *uplink* é de até 16QAM para as categorias de 1 à 4, enquanto que a categoria 5 suporta 64QAM no *uplink*. A Tabela 7 resume as capacidades das diferentes categorias de UE, em conformidade com a *Release 8* do LTE do 3GPP.

Tabela 7 - Categorias de UEs

	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4	Categoria 5
Taxa de pico de <i>downlink</i> (aprox.)	10 Mbit/s	50 Mbit/s	100 Mbit/s	150 Mbit/s	300 Mbit/s
Taxa de pico de <i>uplink</i> (aprox.)	5 Mbit/s	25 Mbit/s	50 Mbit/s	50 Mbit/s	75 Mbit/s
Max bits recebidos dentro do TTI	10.296	51.024	102.048	149.776	299.552
Max bits transmitidos dentro do TTI	5.160	25.456	51.024	51.024	75.376
Largura de banda de RF	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz	20 MHz
Modulação no <i>downlink</i>	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM	64QAM
Modulação no <i>uplink</i>	16QAM	16QAM	16QAM	16QAM	64QAM
Diversidade no receptor	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim
Diversidade na eNodeB	1 a 4 TX	1 a 4 TX	1 a 4 TX	1 a 4 TX	1 a 4 TX
MIMO <i>downlink</i>	Opcional	2 x 2	2 x 2	2 x 2	4 x 4

Fonte: Holma & Toskala (2011)

2.20 Considerações Finais

Este capítulo abordou os principais elementos que compõem a arquitetura SAE de uma rede móvel celular heterogênea (HetNet) de quarta geração (4G), incluindo o dispositivo móvel (UE), o rádio acesso (E-UTRAN ou LTE), as estações base (macrocélula, picocélula e femtocélula), o núcleo da rede (o EPC e seus principais módulos), bem como alguns exemplos de serviços que trafegam pela rede (como VoIP e *streaming* de vídeo). No entanto, destaque especial foi dado aos processos e mecanismos que representam o foco desta dissertação, quais sejam: os processos de seleção de célula e *handover*, balanceamento de carga, mecanismos que proporcionam alta vazão para os usuários, bem como a forma como as redes LTE tratam a questão dos requisitos de qualidade de serviço (QoS).

No próximo capítulo, serão apresentados os trabalhos (artigos) que guardam relação mais estreita com o objetivo desta dissertação.

Capítulo 3 - Trabalhos Correlatos

3.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, são abordados alguns artigos que envolvem o tema desta dissertação e que servem como parte da base teórica e de *background* acerca do foco deste trabalho.

3.2 Estado da Arte

Dentre todos os autores pesquisados na literatura da área, vale destacar os nove trabalhos a seguir, que guardam relação mais estreita com a proposta formulada nesta dissertação, ou seja: processos de seleção de célula, *handover* e balanceamento de carga.

3.2.1 Cell Selection in 4G Cellular Networks

O artigo de Amzallag et al. (2013) trata da otimização do processo de seleção de célula em redes celular 4G. O artigo realiza um estudo sobre os potenciais benefícios da adoção de um processo de seleção global de célula, em comparação com o atual protocolo local que se baseia somente na relação sinal/ruído. O foco do trabalho está no estudo da viabilidade de se atender à demanda mínima de uma estação móvel, por meio de mais de uma estação base simultaneamente, em sistemas OFDMA. O problema de seleção de célula é modelado como um problema de otimização por maximização da demanda “tudo ou nada” (AoNDM).

De acordo com os autores, para o caso de sistemas 4G e similares, em uma situação de sistema sobrecarregado, onde as demandas dos clientes podem ser grandes em relação à capacidade disponível da célula, a solução proposta pode melhorar em até 20% a cobertura da rede, quando comparado ao método guloso baseado somente na melhor relação sinal/ruído, adotada pela versão atual do sistema. Entende-se que a proposta é que cada cliente obtenha pelo menos uma fração da capacidade das células e que esses clientes sejam atendidos, na pior das hipóteses, por pelo menos uma estação base, porém com a possibilidade de serem atendidos por mais de uma estação. A solução é modelada matematicamente, com seus algoritmos expressos através de pseudocódigos. A ferramenta para a execução das simulações não é informada.

3.2.2 Analytical Modeling and Performance Evaluation of Cell Selection Algorithms for Mobile Networks with Backhaul Capacity Constraints

De acordo com os autores Olmos, Ferrús e Galeana-Zapién (2013), a principal motivação por trás da busca por melhorias nos algoritmos de seleção de célula, é a necessidade do uso mais eficiente dos recursos de rádio acesso, como, por exemplo, seleção da célula com o mínimo de perda de propagação que leve à máxima relação sinal/interferência mais ruído (SINR), balanceamento das células de rádio, etc. No entanto, segundo o mesmo artigo, atualmente existem argumentos que apontam para o *backhaul* como potencial gargalo,

fazendo com que um dos principais desafios das operadoras de telefonia celular seja tornar escalável a capacidade do *backhaul*, com o objetivo de suportar as crescentes capacidades das interfaces de rádio. O artigo analisa a possibilidade de explorar o balanceamento de carga entre estações base para melhorar a utilização da capacidade do *backhaul*. O balanceamento de carga é realizado através de algoritmos de seleção de célula, que levam em consideração tanto a interface de rádio quanto as condições do *backhaul*.

Os autores apresentam o desenvolvimento de um modelo analítico, com o objetivo de avaliar o desempenho de estratégias de seleção de célula para redes móveis que apresentem restrições de capacidade no *backhaul*. Esse modelo analítico é utilizado para avaliar o desempenho de um novo algoritmo de seleção de célula, algoritmo esse sensível às condições do *backhaul*, comparando-o com os esquemas clássicos baseados exclusivamente nas informações que refletem as condições do rádio enlace.

De acordo com os autores, os resultados obtidos mostram que o algoritmo proposto pode atingir níveis de utilização do *backhaul* mais altos do que os esquemas tradicionais de seleção de célula, ao mesmo tempo em que provê o mesmo desempenho na interface de rádio. A proposta é modelada e avaliada analiticamente, utilizando-se modelos markovianos, com um simulador Monte Carlo escrito especificamente para este propósito (um simulador orientado a eventos, implementado em C++).

3.2.3 Load balancing in downlink LTE self-optimizing networks

No artigo de Lobinger et al. (2010), os autores apresentam uma abordagem de balanceamento de carga baseada em *handover* para LTE. A solução proposta requer que a utilização de recursos de todas as células seja conhecida por uma unidade central, onde os parâmetros ótimos de *handover* seriam calculados. Durante a tomada de decisão, o algoritmo não leva em conta nenhum requisito de QoS, ou seja, o algoritmo realiza o balanceamento sem levar em conta a aplicação que o usuário está utilizando, aproveitando apenas o nível de sinal recebido das células e o nível de utilização de recursos em cada célula. Além disso, a única métrica usada para avaliar o ganho de desempenho na rede foi o “número de usuários insatisfeitos”, que descreve o número de usuários que não puderam ser atendidos com QoS adequado.

Os resultados das simulações mostram uma melhora razoável na distribuição dos usuários nas células e uma diminuição no número de usuários insatisfeitos. A sobrecarga de sinalização e alta latência, devido à natureza centralizada da solução, pode comprometer a escalabilidade e agilidade do algoritmo. Tais fatores não foram completamente explorados no trabalho. Vários outros trabalhos também utilizam a otimização dos parâmetros de

handover para balanceamento de carga em LTE, conforme Zhang, M. et al. (2011) e Rodriguez et al. (2011).

3.2.4 Interference-Based Cell Selection in Heterogeneous Networks

Segundo Davaslioglu & Ayanoglu (2013), as redes celulares heterogêneas oferecem melhorias significativas em termos de aumento na taxa de dados e na cobertura, e oferecem redução na escassez de recursos. No entanto, existem problemas importantes a serem resolvidos. Nesse trabalho, é identificado que o critério de seleção de célula é um fator importante na determinação das taxas de dados do usuário, especialmente nas transmissões *uplink*, e é aplicado o algoritmo *Cell Breathing* que, de acordo com Bahl et al. (2007), é um conceito bem conhecido em telefonia celular como um mecanismo de balanceamento de carga, usado para tratar congestionamento de clientes em LANS sem fio. O artigo afirma que foi observado que o algoritmo proposto (seleção de célula com base em interferência) apresenta melhor balanceamento de carga entre as estações base do sistema para melhorar as taxas de dados de *uplink* do usuário. São apresentados os passos da implementação em uma rede LTE típica, bem como são demonstradas as melhorias no desempenho através de simulações.

3.2.5 Design and Evaluation of a Backhaul-Aware Base Station Assignment Algorithm for OFDMA-Based Cellular Networks

Galeana-Zapién & Ferrús (2010) consideram que à medida que interfaces de rádio mais avançadas são lançadas e que o tráfego de dados e multimídia de dispositivos móveis aumenta, a crescente preocupação é que o *backhaul* da rede celular se torne um gargalo em determinados cenários. O trabalho estende o problema de seleção de estação base a fim de lidar com possíveis situações de congestionamento do *backhaul*.

Um problema de seleção de estação base que considere o *backhaul* é modelado como um problema de otimização, usando um framework baseado em utilidade, impondo restrições tanto nos recursos de rádio quanto no *backhaul*, com mapeamento para um problema da mochila multidimensional de múltipla escolha (MMKP), conforme heurística detalhada de Parra-Hernandez & Dimopoulos (2005). Um novo algoritmo heurístico de seleção de estação base com tempo polinomial é formulado, avaliado e comparado aos esquemas clássicos, esquemas esses que são baseados exclusivamente nas condições do rádio. Os resultados de simulação demonstram que o algoritmo proposto pode fornecer a mesma capacidade de sistema com menos recursos de *backhaul*, de maneira que, em situações de gargalo, uma melhoria no desempenho geral é alcançada.

3.2.6 A Novel Cell Selection Strategy with Load Balancing for both Idle and RRC-Connected Users in 3GPP LTE Network

Conforme descrito pelos autores Qian, Zhang e Zhou (2012), uma solução de balanceamento de carga é proposta para melhorar o desempenho do processo de seleção de célula em redes LTE. As condições de carga na célula, bem como as diferentes classes de serviço são consideradas. O nível de carga na célula é utilizado no processo de tomada de decisão do controle de admissão, onde as células com menor carga são escolhidas com maior prioridade. Qualitativamente, a análise é baseada em uma Cadeia de Markov n -dimensional. A análise teórica mostra que a probabilidade de queda de chamadas pode ser reduzida quando o processo de balanceamento de carga é aplicado, o que também é verificado pelos resultados da simulação. Nas simulações, os autores consideram um ambiente com *macro* e *picocells*, o que caracteriza uma rede parcialmente heterogênea, pois as *femtocells* causam mais impacto na rede (quantidade de nós, interferência, etc.) do que as *picocells*. Os autores não avaliam a escalabilidade, estabilidade e agilidade da solução. Considerando que são necessárias apenas informações das células vizinhas, pode-se considerar a solução como escalável.

3.2.7 Handover Scenario and Procedure in LTE-based Femtocell Networks

Em seu artigo, os autores Ulvan et al. (2010) apresentam uma política de decisão de *handover* baseada em predição de mobilidade, na qual a posição dos UEs precisa ser conhecida antecipadamente. A predição de movimento dos UEs é baseada em probabilidades de transição de uma cadeia de Markov. São propostas estratégias de *handover* reativo e proativo, com o objetivo de reduzir os *handovers* frequentes e desnecessários em um cenário de rede móvel heterogêneo, causados por femtocélulas com raios de cobertura curtos.

Basicamente, a estratégia de *handover* proativo tenta estimar as características de uma posição específica, antes do UE atingir essa posição, e essa informação é usada para que o sistema possa decidir se dispara um processo de *handover* ou não, antes que aconteça um *handover* normal. Segundo os autores, espera-se que essa estratégia minimize tanto a perda de pacotes quanto as altas latências durante o *handover*.

Quanto à estratégia de *handover* reativo, o procedimento de *handover* tende a ser retardado o tanto quanto possível, mesmo que uma nova estação base candidata seja descoberta. O processo de *handover* é disparado somente quando o UE está quase perdendo o sinal da estação base servidora. De acordo com os autores, essa estratégia representa um mecanismo com potencial para reduzir o número de *handovers* desnecessários.

Os resultados são baseados em simulações no software MATLAB²⁴.

3.2.8 Mitigation of Redundant Handovers to Femtocells by Estimation of Throughput Gain

Os autores em Becvar & Mach (2013) apresentam um algoritmo que tem por objetivo mitigar o problema de *handovers* redundantes para femtocélulas, através da estimativa do ganho de *throughput*. No artigo, é declarado que o ganho de *throughput* é derivado da evolução estimada dos níveis de sinal de todas as células envolvidas, conforme as medições realizadas pelos UEs, e a partir de estimativa de tempo gasto pelos usuários na FAP. O cerne da solução proposta (estimativa de ganho de *throughput*) parece seguir a ideia de um tipo de mapeamento de um valor de RSRP para um valor de índice de MCS que, por sua vez, seria traduzido para um valor máximo de taxa de bit, valor esse que seria concedido pela eNodeB candidata. A solução proposta procura promover um nível de satisfação do usuário pela tentativa de fornecimento de taxas de *throughput* com os valores mais altos possíveis, com base na mitigação de *handovers* redundantes para femtocélulas.

A validação da proposta é feita por meio de simulações com o software MATLAB.

3.2.9 A Novel Handover Mechanism between Femtocell and Macrocell for LTE based Networks

Os autores em Zhang, H. et al. (2010), cujo artigo é referenciado por Becvar & Mach (2013) mencionado no item 3.2.8, propõem um novo algoritmo de *handover* baseado em velocidade de locomoção de usuário e QoS, com o propósito de reduzir *handovers* desnecessários.

Quanto ao parâmetro velocidade de locomoção de UE, essa solução classifica as velocidades em:

- a. Estado baixo: de 0 a 5 km/h;
- b. Estado médio: de 15 a 30 km/h;
- c. Estado alto: acima de 30 km/h.

Dessa forma, segundo o algoritmo proposto, o processo de decisão de *handover* não realiza quaisquer *handovers* para femtocélulas, caso a velocidade do UE esteja no estado alto. Caso esteja no estado médio e a aplicação do usuário não for tão sensível a retardo e perda de pacote, como IPTV, VoIP e jogos em tempo real, então o *handover* para femtocélulas é permitido. Finalmente, caso a velocidade do UE esteja no estado baixo, o *handover* para femtocélulas é executado.

²⁴ MATLAB é um software interativo de alta performance voltado para cálculos numéricos, envolvendo computação numérica, análise e visualização de dados, programação e desenvolvimento de algoritmos, além de desenvolvimento e implantação de aplicações (MATLAB, 2015).

Com relação ao parâmetro de QoS, o algoritmo proposto verifica se o requisito de largura de banda é atendido a fim de decidir se um *handover* será executado ou não, principalmente com base na máxima capacidade da célula e sua carga atual.

A solução promete melhor desempenho quanto à redução de *handovers* desnecessários, bem como do número de *handovers*, em comparação com o algoritmo padrão.

Nenhuma ferramenta de simulação foi utilizada para validar a proposta.

3.3 Síntese dos Trabalhos Correlatos

A Tabela 8 apresenta um resumo comparativo entre os artigos pesquisados que são correlatos à pesquisa de que trata esta dissertação.

Tabela 8 – Síntese dos Trabalhos Correlatos

Artigo	Objetivo	Solução Utilizada	Resultados Obtidos
3.2.1	Atender a demanda dos usuários por meio de mais de uma estação base.	Processo de seleção de célula modelado como um problema de otimização por maximização da demanda “tudo ou nada” (AoNDM).	A solução pode melhorar em até 20% a cobertura da rede, quando comparado ao método guloso baseado na melhor SNR.
3.2.2	Analisar a possibilidade de explorar o balanceamento de carga para melhorar a utilização da capacidade do <i>backhaul</i> .	Estratégia de seleção de célula sensível a restrições de capacidade do <i>backhaul</i> . Modelagem analítica.	Níveis de utilização do <i>backhaul</i> mais altos que os esquemas tradicionais de seleção de célula, ao mesmo tempo em que mantém o mesmo desempenho na interface de rádio.
3.2.3	Realizar o balanceamento de carga com base em <i>handover</i> para redes LTE.	Cálculo dos parâmetros ótimos de <i>handover</i> com base em usuários insatisfeitos (QoS não atendido adequadamente). A utilização de todas as células precisa ser conhecida por uma unidade central para que os cálculos possam ser realizados.	Melhora na distribuição da carga da rede, com redução dos usuários insatisfeitos. No entanto, devido à natureza centralizada da solução, pode ocorrer sobrecarga na sinalização com consequente aumento na latência.
3.2.4	Melhorar o processo de seleção de célula visando a aumentar a taxa de dados no <i>uplink</i> .	Seleção de célula com base em interferência.	Melhor balanceamento de carga com o objetivo de obter taxas de dados de <i>uplink</i> do usuário mais altas.
3.2.5	Otimizar o processo de seleção de estação base objetivando lidar com eventuais congestionamentos no <i>backhaul</i> .	Modelagem do processo de seleção de célula como um problema de otimização, usando um <i>framework</i> baseado em utilidade, por meio do uso da heurística do problema da mochila multidimensional de	Fornecimento da mesma capacidade de sistema com menos recursos de <i>backhaul</i> , de maneira a alcançar uma melhoria geral do sistema em situações de gargalo.

		múltipla escolha (MMKP).	
3.2.6	Realizar o balanceamento de carga por meio da melhoria do desempenho do processo de seleção de célula, considerando as condições de carga na célula, bem como as diferentes classes de serviço.	Processo de tomada de decisão com base em cadeia de Markov n-dimensional.	Teoricamente, há uma redução na probabilidade de queda de chamadas.
3.2.7	Propor estratégias de <i>handover</i> reativo e proativo para reduzir <i>handovers</i> frequentes e desnecessários em redes móveis heterogêneas, causados pela presença de femtocélulas com raios de cobertura curtos.	Solução baseada na predição de mobilidade, na qual a posição do UE precisa ser conhecida antecipadamente, sendo essa predição baseada em probabilidades de transição de uma cadeia de Markov.	Espera-se que o <i>handover</i> proativo minimize tanto a perda de pacotes quanto as altas latências. Quanto ao <i>handover</i> reativo, espera-se que esse mecanismo reduza os <i>handovers</i> desnecessários.
3.2.8	Mitigar o problema de <i>handovers</i> redundantes para femtocélulas	Solução baseada na estimativa de ganho de <i>throughput</i> , que deriva da evolução estimada dos níveis de sinal de todas as células envolvidas, conforme medições realizadas pelo UE e a partir do tempo gasto pelo usuário na femtocélula.	Procura-se promover um nível de satisfação do usuário por meio de tentativas de fornecer taxas de <i>throughput</i> com os níveis mais altos possíveis, com base na mitigação de <i>handovers</i> redundantes para femtocélulas.
3.2.9	Reduzir <i>handovers</i> desnecessários com o objetivo de melhorar o desempenho da rede para as aplicações dos usuários.	Algoritmo de <i>handover</i> baseado em velocidade de usuário e QoS. Três estados de mobilidade são considerados: baixo (0 a 5 km/h), médio (15 a 30 km/h) e alto (acima de 30 km/h). O <i>handover</i> para femtocélula só ocorre se a mobilidade for baixa ou, ainda, se for média desde que a aplicação não seja tão sensível a retardo e perda de pacote. Quanto ao requisito de QoS, o algoritmo verifica se a largura de banda necessária é atendida antes de decidir se executará um <i>handover</i> .	Melhor desempenho quanto à redução de <i>handovers</i> desnecessários, bem como do número de <i>handovers</i> , em comparação com o algoritmo padrão.

Fonte: própria

3.4 Contribuição do Trabalho

Dentre os trabalhos correlatos, nenhuma das soluções propostas leva em consideração o uso conjunto de estimativa da disponibilidade média de capacidade, em termos de disponibilidade de PRBs, das estações base e velocidade média de locomoção do usuário. Esses critérios adicionais são utilizados de maneira a evitar que os UEs selecionem uma

femtocélula sempre que esses UEs estejam em velocidade veicular, bem como para evitar que ocorram *handovers* para eNodeBs sobrecarregadas, sempre que possível.

Portanto, o uso conjunto dos critérios adicionais, da forma proposta nesta dissertação, tem potencial para eventualmente melhorar o balanceamento de carga da rede, bem como melhorar a qualidade de serviço (QoS) para os usuários móveis. Além disso, a solução proposta tem a vantagem de proteger as femtocélulas contra conexões espúrias (indesejáveis) ao não permitir que usuários em velocidades veiculares se conectem a elas.

3.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os trabalhos relacionados com o tema desta dissertação, mais especificamente artigos que propõem soluções envolvendo os processos de seleção de célula e *handover*, que apresentem como objetivos principais o balanceamento de carga da rede e a melhoria na percepção de QoS por parte dos usuários.

O próximo capítulo apresentará uma proposição de solução para melhoria dos processos de seleção de célula e *handover* para HetNets, de forma a atender aos objetivos desta dissertação.

Capítulo 4 – Uma Nova Abordagem de Seleção de Célula e *Handover* para HetNets

4.1 Considerações Iniciais

Neste capítulo, são apresentados os elementos que compõem a proposta desta dissertação, resultantes do levantamento bibliográfico constante no Capítulo 2, dos trabalhos correlatos apresentados no Capítulo 3, do estudo do simulador discreto OPNET *Modeler* versão 17.5.A (*Educational Edition*), bem como de experimentos de simulação, realizados com foco nos objetivos desta dissertação de mestrado.

4.2 Definição do Escopo

Este trabalho se propõe a desenvolver e implementar critérios adicionais para os processos de seleção de célula e *handover*, com o objetivo de melhorar o balanceamento de carga em redes LTE heterogêneas, promovendo o desafogamento do tráfego na macrocélula e, como consequência, melhorar a percepção de QoS para as aplicações dos usuários.

A solução consiste no desenvolvimento de códigos C++ no simulador discreto OPNET *Modeler* versão 17.5.A (*Educational Edition*), códigos esses que serão inseridos nos processos de seleção de célula e *handover*, dos modelos de UE e eNodeB do simulador. Tais códigos tem por objetivo implementar dois critérios adicionais nos processos de decisão de seleção de célula e *handover*:

- a. Estimativa de capacidade das estações base, em termos de disponibilidade média de recursos (PRBs);
- b. Estimativa de velocidade média de locomoção de usuário.

A efetividade desses critérios é baseada na habilidade das estações base de enviar tanto a estimativa de taxa de utilização quanto o seu tipo (macrocélula, picocélula ou femtocélula), sendo que apenas o tipo femtocélula é de especial importância para o processo de decisão do algoritmo. Somente o *downlink* é contemplado na solução.

4.3 Visão Geral Sobre a Adoção dos Critérios Adicionais

O propósito dos critérios adicionais é promover uma condição na qual intensidade e qualidade de sinal, juntamente com a disponibilidade média de recursos (PRBs), em certas proporções, possam afetar os processos decisórios de seleção de célula e *handover*, de tal maneira que seja dada preferência ao parâmetro disponibilidade média de recursos no momento da escolha de uma célula servidora, sem sacrificar a qualidade das conexões *wireless*.

Para este propósito, é adotado um peso de 25% para o parâmetro conjunto intensidade + qualidade de sinal, contra um peso de 75% para o parâmetro disponibilidade

média de recursos da estação base candidata. Estes pesos (ou proporções) foram escolhidos empiricamente, a partir de vários experimentos e, então, atribuídos manualmente. Ou seja, não há processo de cálculo automático para os pesos. Para tanto, investigações adicionais são sugeridas no item 6.3 (Trabalhos Futuros), com relação à adoção ou desenvolvimento de um método de cálculo mais elaborado para os referidos pesos. Os critérios adicionais propostos implicaram na modificação do código-fonte C++ dos modelos de UE e eNodeB do simulador discreto OPNET *Modeler*, na camada do estrato de acesso do LTE, que é onde os processos de decisão de seleção de célula e *handover* acontecem.

Conforme destacado no fluxograma do algoritmo, na Figura 23.a, o processo de seleção de célula teve mais dois pontos de decisão acrescentados:

- a. A verificação de compatibilidade da velocidade média de locomoção do UE com o tipo de cada eNodeB;
- b. A verificação da disponibilidade de capacidade de cada eNodeB, para a seleção daquela com maior valor de disponibilidade de recursos em termos de PRBs.

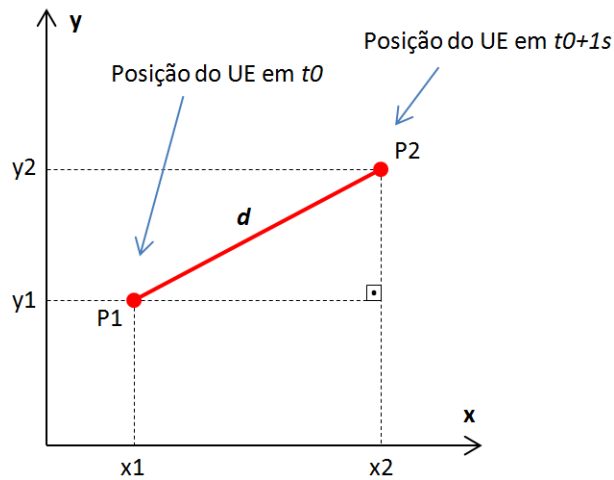
Com relação ao processo de *handover*, conforme destacado no fluxograma da Figura 23.b, dois passos adicionais foram acrescentados:

- I. A verificação de compatibilidade da velocidade média de locomoção do UE com o tipo de cada eNodeB;
- II. O ranqueamento do valor estimado da disponibilidade de capacidade de cada eNodeB candidata, conforme calculado a partir das informações fornecidas pelo canal PDSCH (cálculo de novo índice de prioridade).

4.4 Cálculo da Velocidade Média de Locomoção do UE

Uma função de software e uma estrutura de dados foram criadas no modelo do UE para calcular a velocidade média de locomoção do usuário a intervalos de 1 segundo, armazenando as 10 últimas amostras de velocidades na memória do UE. O método da distância Euclidiana, conforme ilustrado na Figura 22 e definição matemática da Equação 1, foi utilizado para calcular a distância percorrida (em metros) para cada intervalo de 1 segundo, com base nas coordenadas (x,y) presentes no ambiente de desenvolvimento do OPNET para cada modelo de dispositivo móvel. No mundo real, possivelmente seriam utilizadas coordenadas GPS (*Global Positioning System*).

Figura 22 – Distância entre dois pontos no plano cartesiano



Fonte: adaptado de DANTE (2005)

De acordo com Dante (2005), dados dois pontos no plano cartesiano, P1 e P2, a distância d entre esses dois pontos é uma linha reta dada pela Equação 1.

$$d = \sqrt{(x2 - x1)^2 + (y2 - y1)^2} \quad (1)$$

Onde:

d : distância entre dois pontos percorrida pelo UE.

$x1$ e $y1$: coordenadas do ponto P1.

$x2$ e $y2$: coordenadas do ponto P2.

Assim, a velocidade média de locomoção do UE é obtida pela divisão da distância calculada pelo tempo gasto para percorrê-la, resultando em uma amostra de velocidade expressa em metros por segundo. Então, a média aritmética é calculada para se obter a velocidade média para o intervalo relativo aos últimos 10 segundos, e esta será a velocidade do UE adotada pelo algoritmo proposto. Além disso, uma outra função de software foi criada para ser invocada tanto pelo UE quanto pela eNodeB, para calcular a velocidade média com base nas últimas 10 amostras de velocidades armazenadas no dispositivo móvel.

O simulador OPNET disponibiliza a posição dinâmica de cada UE, durante a execução da simulação, por meio de um par ordenado de coordenadas no plano cartesiano. Assim, neste trabalho, as posições por onde passou um determinado UE nos últimos 10 segundos, são armazenadas em uma matriz A de números reais, com 10 linhas e 3 colunas, matriz essa definida conforme a Equação 2.

$$\mathbf{A} = \begin{matrix} & \mathbf{t} & \mathbf{x} & \mathbf{y} \\ \begin{bmatrix} a_{00} & a_{01} & a_{02} \\ a_{10} & a_{11} & a_{12} \\ a_{20} & a_{21} & a_{22} \\ a_{30} & a_{31} & a_{32} \\ a_{40} & a_{41} & a_{42} \\ a_{50} & a_{51} & a_{52} \\ a_{60} & a_{61} & a_{62} \\ a_{70} & a_{71} & a_{72} \\ a_{80} & a_{81} & a_{82} \\ a_{90} & a_{91} & a_{92} \end{bmatrix} & \in \mathbb{R}^{10 \times 3} & & \end{matrix} \quad (2)$$

Onde:

\mathbf{t} = coluna 1 da matriz \mathbf{A} , onde cada elemento armazena um momento de amostragem da posição (x,y), expresso em segundos, de um determinado UE (as amostragens são realizadas a cada 1 segundo);

\mathbf{x} = coluna 2 da matriz \mathbf{A} , onde cada elemento armazena a abscissa (x) referente à amostragem feita no tempo \mathbf{t} de um determinado UE;

\mathbf{y} = coluna 3 da matriz \mathbf{A} , onde cada elemento armazena a ordenada (y) referente à amostragem feita no tempo \mathbf{t} de um determinado UE.

A matriz \mathbf{A} , relativa a cada UE, é atualizada a cada 1 segundo.

Então, o Algoritmo 1 lê pares de linhas da matriz \mathbf{A} (linhas 4 a 9 do Algoritmo 1) e, em 9 iterações (i=0 até 8), calcula a velocidade média de locomoção do UE com base nas 10 amostras de tempo e coordenadas cartesianas, armazenadas na matriz \mathbf{A} . A cada 1 segundo, um novo processo de captura de amostras é disparado, desta forma mantendo atualizadas as informações relativas aos últimos 10 segundos de locomoção do UE.

Algoritmo 1 Cálculo da velocidade média do UE

Entrada: matriz A , conforme definição da **Equação 2**

Saida: v_media (velocidade média do UE em m/s) | $v_media \in \mathbb{R}$

```
1: var t1, x1, y1, t2, x2, y2, d_parc, d_total, t_total, v_media : real
2: início
3:   para  $i = 0$  até 8 faça
4:      $t1 \leftarrow a[i, 0]$ 
5:      $x1 \leftarrow a[i, 1]$ 
6:      $y1 \leftarrow a[i, 2]$ 
7:      $t2 \leftarrow a[i + 1, 0]$ 
8:      $x2 \leftarrow a[i + 1, 1]$ 
9:      $y2 \leftarrow a[i + 1, 2]$ 
10:     $d\_parc \leftarrow$  computa distância parcial, conforme Equação 1
11:     $d\_total \leftarrow d\_total + d\_parc$ 
12:     $t\_total \leftarrow t\_total + (t2 - t1)$ 
13:  fim para
14:   $v\_media \leftarrow \left(\frac{d\_total}{t\_total}\right)$ 
15:  retorna  $v\_media$ 
16: fim
```

4.5 Estimativa de Capacidade da eNodeB via Canal PDSCH

Uma função de software e uma estrutura de dados foram criadas no modelo da eNodeB para calcular o percentual recursos disponíveis (PRBs) exatamente no momento em que a eNodeB esteja montando os seus *subframes* de rádio, o que acontece a intervalos de 1 milissegundo (1 TTI). Essa estrutura de dados pode ser matematicamente formalizada como um vetor com 6.000 elementos, no domínio dos números reais, conforme estrutura definida por meio da Equação 3.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} s_0 \\ s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_{5999} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^{6000} \quad (3)$$

Basicamente, o cálculo é realizado a partir dos recursos ocupados contra o máximo de recursos uma determinada eNodeB suporta, conforme informações extraídas do canal de dados PDSCH e pelo perfil de capacidade da estação base, conforme a Tabela 2. Então, as últimas 6.000 (seis mil) amostras deste cálculo (que correspondem a 6 segundos de informação) são armazenadas na memória da eNodeB, e isso acontece para cada estação base presente na rede. A Equação 4 representa o método de cálculo utilizado pelo OPNET, a partir do qual o nível percentual de utilização da eNodeB é obtido.

$$R_{utlz} = \frac{PRB_{ocup}}{PRB_{max}} \times 100 \quad (4)$$

Assim, no momento em que um evento de seleção de célula ou *handover* é disparado, a eNodeB servidora acessa essa informação da eNodeB candidata e calcula a média aritmética dos recursos de banda disponíveis daquela eNodeB, correspondentes aos últimos 6 segundos, e essa informação é utilizada na tomada de decisão sobre qual a melhor estação base a ser selecionada. A Equação 5 representa o método utilizado neste trabalho para calcular a média percentual de recursos ocupados em uma determinada estação base nos últimos 6 segundos.

$$\bar{R}_{utlz} = \frac{(\sum_{i=0}^{5999} s_i)}{6000} \quad (5)$$

Então, de posse do resultado da Equação 5, pode-se calcular a disponibilidade média percentual de recursos de uma eNodeB simplesmente subtraindo-se o máximo utilizável (100%) do percentual médio utilizado, conforme a Equação 6.

$$\bar{R}_{disp} = 100 - \bar{R}_{utlz} \quad (6)$$

4.6 Os Novos Processos de Decisão de Seleção de Célula e *Handover*

Além da maior intensidade de sinal (RSRP) usada pelo processo de seleção de célula e do valor normalizado, correspondente a 50% da intensidade de sinal (RSRP) + 50% da qualidade de sinal (RSRQ), usado pelo processo de *handover*, conforme adotado pelo LTE *Release 8* do 3GPP, as melhorias propostas neste trabalho levam em consideração a velocidade média de locomoção do UE e a estimativa de capacidade da eNodeB, conforme ilustrado no fluxograma constante na Figura 23.

Para o processo de *handover*, de acordo com a inspeção do código-fonte do OPNET, os pesos dos parâmetros RSRP e RSRQ são normalizados e aplicados às medições dos valores normalizados desses mesmos parâmetros, resultando em um índice de prioridade para cada eNodeB vizinha de um UE. Então, a eNodeB servidora inicia o processo de *handover* para a eNodeB candidata que apresente o maior índice de prioridade. Dessa forma, seguindo essa mesma ideia, à informação de estimativa de disponibilidade média de recursos é também atribuído um peso de 75% contra o peso de 25% do índice de prioridade da eNodeB (*cell_pref_index* no fluxograma) para uso pelo processo de *handover*. O propósito de se atribuir um peso de 75% para a estimativa de capacidade é fazer com que o valor de disponibilidade de recursos da estação base prevaleça sobre os valores de intensidade e qualidade do sinal dessa estação base.

Então, tanto a informação sobre capacidade disponível quanto o seu correspondente peso são normalizados juntamente com o índice de prioridade da eNodeB (*cell_pref_index* no fluxograma), resultando em um novo índice (*new_cell_pef_index* no fluxograma), que é mais influenciado pelo valor estimado da capacidade da eNodeB do que pelos valores de intensidade (RSRP) e qualidade (RSRQ) do sinal. Dessa forma, esse novo valor de índice é armazenado na lista de prioridade da eNodeB candidata, valor esse a ser utilizado pelas camadas mais altas responsáveis pelo processo de decisão de *handover*.

A Equação 7 representa o método adotado neste trabalho para o cálculo do novo índice de prioridade das estações bases.

$$nENB_{idx} = 100 \times \left(\left(\frac{\bar{R}_{disp_w} \times \bar{R}_{disp}}{w_{tot} \times 100} \right) + \left(\frac{ENB_{idx_w} \times ENB_{idx}}{w_{tot} \times 100} \right) \right) \quad (7)$$

A Tabela 9 descreve os fatores adotados pela Equação 7.

Tabela 9 - Fatores para cálculo do novo índice de prioridade

Termo	Descrição
\bar{R}_{disp_w}	Peso atribuído ao fator <i>disponibilidade média de recursos da eNodeB</i> : 75%
\bar{R}_{disp}	Disponibilidade média de recursos da eNodeB (%).
ENB_{idx_w}	Peso atribuído ao fator <i>índice de prioridade da eNodeB</i> : 25%
ENB_{idx}	Índice de prioridade da eNodeB, obtido do OPNET em tempo de execução.
w_{tot}	$w_{tot} = \bar{R}_{disp_w} + ENB_{idx_w}$
$nENB_{idx}$	Novo índice de prioridade da eNodeB, mais influenciado pela disponibilidade de recursos da eNodeB do que pela intensidade de sinal.

Fonte: Própria

Deve-se observar que o resultado da Equação 7 ($nENB_{idx}$) corresponde à saída do fluxograma da Figura 23 (*new_cell_pref_index*), ou seja: representam a mesma informação.

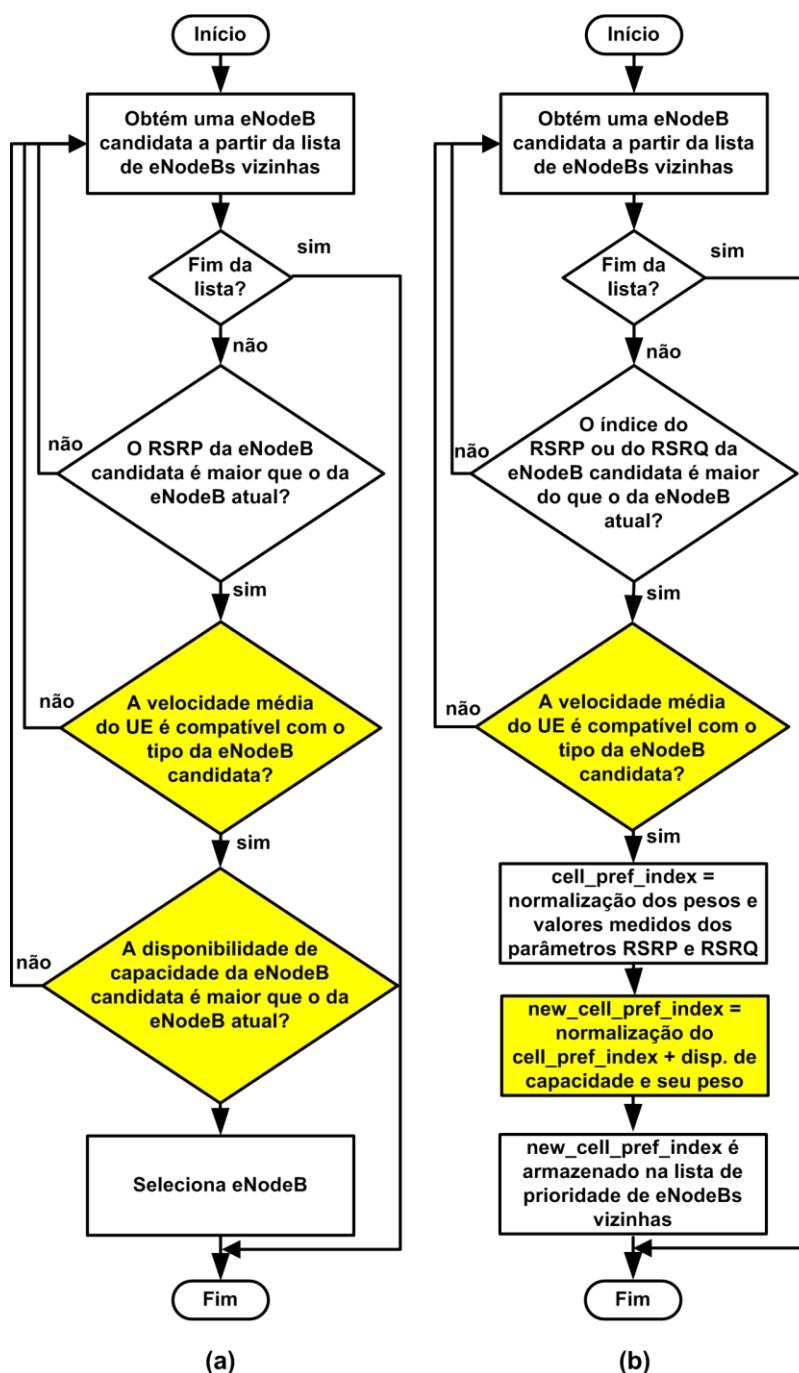
Em resumo, os critérios adicionais de estimativa de capacidade e velocidade média de locomoção do usuário são utilizados pelo processo de seleção de célula, a fim de evitar que os UEs selecionem uma femtocélula sempre que esses UEs estejam em velocidade veicular (acima de 5 km/h, por exemplo), pois isso fará com que um outro processo de re-seleção ou *handover* seja invocado quase que imediatamente, já que esses UEs rapidamente se afastarão do raio de cobertura da femtocélula. Esses critérios adicionais também são usados para evitar que ocorram *handovers* para eNodeBs sobrecarregadas, sempre que possível. Portanto, quando estimativa de capacidade e velocidade do UE forem

usados em conjunto, esses parâmetros podem melhorar o balanceamento de carga da rede, bem como a qualidade de serviço (QoS) para os usuários móveis.

4.7 Fluxograma dos Algoritmos Propostos

Os fluxogramas mostrados na Figura 23 refletem as principais mudanças introduzidas nos processos de seleção de célula, que roda nos dispositivos móveis (Figura 23.a), e *handover*, que roda nas estações base (Figura 23.b).

Figura 23 – Fluxograma do algoritmo proposto: (a) Novo processo de seleção de célula a ser executado no UE; (b) Novo processo de *handover* a ser executado na eNodeB



Fonte: própria

4.8 Considerações Finais

Este capítulo apresentou a proposta desta dissertação, definindo seu escopo como sendo, resumidamente, o desenvolvimento e a implementação de dois critérios adicionais para seleção de célula e *handover*: estimativa de capacidade das estações base e estimativa de velocidade média de locomoção do usuário. O objetivo apresentado para a adoção dos novos critérios foi o melhoramento do balanceamento de carga na rede, de maneira a promover o “desafogamento” do tráfego na macrocélula e, como consequência, obter eventual melhoria na percepção de QoS por parte do usuário.

Além disso, foi apresentada uma visão geral sobre a adoção dos novos critérios propostos, os métodos de cálculo tanto da velocidade de UE, quanto da estimativa de capacidade em termos de recursos disponíveis (PRBs) das estações base, o detalhamento sobre como os novos processos de seleção de célula e *handover* funcionam, finalizando com a apresentação do fluxograma dos algoritmos propostos.

A seguir, serão apresentados a avaliação de desempenho da proposta e os resultados obtidos.

Capítulo 5 – Avaliação de Desempenho e Resultados

5.1 Considerações Iniciais

Este capítulo faz uma breve introdução sobre técnicas de avaliação de desempenho de sistemas, apresentando a simulação discreta como a opção escolhida para validar e avaliar o desempenho da solução proposta nesta dissertação. Também, são apresentadas as métricas selecionadas, o detalhamento dos cenários de simulação com seus pressupostos, bem como a análise dos resultados obtidos.

5.2 Técnicas de Avaliação de Desempenho

Segundo Bolch et al. (2006), projetistas de sistemas de processamento de informações precisam de métodos que auxiliem no levantamento de fatores de projeto dos sistemas, tais como desempenho e confiabilidade. As modernas tecnologias utilizadas em sistemas de computação, comunicação de dados e linhas de produção, lidam com cargas de trabalho complexas, bem como com demandas aleatórias de serviços. Para a avaliação do desempenho e da confiabilidade de tais sistemas, é comum o uso de métodos probabilísticos e estatísticos. A seguir, três técnicas utilizadas no processo de avaliação de desempenho são apresentadas de forma resumida.

5.2.1 Técnica da Medição

A forma mais direta de se avaliar o desempenho de um sistema, é através da realização de medições reais a partir próprio sistema que se está estudando. Contudo, na fase de projeto, o sistema ainda não encontra-se disponível para tais experimentos. Ainda assim, há a necessidade de se prever se o comportamento do sistema atenderá ou não a todos os requisitos de projeto, a fim de se decidir o que deve ser priorizado, no caso da impossibilidade de uma solução ótima. Daí a necessidade da adoção de técnicas de simulação, usando-se modelos abstratos com o objetivo de se prever o desempenho de tais projetos, conforme segue.

5.2.2 Técnica da Simulação Discreta

Os modelos mais populares usados para tais fins são baseados em simulação de eventos discretos, ou *Discrete-Event Simulation* (DES). A simulação discreta pode ser aplicada a quase qualquer tipo de problema. Além disso, os modelos simulados permitem a captura de detalhes sobre o sistema até ao nível desejado.

A principal desvantagem dos modelos utilizados em simulações discretas é o tempo de simulação consumido, quando o sistema modelado é muito grande ou realístico, particularmente quando se exige um alto grau de precisão dos resultados, como por exemplo, intervalos de confiança muito estreitos.

5.2.3 Técnica da Simulação Analítica

No entanto, uma alternativa que apresenta uma boa relação custo/benefício é a modelagem analítica, que pode fornecer respostas relativamente rápidas a perguntas como “e se?”, além de poder proporcionar mais discernimento quanto ao funcionamento interno do sistema sob estudo. Todavia, modelos analíticos geralmente sofrem do problema de pressuposições não realísticas, que precisam ser feitas com o objetivo de tornar o problema mais tratável. Porém, os recentes avanços das técnicas que utilizam modelos estocásticos e soluções numéricas, bem como a disponibilidade de pacotes de software e o fácil acesso a estações de trabalho com grandes recursos computacionais, têm estendido as capacidades dos modelos analíticos a ponto de atenderem a sistemas mais complexos.

Um modelo analítico que vem sendo amplamente utilizado para avaliação de desempenho e confiabilidade são as cadeias de Markov, modelo esse recentemente impulsionado pelos grandes avanços das técnicas de soluções numéricas, dos métodos automatizados de geração de espaços de estado e pela disponibilidade de pacotes de software.

5.3 Validação por Simulação Discreta

A técnica utilizada para validar e avaliar o desempenho da proposta deste trabalho é a da modelagem por simulação discreta, com a adoção do software OPNET *Modeler* 17.5.A (*Educational Edition*), já que a intenção é modelar, simular, validar e avaliar o desempenho da proposta em sua complexidade, em um ambiente virtual realístico, através de uma interface mais intuitiva, levando em consideração os fenômenos e o dinamismo de um sistema de redes móveis, com seus múltiplos componentes de hardware e software, com foco nas tecnologias de Rede de Acesso via Rádio (RAN), mais especificamente na camada do Estrato de Acesso (AS) do LTE, onde ocorrem os processos decisórios sobre seleção de célula e *handover*.

5.3.1 O Simulador Discreto OPNET *Modeler*

De acordo com a apresentação em OPNET (2014a), o OPNET *Modeler* é um software que provê recursos para análise de desempenho de redes de computadores e aplicações. Por meio de sua interface gráfica, o software possibilita ao usuário a edição de seus próprios dispositivos, o desenvolvimento de seus próprios protocolos, a definição de seus próprios formatos de pacotes, etc.

As principais características do OPNET *Modeler* são:

- a. Abordagem de modelagem gráfica;
- b. A geração de dados estatísticos é customizável;

- c. Um conjunto abrangente de ferramentas de análise.

Segundo a apresentação em OPNET (2014b), a suíte OPNET *Modeler* inclui um conjunto de protocolos e tecnologias, além de um ambiente de desenvolvimento sofisticado.

Através da modelagem de todo tipo de rede e tecnologias (incluindo VoIP, TCP, OSPFv3, MPLS, IPv6 e mais), o OPNET *Modeler* permite a análise de redes realísticas simuladas, para que se possa comparar o impacto de diferentes projetos tecnológicos em um comportamento fim-a-fim. A suíte OPNET *Modeler* permite testar e demonstrar projetos tecnológicos em cenários realísticos antes da produção; aumenta a produtividade em P&D e encurta o tempo para se chegar à comercialização; pode-se desenvolver protocolos e tecnologias wireless proprietários; e pode-se avaliar as melhorias realizadas em protocolos padrão.

5.3.2 Métricas Seleccionadas

As seguintes métricas foram seleccionadas para avaliar o desempenho dos algoritmos implementados, tanto quanto ao balanceamento de carga da rede quanto à qualidade de serviço (QoS):

- a. **Taxa de utilização (%) do canal PDSCH da camada física (PHY) do LTE:** reflete o percentual de recursos de banda utilizados em uma estação base;
- b. **Quantidade de EPS Bearers GBR admitidos:** reflete o sucesso em obter a quantidade de recursos necessários para a execução das aplicações dos usuários;
- c. **Quantidade de EPS Bearers GBR rejeitados:** reflete o insucesso em obter a quantidade de recursos necessários para a execução das aplicações dos usuários;
- d. **Taxa de descarte de pacotes no *downlink* (pacotes/segundo):** reflete o percentual de pacotes descartados no *downlink*;
- e. **Delay LTE:** reflete o *delay* de todo o tráfego que chega à camada LTE e que flui entre as eNodeBs e os UEs.

5.3.3 Ambiente de Simulação LTE

Este item apresenta a configuração dos cenários de rede LTE utilizados para validar a proposta deste trabalho.

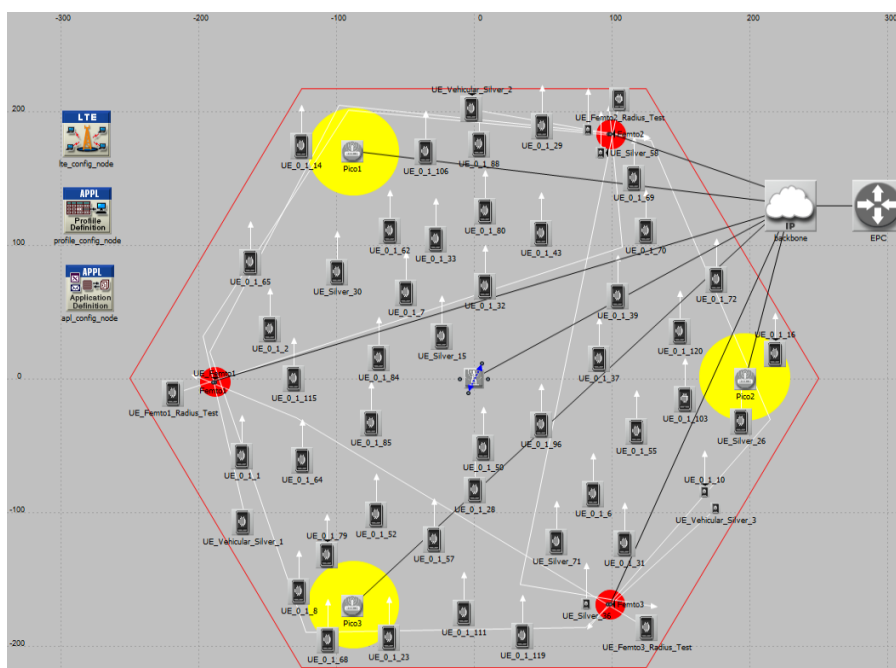
5.3.3.1 Cenários de Simulação

Para validar os algoritmos, três cenários com os mesmos parâmetros de simulação LTE foram criados no OPNET, conforme mostrado na Figura 24 e detalhado na Tabela 10, com as seguintes características:

- Cenário *Baseline* (REF):** Cenário LTE de referência, com base na especificação padrão 3GPP *Release* 8;
- Cenário com Estimativa de Capacidade (CAP):** O mesmo que o cenário REF, porém com o algoritmo de estimativa de capacidade habilitado;
- Cenário com Estimativa de Capacidade e Velocidade de Usuário (C&S):** O mesmo que o cenário REF, porém com os algoritmos de estimativa de capacidade e velocidade de usuário habilitados.

Os resultados gerados pela simulação dos três cenários (REF, CAP e C&S) servirão de base comparativa para avaliar o desempenho da solução proposta neste trabalho. A Figura 24 mostra o *layout* dos dispositivos LTE distribuídos na rede, conforme configurados no simulador.

Figura 24 - *Layout* dos cenários LTE simulados no OPNET



Quanto aos dispositivos dos usuários, os UEs são localizados aleatoriamente no cenário, com alguns deles estrategicamente colocados nas proximidades das femtocélulas, fazendo o papel de usuários femto (1 usuário estacionário por femtocélula). O perfil de mobilidade escolhido foi o *Random Waypoint* (mobilidade aleatória) para 50 UEs, com velocidade média de pedestre de 4,9 km/h e velocidade veicular de 18 km/h. Estas

velocidades foram escolhidas não apenas para testar a possibilidade de conexão ou não com as femtocélulas, mas também para viabilizar um menor tempo de simulação, dessa maneira reduzindo a grande quantidade de eventos gerados durante a execução da simulação e, conseqüentemente, garantindo uma melhor estabilidade quanto aos recursos de software e hardware da máquina utilizada para a execução dos experimentos.

Tabela 10 - Parâmetros de Simulação LTE

Parâmetro	Macro célula	Pico célula	Femto célula
Nº de Estações Base	1	3	3
Nº de Dispositivos de Usuários	60 UEs dispostos aleatoriamente no cenário		
Nº de Usuários Femto	N/A	N/A	3
Ganho da Antena	15 dBi	15 dBi	15 dBi
Máxima Potência de Transmissão	31 dBm	21 dBm	18 dBm
Raio de Cobertura da Estação Base	250 m	N/A	10 m
Nº de Antenas de TX/RX	2 (dois setores)	1 (omnidirecional)	1 (omnidirecional)
Perda de Percurso (Pathloss)	<i>Outdoor to Indoor and Pedestrian Environment</i> (ITU-R M.1225)		UMi – <i>Outdoor-to-indoor</i> (ITU-R M.2135)
Perfil da Camada Física (PHY)	LTE 3 MHz FDD		
Tipo de <i>Handover</i>	Intra-Frequência		
Reuso de Frequência	1 (portadora de 2.1 GHz)		
Capacidade X2	Ativada		N/A
Política de Seleção de eNodeB	eNodeB mais apropriada ²⁵		
Mobilidade do UE	Aleatória (<i>Random Waypoint</i>), trajetória específica e UE fixo.		
Velocidade do UE	4.9 km/h e 18 km/h		
Aplicações de Usuário	VoIP com qualidade de voz PCM (64 Kbit/s), videoconferência de alta qualidade (4 Mbit/s), e tráfego por demanda (<i>on-demand traffic</i> ²⁶) (1.6 Mbit/s).		
Configuração de EPS <i>Bearer</i>	Bronze (QCI=6): 44 UEs com VoIP e 3 UEs com VoIP e videoconferência. Prata (QCI=4): 11 UEs com VoIP, 2 dos quais com tráfego por demanda. Ouro (QCI=1): 2 UEs com VoIP e videoconferência.		
Tempo de Simulação	150 s com tempo de boot de 90 s (<i>warm-up time</i>).		

Com relação à carga de tráfego na rede, 4 UEs estacionários (usuários não se locomovem) foram colocados próximos à macro célula com o objetivo de manter uma carga pesada de tráfego na macro célula (videoconferência de alta qualidade com 4 Mbit/s de velocidade e tráfego por demanda com a velocidade de 1,6 Mbit/s para cada um dos 4 UEs). O propósito dessa estratégia é fazer com que o algoritmo dê preferência a estações base

²⁵ Em contraste com eNodeB mais apropriada, o OPNET apresenta também a opção de selecionar a primeira eNodeB detectada na vizinhança, embora esta última possa não ser a melhor para atender ao usuário.

²⁶ Segundo Ben Hadj Said et al. (2013), o serviço de conectividade por demanda consiste em mover sessões ativas, de forma transparente e temporária, de um equipamento de rede para um outro, sem causar interrupção nas sessões dos usuários. No contexto deste trabalho, o termo *on-demand traffic*, de acordo com seu uso no OPNET, refere-se à geração contínua de tráfego de rede entre dois nós.

menos sobrecarregadas (células de baixa potência), em detrimento da macrocélula sobrecarregada.

Além disso, 6 UEs foram configurados com trajetórias específicas, com velocidades de locomoção a 4,9 km/h ao se aproximarem das femtocélulas, obrigando esses UEs a cruzarem os raios de cobertura das 3 femtocélulas, garantindo dessa forma o fluxo de tráfego nessas femtocélulas e, assim, poder testar o comportamento do algoritmo quanto à dependência da velocidade média de locomoção dos usuários em suas tomadas de decisão quanto à seleção de célula e *handover*. No que se refere ao restante dos dispositivos dos usuários, suas aplicações e perfis de QoS, 44 UEs foram configurados para a execução de VoIP, mais 3 UEs com VoIP e videoconferência, todos eles com a classe bronze²⁷ de QoS (QCI=6). Outros 11 UEs foram configurados para a execução de VoIP com a classe prata de QoS (QCI=4). Mais 2 UEs foram configurados para a execução de VoIP e videoconferência com a classe ouro de QoS (QCI=1). O tráfego por demanda foi configurado como *streaming multimedia* com velocidade de 1,6 Mbit/s, no modo *best effort*²⁸ e executado bidirecionalmente entre 2 UEs e a macrocélula.

O tempo de simulação tem a duração de 150 segundos, com um tempo de *warm-up*²⁹ de aproximadamente 90 segundos, resultando em um tempo efetivo de simulação em torno de 60 segundos para a coleta de resultados. Este tempo reduzido de simulação é devido a restrições de hardware e software deparadas ao se configurar cenários de simulação realística LTE complexos, como o abordado neste trabalho, e foi utilizado para garantir um ambiente estável em tempo de execução, já que um número muito grande de eventos foram gerados durante cada simulação (em torno de 60 milhões de eventos para cada um dos 3 cenários: REF, CAP e C&S). No entanto, após um trabalho de planejamento e testes com os referidos cenários executados no OPNET, concluiu-se que o tempo de simulação de 150 segundos não compromete nem o comportamento do algoritmo proposto, nem os resultados coletados após as simulações.

5.3.3.2 Pressupostos da Simulação

Neste trabalho, assume-se que as estações base (macro, pico e femtocélulas) enviam seus respectivos tipos de eNodeB, embora esse comportamento seja implementado por software por meio de variáveis de memória compartilhadas entre eNodeBs e UEs.

²⁷ As classes de QCI mencionadas como bronze, silver e gold estão de acordo com os parâmetros adotados pelo OPNET.

²⁸ Tradicionalmente, na Internet, todos os pacotes são tratados da mesma forma, sem discriminação ou garantia explícita de entrega. Isto é conhecido como modelo de serviço *Best effort* (GEVROS et al., 2001).

²⁹ Tempo de *warm-up* é o tempo necessário para a inicialização do sistema.

Em conjunto com a velocidade média do UE (veicular ou pedestre), o tipo da eNodeB é utilizado para decidir se um UE pode ou não se conectar a uma HeNB. Além disso, já que o OPNET Modeler 17.5.A (*Educational Edition*), que foi utilizado nas simulações, não contém os modelos de femtocélulas LTE, então modelos de eNodeB foram usados com parâmetros de femtocélulas para a montagem dos cenários.

5.4 Resultados da Simulação

Neste trabalho, os processos de seleção de célula e *handover* foram identificados como pontos-chave a serem trabalhados com o objetivo de melhorar tanto o balanceamento de carga da rede, quanto a percepção de QoS por parte dos usuários, conforme declarado no item 1.2 (Definição do Problema) desta dissertação. Portanto, como proposta de melhoria, além dos parâmetros RSRP e RSRQ, dois critérios adicionais foram introduzidos: estimativa de capacidade de recursos (PRBs) e velocidade média de locomoção de usuário. Então, para validar a solução proposta, os algoritmos mostrados no fluxograma da Figura 23 foram desenvolvidos em linguagem de programação C++ e implementados no simulador de eventos discretos OPNET Modeler, bem como três cenários (REF, CAP e C&S) foram planejados e configurados no simulador para a execução de testes e coleta de estatísticas.

Dessa forma, a simulação para cada cenário foi realizada em ambiente realístico³⁰ de simulação LTE e as métricas citadas no item 5.3.2 foram coletadas para avaliar o desempenho dos algoritmos propostos, conforme os subitens a seguir.

5.4.1 Balanceamento de Carga da Rede

A partir da métrica de utilização do canal PDSCH, que mostra o percentual do consumo de recursos (PRBs) no sentido de *download* das estações base, pode-se observar evidências de redistribuição de carga na rede, quando se compara, por exemplo, o comportamento da distribuição das capacidades das estações base nos cenários REF e C&S, conforme mostram as Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Cenário REF – Taxa de utilização do canal LTE PHY PDSCH (%)

Estação Base	Mínima	Média	Máxima	Desvio Padrão
Macro	0,53603	25,465	45,059	8,6903
Pico1	0,35826	1,002	3,689	0,8392
Pico2	0,35826	0,749	2,828	0,6769
Pico3	0,37603	2,391	7,756	1,6539
Femto1	0,37603	1,937	6,572	1,6153
Femto2	0,35826	1,380	3,969	0,9652
Femto3	0,35826	1,657	4,218	1,0533

Tabela 12 – Cenário C&S - Taxa de utilização do canal LTE PHY PDSCH (%)

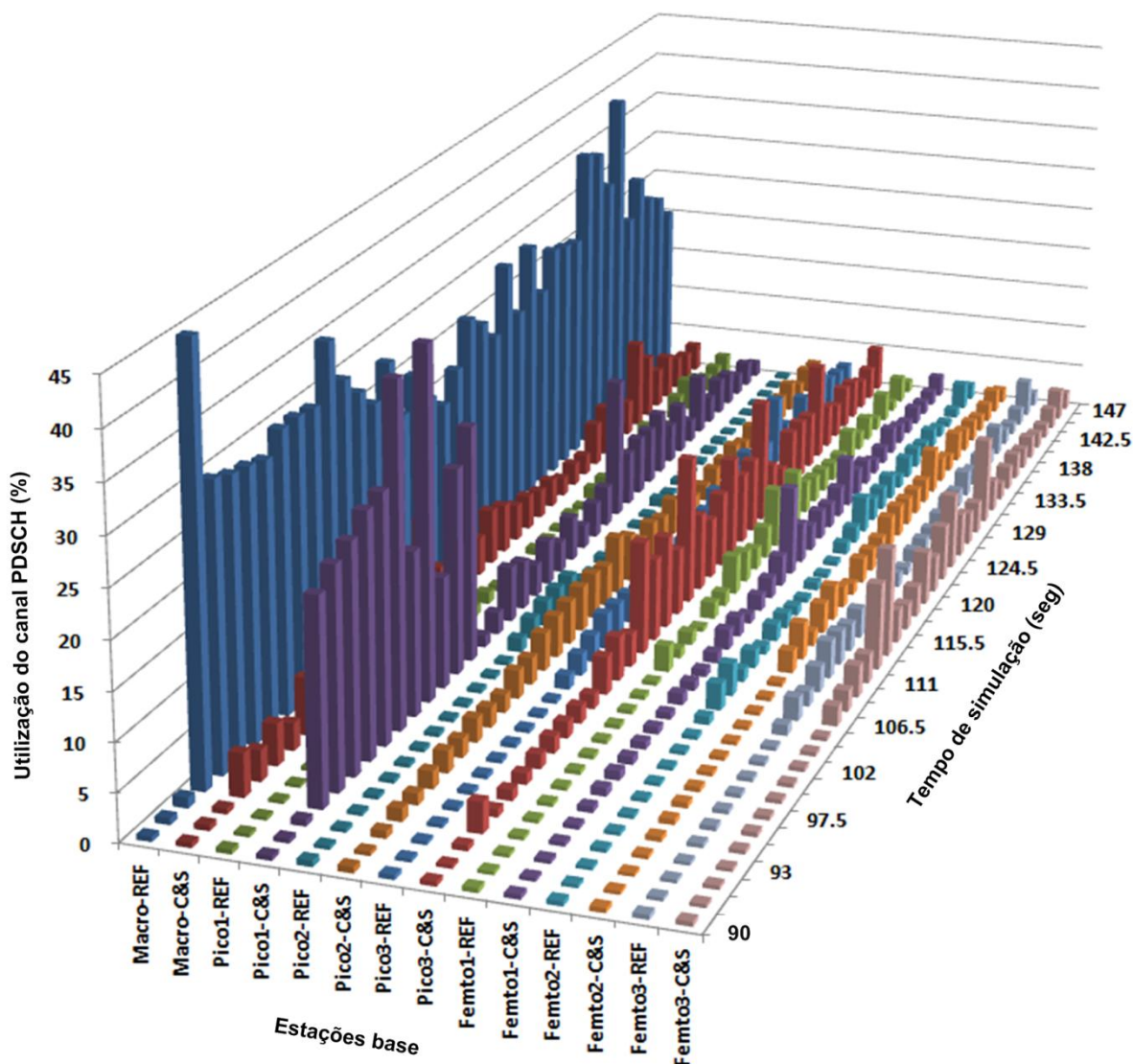
Estação Base	Mínima	Média	Máxima	Desvio Padrão
Macro	0,53603	4,4292	11,908	2,426
Pico1	0,47758	9,8548	37,542	10,136
Pico2	0,42525	2,8224	6,273	1,279
Pico3	0,37603	5,3946	16,077	3,830
Femto1	0,37603	2,0015	9,813	1,706
Femto2	0,35826	1,8528	4,964	1,258
Femto3	0,35826	2,9768	11,703	2,719

³⁰ O que se quer dizer com ambiente realístico de simulação LTE é a modelagem e simulação dos vários dispositivos, links de dados, módulos, processos, protocolos, etc, que compõem um sistema de rádio acesso LTE, possibilitando uma análise comportamental mais completa e próxima das complexidades do mundo real.

Com base nessas tabelas, pode-se observar que a macrocélula teve a sua média de utilização reduzida de 25,46% (cenário REF) para 4,43% (cenário C&S), o que, para esse caso específico, representa um alívio significativo para a macrocélula, que terá disponibilidade de mais recursos para melhor atender aos UEs.

Ainda quanto ao efeito de balanceamento de carga na rede, provocado pela implantação dos algoritmos aqui propostos, a Figura 25 fornece uma visão geral mais intuitiva por meio de um gráfico 3D.

Figura 25 – Efeito de balanceamento de carga na rede

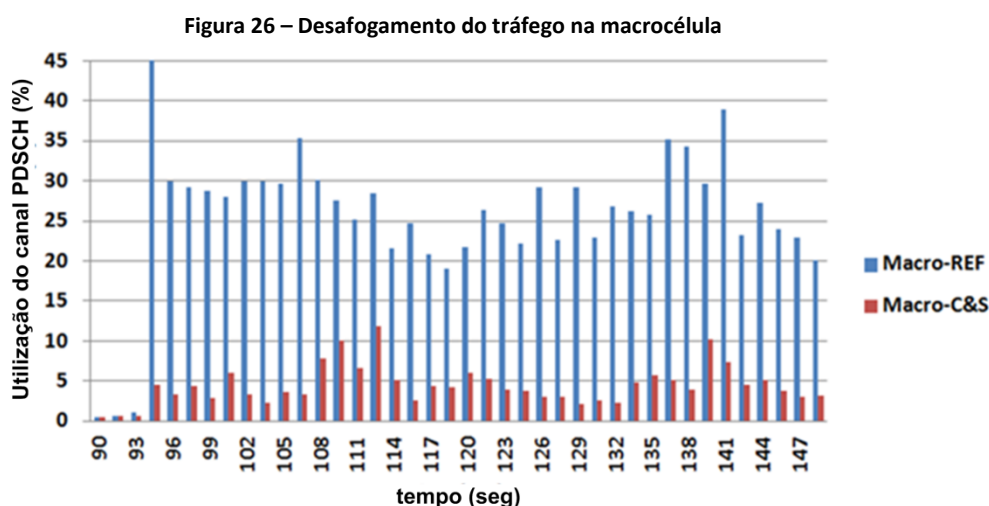


Nessa figura, pode-se observar o comportamento de cada uma das sete estações base (1 macrocélula, 3 picocélulas e 3 femtocélulas) ao longo do tempo de duração da simulação, onde a macrocélula aparece assumindo a maior parte do tráfego da rede no cenário padrão da Release 8 do LTE (Macro-REF). Nesse cenário, a macrocélula apresentou uma utilização média de 25,26%, com um pico de utilização de 45%, conforme já demonstrado numericamente na Tabela 11. No entanto, com a adoção dos algoritmos

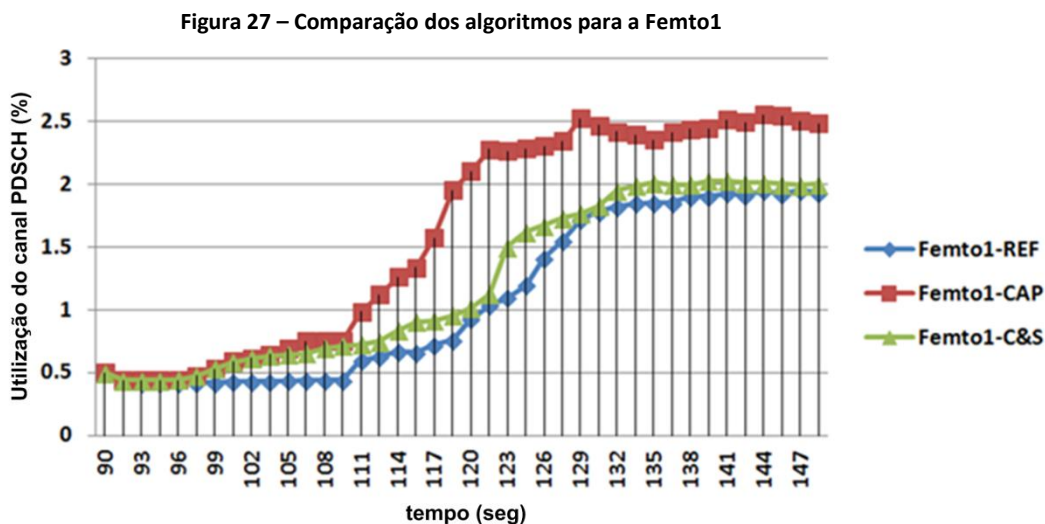
propostos, a macrocélula apresentou uma utilização média de 4,43%, com um pico de utilização de 12% (Macro-C&S), conforme a Tabela 12.

Além disso, a Figura 25 revela que as estações base de baixa potência (picocélulas e femtocélulas) estão subutilizadas no cenário padrão (REF), enquanto que a macrocélula assume a maior parte do tráfego nesse cenário (comportamento padrão no LTE Rel-8). Em contraste, no cenário C&S (com os algoritmos propostos implementados), o tráfego de rede é redistribuído da macrocélula para as estações base de baixa potência, fato esse que indica um balanceamento de carga mais eficiente entre todas as estações base.

O gráfico da Figura 26 é apresentado com o objetivo de demonstrar, isoladamente, a liberação de recursos (maior disponibilidade de PRBs) para a macrocélula, comparando os cenários REF e C&S.



No entanto, é importante mencionar que, para o efeito de balanceamento de carga, o fator que mais contribuiu foi o algoritmo de estimativa de capacidade de recursos (PRBs), implementado nos processos de seleção de célula e *handover* dos modelos de eNodeB e UE.



Conforme mostra a Figura 27, e considerando apenas uma femtocélula (Femto1) nos três cenários (REF, CAP e C&S), a influência do algoritmo que leva em conta a velocidade do usuário nos processos de seleção de célula e *handover* não foi significativa. Porém, a influência desse algoritmo será demonstrada a seguir, na percepção de melhoria de QoS.

5.4.2 Melhoria de QoS

Este item apresenta os resultados coletados com base nas métricas selecionadas para avaliação de evidências de percepção de melhoria de QoS por parte dos usuários, métricas essas já apresentadas no item 5.3.2 (Métricas Selecionadas).

5.4.2.1 Quantidade de EPS Bearers GBR Admitidos e Rejeitados

Analisando-se a Tabela 13, algumas conclusões podem ser obtidas:

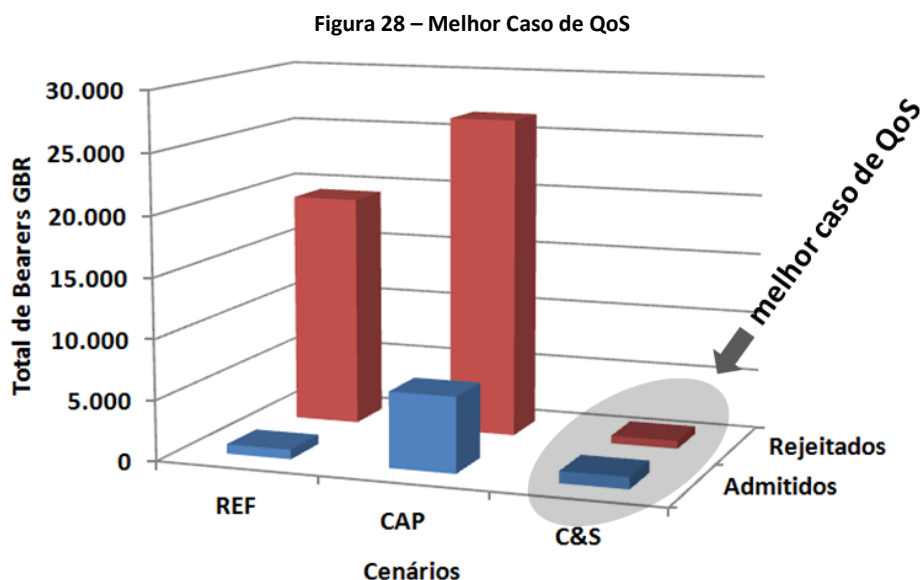
- Houve um aumento de 24,62% (788 contra 982 *bearers* no total) na admissão de *bearers* GBR, quando se compara os cenários REF e C&S, fato este que indica melhoria no nível de QoS.
- Houve um grande decréscimo na rejeição de *bearers* GBR (19.338 *bearers* do cenário REF contra 653 *bearers* do cenário C&S), fato que representa mais uma indicação de melhoria no nível de QoS.
- Uma grande quantidade de *EPS bearers* (6.253, 19.338 e 26.628 *bearers* nas colunas totalizadoras), que aparecem nos cenários REF e CAP, são parcialmente devidos ao excessivo número de tentativas de estabelecimento de conexão com estações base de curto raio de cobertura (femtocélulas). Como evidência disto, pode-se citar ausência do algoritmo de verificação de velocidade média de locomoção do usuário nos cenários REF e CAP. Esses totais, presentes nos cenários REF e CAP, indicam qualidade de serviço inferior em comparação com os valores significativamente mais baixos observados no cenário C&S.

Tabela 13 – *Bearers* com taxa de bit garantida

Estação Base	Cenários					
	Total de <i>Bearers</i> GBR Admitidos			Total de <i>Bearers</i> GBR Rejeitados		
	REF	CAP	C&S	REF	CAP	C&S
Macro	434	5.355	560	495	24.975	275
Pico1	170	189	152	17.204	9	14
Pico2	44	209	135	860	350	0
Pico3	0	65	35	0	0	9
Femto1	0	14	0	0	0	0
Femto2	135	377	65	779	1.175	350
Femto3	5	44	35	0	119	5
Total	788	6.253	982	19.338	26.628	653

A Figura 28 simplifica a análise da evidência de melhoria de QoS para as aplicações dos usuários, onde o melhor caso de QoS se encontra em destaque, conforme demonstrado

na região do gráfico correspondente ao cenário C&S, onde ambos os algoritmos de estimativa de capacidade de recursos (PRBs) e velocidade média de locomoção de usuário se encontram ativados, promovendo o benefício de uma melhoria geral na performance do sistema. O melhor caso de QoS encontra-se na região onde as 982 *bearers* GBR admitidos encontra-se com as 653 *bearers* GBR rejeitados, conforme destacado na Figura 28.



5.4.2.2 Pacotes/Segundo Descartados no *Downlink*

A Tabela 14 resume a taxa de pacotes descartados para os três cenários simulados, onde pode-se verificar que houve um decréscimo de 20,23% na taxa de descarte de pacotes no *downlink*, ao comparar-se as totalizações dos cenários REF (3.367,90 pacotes/segundo) e CAP (2.606,98 pacotes/segundo), contra um decréscimo de 19,65% ao comparar-se as totalizações dos cenários REF (3.367,90 pacotes/segundo) e C&S (2.625,73 pacotes/segundo).

Tabela 14 – Pacotes descartados por segundo no *downlink*

Estação Base	Cenários		
	REF	CAP	C&S
Macro	2.945,90	320,68	511,55
Pico1	17,80	726,67	575,01
Pico2	12,50	544,91	475,89
Pico3	96,80	717,15	637,54
Femto1	55,00	105,97	128,78
Femto2	75,40	95,11	132,11
Femto3	64,50	96,49	164,85
Total	3.267,90	2.606,98	2.625,73

O aumento no descarte de cerca de 19 pacotes (2.625,73 - 2.606,98) quando se compara os cenários CAP e C&S, provavelmente deve-se ao fato de UEs em locomoção veicular serem impedidos de se conectarem às femtocélulas. Além disso, os altos valores de

perda de pacotes devem-se a interferências entre as estações base, provocadas pela perda de propagação inerente ao meio heterogêneo, onde picocélulas e femtocélulas encontram-se dentro do raio de cobertura da macrocélula.

Em contraste com a análise dos *bearers* GBR admitidos versus os *bearers* GBR rejeitados, conduzida no item 5.4.2.1, onde os algoritmos de estimativa de capacidade e velocidade de usuário, em conjunto, foram responsáveis por um resultado ótimo (melhor caso de QoS), os resultados da Tabela 12, quando comparados com os resultados da Tabela 11, indicam que o algoritmo de estimativa de capacidade ativado tanto no cenário CAP quanto no cenário C&S, foi sem dúvida o responsável pela redução na taxa de descarte de pacotes, enquanto que o algoritmo de cálculo da velocidade média de locomoção de usuário mostrou uma pequena influência de 0,58% (20,23% - 19,65%) nessa métrica.

5.4.2.3 Delay LTE

A Tabela 15 resume o *delay* LTE, que representa o retardo de todo o tráfego que chega à camada LTE e que flui entre as eNodeBs e os UEs. Os dados mostram que um melhor resultado foi alcançado com o cenário CAP (somente o algoritmo de estimativa de capacidade ativo), que apresentou um *delay* LTE de 1,87 segundos contra o resultado de 2,87 segundos para o cenário C&S (ambos os algoritmos de estimativa de capacidade e velocidade média do usuário ativos). No entanto, considerando-se o desempenho geral do sistema, bem como as outras métricas apresentadas, o *delay* LTE de 2,87 segundos encontrado no cenário C&S ainda representa uma redução significativa de 55,63% (4,42 segundos contra 2,84 segundos) no *delay* do acesso LTE.

Tabela 15 – Delay LTE (em segundos)

Estação Base	Cenários		
	REF	CAP	C&S
Macro	3,54	1,20	1,83
Pico1	0,08	0,16	0,11
Pico2	0,09	0,08	0,12
Pico3	0,14	0,09	0,15
Femto1	0,38	0,11	0,38
Femto2	0,09	0,09	0,09
Femto3	0,10	0,14	0,16
Total	4,42	1,87	2,84

5.4.3 Análise de Sensibilidade

Com o objetivo de avaliar a resposta dos algoritmos à variação dos coeficientes dos critérios adicionais propostos nesta dissertação (estimativa de capacidade das estações base e

velocidade de UE), foram realizados os seguintes testes, que permitem conduzir uma análise básica de sensibilidade³¹:

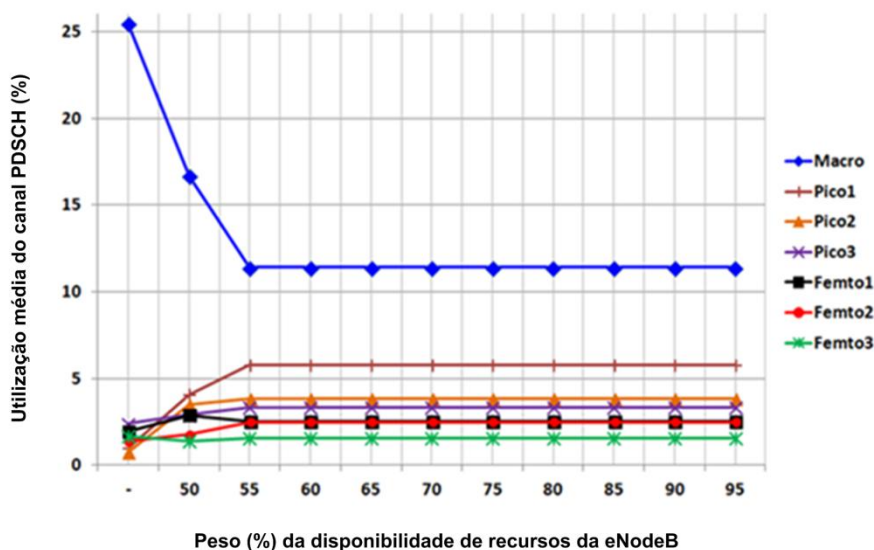
- Variação do peso do parâmetro *estimativa média de disponibilidade de recursos* das estações base (estimativa de capacidade);
- Variação da *velocidade-limite* para detecção de mobilidade veicular.

Nos gráficos a seguir, cada ponto assinalado nas curvas traçadas refere-se a um período completo de simulação de 150 segundos, a partir do qual foi calculado o valor médio para cada estação base.

5.4.3.1 Variação do Peso da Disponibilidade de Recursos com Algoritmo de Velocidade de UE Desativado

Considerando o comportamento médio do sistema diante da variação do coeficiente (peso) do parâmetro *Estimativa de Capacidade* (disponibilidade de recursos em termos de PRBs para as estações base), com o algoritmo de detecção de velocidade de UE desativado, a Figura 29 ilustra o comportamento do sistema.

Figura 29 - Variação do Peso da Disponibilidade de Recursos sem Detecção de Velocidade de UE



Tanto no eixo horizontal da Figura 29, quanto na coluna (-) da Tabela 16, o (-) indica que o algoritmo de estimativa de disponibilidade média de capacidade de recursos também encontra-se desativado.

³¹ De acordo com HILLIER & LIEBERMAN (2001), um dos principais objetivos da análise de sensibilidade é identificar parâmetros sensíveis, ou seja, parâmetros cujos valores não podem ser alterados sem alterar a solução ótima. Além disso, para certos parâmetros não categorizados como sensíveis, também é muito útil determinar a faixa de valores que mantém a solução ótima inalterada.

A partir do gráfico da Figura 29, pode-se observar que:

- **Peso “-“ (algoritmo de estimativa de capacidade desativado):** os valores médios de utilização das estações base refletem os mesmos valores encontrados na Tabela 11, já que essa simulação representa o mesmo cenário REF, onde os dois critérios adicionais encontram-se desativados (estimativa de capacidade e velocidade de UE), correspondendo portanto ao comportamento padrão da Release 8 do LTE.
- **Peso 50%:** os valores médios de utilização das estações base obtidos para esta simulação, onde a estimativa de capacidade têm o mesmo peso (50%) que o conjunto RSRP+RSRQ (50%), mostram um desafogamento significativo no tráfego da macrocélula (queda na utilização de 25,46% para 16,67%), com as pico e femtocélulas assumindo mais tráfego, tornando-as menos ociosas (o que é desejável).
- **Pesos de 60% a 95%:** representam o intervalo de estabilidade do sistema, dentro do qual a variação de peso não influencia os resultados, apresentando sempre os mesmos valores de saída. Nessa faixa de pesos, o tráfego na macrocélula cai mais 5,28% (16,67% - 11,39%), representando, no total, uma queda no tráfego de 14,07% (25,46% - 11,39%).

A Tabela 16 resume o comportamento do sistema diante da variação do coeficiente (peso) do parâmetro *Estimativa de Capacidade*.

Tabela 16 - Variação do peso da estimativa de capacidade sem detecção de velocidade de UE

Estação Base	Utilização média do Canal PDSCH (%)		
	(-)	50%	55% a 95%
Macro	25,46	16,67	11,39
Pico1	1,00	4,05	5,75
Pico2	0,75	3,47	3,80
Pico3	2,39	2,89	3,33
Femto1	1,94	2,89	2,52
Femto2	1,38	1,77	2,49
Femto3	1,66	1,36	1,55

Importante mencionar que para pesos acima de 95%, as simulações mostraram-se instáveis e foram interrompidas (abortadas) pelo simulador, tornando seus resultados inválidos para avaliação.

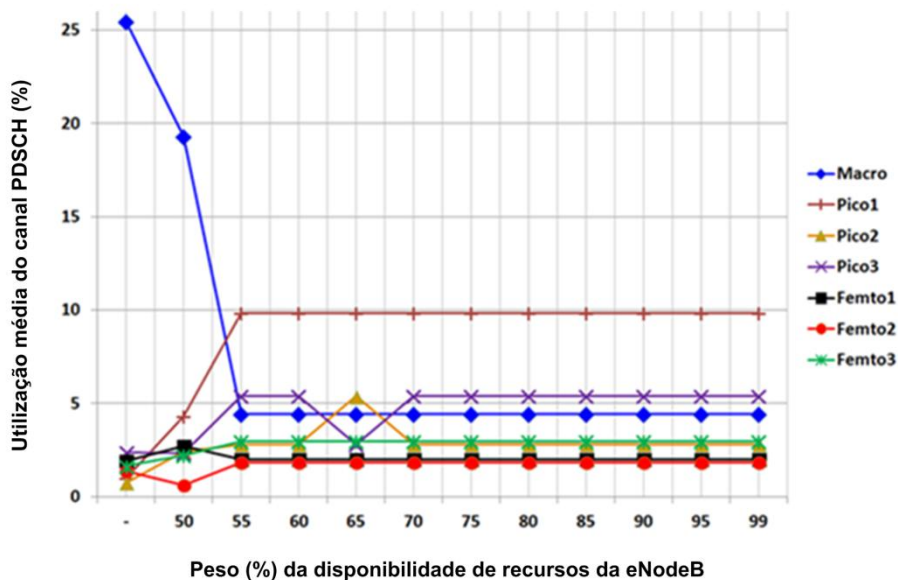
5.4.3.2 Variação do Peso da Disponibilidade de Recursos com Limiar de Velocidade de UE fixo em 5 km/h

Este teste difere daquele cujos resultados foram expostos no item 5.4.3.1 quanto ao algoritmo de detecção de velocidade do UE, cujo limiar é fixado em 5 km/h, fazendo com que

femtocélulas sejam ignoradas para usuários se locomovendo a velocidades veiculares (acima de 5 km/h).

Neste caso, devido ao fato de femtocélulas passarem a atender apenas usuários que se locomovem a velocidades de pedestre (abaixo de 5 km/h), a Pico1 assumiu um volume de tráfego maior, fazendo com que o desafogamento da macrocélula caísse ainda mais em comparação com o teste do item 5.4.3.1 (algoritmo de detecção de velocidade de UE desativado), conforme demonstrado na Figura 30.

Figura 30 - Variação do Peso da Disponibilidade de Recursos com Limiar de Velocidade de UE em 5 km/h



No entanto, para este teste, observa-se que a ativação do algoritmo de detecção de velocidade de usuário provocou uma mudança no comportamento do intervalo de estabilidade quando comparado ao teste realizado no item 5.4.3.1, já que a mudança nas cargas das femtocélulas fizeram com que as cargas nas estações base Pico2 e Pico3 aumentassem, conforme detalha a Tabela 17.

Tabela 17 - Variação do peso da estimativa de capacidade com limiar de velocidade de UE em 5 km/h

Estação Base	Utilização média do Canal PDSCH (%)					
	(-)	50%	55%	60%	65%	70% a 99%
Macro	25,46	19,29	4,43	4,43	4,43	4,43
Pico1	1,00	4,32	9,85	9,85	9,85	9,85
Pico2	0,75	2,44	2,82	2,82	5,39	2,82
Pico3	2,39	2,34	5,39	5,39	2,82	5,39
Femto1	1,94	2,74	2,00	2,00	2,00	2,00
Femto2	1,38	0,63	1,85	1,85	1,85	1,85
Femto3	1,66	2,22	2,98	2,98	2,98	2,98

Observa-se, ainda, com relação ao teste realizado no item 5.4.3.1, que a macrocélula sofreu um acréscimo de carga para o peso 50% (de 16,67% para 19,29%), enquanto que

para o intervalo de pesos que vai de 55% até 99%, a macrocélula sofreu uma redução de carga de 11,39% para 4,43%, mostrando que o uso conjunto de estimativa de capacidade e velocidade de UE apresentam um melhor resultado, devido ao fato das picocélulas assumirem mais tráfego quando as femtocélulas deixam de atender usuários em velocidades acima de 5 km/h.

5.4.3.3 Variação do Limiar de Velocidade de UE com Peso da Disponibilidade de Recursos Fixo em 75%

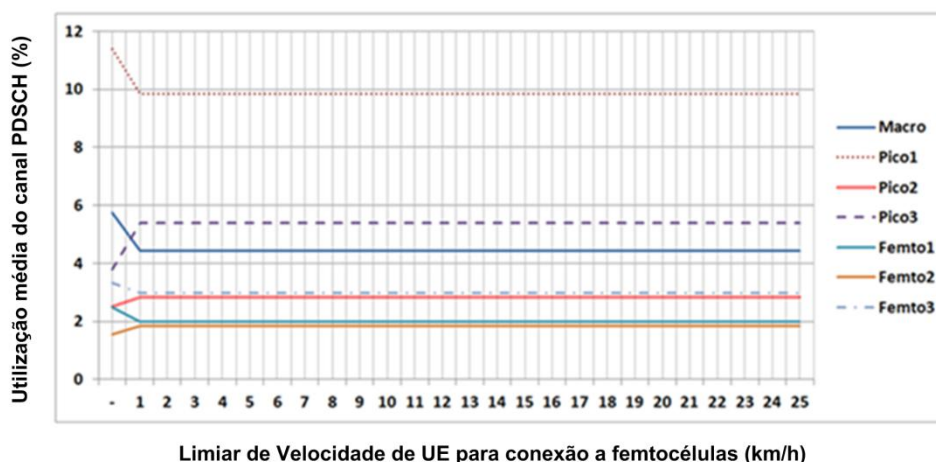
O algoritmo de estimativa de velocidade média de locomoção do usuário, não apenas calcula a velocidade média do UE com base nos últimos 10 segundos, mas também estabelece uma velocidade-limite (limiar) permissível para que femtocélulas possam ser selecionadas. Acima desse limiar, as femtocélulas tornam-se inacessíveis aos dispositivos móveis, como forma de proteção à qualidade de serviço tanto para o usuário (dono) da femtocélula, quanto para qualquer outro usuário.

A velocidade-limite padrão da solução proposta nesta dissertação é de 5 km/h, sendo esta velocidade considerada como a máxima velocidade de locomoção de pedestre. No entanto, para o teste de sensibilidade aqui proposto, o limiar sofre as seguintes alterações:

- (-), indicando que o algoritmo que considera a velocidade do usuário encontra-se desativado;
- Faixa de 1 a 25 km/h, em passos de 1 km/h.

Levando-se em consideração o peso (coeficiente) do parâmetro *disponibilidade de recursos* fixo em 75%, a Figura 31 mostra que a partir de 1 km/h até 25 km/h, as cargas das estações base (percentual de utilização) mantêm-se estáveis. Ou seja, para o cenário configurado, a variação do limiar de velocidade não implica em variação nos volumes de tráfego assumidos pelas estações base.

Figura 31 - Variação do Limiar de Velocidade de UE com Peso da Disponibilidade de Recursos fixo em 75%



No entanto, deve-se observar que cada ponto de velocidade no eixo horizontal da Figura 31 reflete, no eixo vertical (percentual de utilização das estações base), o uso médio relativo a 150 segundos de simulação. Portanto, as oscilações dependentes da velocidade de locomoção de cada UE não são visíveis no gráfico, já que trata-se de média comportamental. Porém, para se ter uma ideia sobre a influência da velocidade dos UEs na distribuição das cargas, deve-se observar a Figura 27, especificamente o cenário C&S, que inclui o algoritmo de estimativa de velocidade média de locomoção do usuário.

A Tabela 18 detalha, numericamente, a distribuição das cargas de tráfego por entre as estações base, mostrando que, como comportamento médio do sistema, a variação do limiar de velocidade de UE para conexão a femtocélulas (de 1 a 25 km/h), representa um intervalo de estabilidade.

Tabela 18 - Variação do limiar de velocidade do UE com peso da estimativa de capacidade em 75%

Estação Base	Utilização média do Canal PDSCH (%)	
	(-)	Limiar Velocidade de 1 a 25 km/h
Macro	7,75	4,43
Pico1	11,39	9,85
Pico2	2,52	2,82
Pico3	3,81	5,39
Femto1	2,49	2,00
Femto2	1,55	1,85
Femto3	3,33	2,98

Quanto a influência do algoritmo de estimativa de velocidade de usuário no balanceamento de carga, tanto a Figura 31 quanto a Tabela 18, mostram que:

- A macrocélula apresentou uma redução na sua utilização (de 7,75% para 4,43%);
- As picocélulas assumiram as cargas de tráfego que seriam drenadas das femtocélulas, apresentando um aumento em suas utilizações;
- As femtocélulas Femto1 e Femto3 apresentaram uma queda nos seus tráfegos, de 2,49% para 2,00% e de 3,33% para 2,98%, respectivamente, já que usuários em locomoção acima de 1 km/h (em média) não tiveram permissão para se conectarem a elas.

5.5 Considerações Finais

Este capítulo apresentou os resultados, tendo o simulador discreto OPNET *Modeler* como opção para validação, bem como a avaliação de desempenho da proposta desta dissertação, usando as seguintes métricas para tal objetivo: a) Taxa de utilização (%) do canal PDSCH da camada física (PHY) do LTE; b) Quantidade de EPS *bearers* GBR admitidos; c) Quantidade de EPS *bearers* GBR rejeitados; d) Taxa de descarte de pacotes no *downlink*; e) *Delay* LTE.

Com o objetivo de observar e analisar o comportamento das métricas selecionadas, foram configurados três cenários, parametrizados de maneira idêntica, sendo diferenciados apenas pelos algoritmos neles implementados: REF (*baseline*), CAP (estimativa de capacidade) e C&S (estimativa de capacidade + velocidade média de usuário), sendo os resultados analisados tanto graficamente, quanto numericamente.

O próximo capítulo encerra este trabalho com as conclusões sobre esta dissertação, incluindo as contribuições à área, as dificuldades encontradas, bem como sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 6 – Conclusão

Os resultados da simulação discreta, com a adoção dos algoritmos aqui propostos e implementados, mostraram que foram alcançados ganhos significativos quanto ao balanceamento de carga da rede para os cenários específicos REF, CAP e C&S, bem como melhoria na percepção de QoS para os usuários quando os critérios adicionais foram adotados. Como consequência, uma melhoria do nível de QoS pode ser alcançada com a solução proposta neste trabalho, já que a macrocélula se torna mais livre para aceitar conexões de um número maior de usuários que demandem mais recursos de banda. Além disso, os usuários de femtocélulas não sofrerão o impacto dos usuários que estejam em velocidades veiculares, o que faz com que as femtocélulas de uso doméstico (HeNB) se tornem mais disponíveis para seus proprietários. Também, as picocélulas passam a assumir mais tráfego de rede, mesmo com suas baixas potências de transmissão em comparação com a potência da macrocélula.

Foi demonstrado que as estações base de baixa potência (picocélulas e femtocélulas) assumiram mais fluxo de tráfego na rede, considerando que os usuários dessas estações base puderam se beneficiar de ordens de modulação mais altas, tais como 64QAM (e, portanto, valores de *throughput* mais altos) pelo fato de estarem mais próximos de uma estação base com probabilidade mais alta de boa qualidade de *link* de rádio. Além disso, os usuários que estavam mais próximos da macrocélula passaram a ter mais recursos disponíveis à sua disposição.

As femtocélulas tiveram suas cargas de trabalho reduzidas, principalmente devido ao algoritmo de verificação de compatibilidade da velocidade média de locomoção do usuário com o tipo de estação base, o que fez com que usuários em velocidade veicular ignorassem as femtocélulas na rede. Isso foi demonstrado a partir do número reduzido de EPS *Bearers* GBR, quando o cenário C&S (algoritmos de estimativa de capacidade + verificação de velocidade de usuário implementados) foi comparado ao cenário REF (comportamento padrão do LTE Rel-8).

A seguir, são mencionadas as contribuições deste trabalho à comunidade, as dificuldades encontradas ao longo das implementações de software e experimentos com o simulador, finalizando esta dissertação com a indicação de trabalhos futuros.

6.1 Contribuições à Área

As principais possíveis contribuições deste trabalho são:

- a. Proposição de uma nova abordagem de seleção de célula e *handover* para redes LTE heterogêneas, utilizando critérios adicionais baseados em estimativa de

capacidade de recursos (PRBs) das estações base e velocidade média de locomoção de usuário, com o objetivo de melhorar o balanceamento de carga na rede e, conseqüentemente, melhorar a percepção de QoS por parte dos usuários.

- b. Um estudo investigativo sobre a arquitetura de redes LTE e, mais especificamente, sobre o processo de seleção de célula e *handover* para redes LTE heterogêneas e dos processos que envolvem a alocação de recursos para os UEs, através de pesquisas bibliográficas e testes empíricos usando o simulador discreto OPNET *Modeler* versão 17.5 (*Educational Edition*);
- c. Planejamento e implementação de cenário de rede LTE heterogênea, no simulador discreto OPNET *Modeler*;
- d. Implementação (no OPNET) de algoritmo de estimativa de capacidade recursos disponíveis (PRBs) com base no percentual de utilização (%) de uma eNodeB, conforme informado via canal PDSCH (*Physical Downlink Shared Channel*);
- e. Implementação (no OPNET) de algoritmo para cálculo da velocidade média de locomoção do usuário (UE);
- f. Identificação dos principais parâmetros que envolvem o processo de seleção de célula e *handover*, bem como dos principais parâmetros envolvidos nos processos de alocação de recursos no *downlink*;
- g. Concepção de critérios adicionais aos já existentes na *Release 8* do LTE (RSRP e RSRQ), que priorize a seleção de célula e *handover* com base na estimativa de capacidade disponível e velocidade média de locomoção do usuário;
- h. Desenvolvimento de três materiais didáticos sobre introdução ao OPNET, planejamento, configuração, simulação, coleta de estatísticas e análise de resultados, conforme abaixo. Material utilizado durante o estágio em docência.
 - OPNET - Apresentação do Simulador Discreto: apresentação com 23 slides;
 - OPNET - Tutorial Rede LTE Básica: tutorial com 51 páginas;
 - OPNET - Tutorial Rede LTE - VoIP e Videoconferência: tutorial com 61 páginas.
- i. Estágio em docência , envolvendo aulas e reuniões com alunos de mestrado do PPGE, no período 2014.2, para ajudar nos seus trabalhos com simulação LTE.
- j. Artigo com o título “A New Cell Selection and Handover Approach in Heterogeneous LTE Networks: Additional Criteria Based on Capacity Estimation and User Speed”, ISBN 978-1-61208-411-4, publicado em conferência internacional, classificada como CAPES-CC B1: *AICT 2015 – The Eleventh*

Advanced International Conference on Telecommunications, sediada em Bruxelas, na Bélgica, em 21 de junho de 2015, organizada pela IARIA – *International Academy, Research, and Industry Association* (LA-ROQUE, SILVA e FRANCÊS, 2015). Artigo acessível em: https://www.thinkmind.org/index.php?view=article&articleid=aict_2015_4_20_10053.

6.2 Dificuldades Encontradas

Devido às restrições de *software* e *hardware* enfrentadas com o simulador discreto OPNET *Modeler 17.5.A (Educational Edition)*, com a configuração de cenários complexos e realísticos (REF, CAP e C&S), limitando não apenas o tempo de cada simulação (150 segundos), mas também o número de *seeds* com simulações concluídas com sucesso, tempos de simulação acima de 150 segundos provocavam abortos durante as simulações, provavelmente devido às instabilidades geradas pelo número muito grande de eventos gerados (em torno de 60 milhões de eventos para cada um dos cenários), fazendo com que somente alguns raros *seeds* conseguissem atingir o tempo delimitado para cada simulação. Esse fato impossibilitou um tratamento estatístico mais adequado a uma avaliação de desempenho mais primorosa, através de intervalos de confiança que refletissem o comportamento médio de um sistema realístico.

6.3 Trabalhos Futuros

Como sugestões para trabalhos futuros, é desejável:

- a. Empreender um estudo mais profundo com relação ao método utilizado para o cálculo dos pesos tanto para os valores dos parâmetros RSRP e RSRQ, quanto para os valores do parâmetro de estimativa de capacidade, a fim de que o efeito do balanceamento de carga da rede possa ser refinado.
- b. Buscar uma compreensão mais detalhada sobre o efeito da velocidade de locomoção de UEs *outdoor* sobre a qualidade dos serviços móveis para os usuários de femtocélulas *indoor*.
- c. Realizar experimentos com diferentes modelos de perda de propagação (*pathloss*), bem como com maiores distâncias entre os UEs e as estações base.
- d. Realizar a simulação dos cenários aqui propostos, usando o simulador discreto NS3 - *Network Simulator*, com o objetivo de superar as dificuldades mencionadas no item 6.2.
- e. Empreender estudo metódico sobre as melhores escolhas relativas aos tempos de amostragem, utilizados tanto no cálculo de velocidade média de locomoção

dos usuários, quanto no cálculo de disponibilidade média de recursos (PRBs) das estações base

- f.* Incluir na avaliação de desempenho a qualidade de experiência do usuário (QoE) para medir a satisfação do usuário.

Referências

3GPP TS 136.213 V8.3.0, LTE - Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): Physical layer procedures (Release 8). **Technical Specification**, 2008. Disponível em: <http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136213/08.03.00_60/ts_136213v080300p.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2015.

3GPP TS 136.304 V8.6.0, LTE - Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA): User Equipment (UE) procedures in idle mode (Release 8). **Technical Specification**, 2009. Disponível em: <http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136300_136399/136304/08.06.00_60/ts_136304v080600p.pdf>. Acesso em 13 jul. 2015.

4G AMERICAS. **New Wireless Broadband Applications and Devices: Understanding the Impact on Networks**. White Paper, Maio 2012a. Disponível em: http://www.4gamericas.org/files/3414/0759/4613/4G_Americas_White_Paper_New_Wireless_Broadband_Applications_and_Devices_May_2012.pdf. Acesso em: 13 jul. 2015.

4G AMERICAS. **Mobile Broadband Explosion: The 3GPP Wireless Evolution**. White Paper, Agosto 2012b. Disponível em: <http://www.4gamericas.org/files/5414/0759/4533/4G_Americas_Mobile_Broadband_Explosion_August_20121.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2015.

4G AMERICAS. Associação setorial dos principais provedores de serviços e fabricantes do setor de telecomunicações. 2015. Disponível em: <<http://www.4gamericas.org/pt-br/about-us/>>. Acesso em: 18/05/2015.

ANDREWS, Jeffrey G.; GHOSH, Arunabha; MUHAMED, Rias. **Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking**. New York, USA: Prentice Hall, 2007. 478 p.

ALI-YAHIYA, Tara. **Understanding LTE and its Performance**. New York, USA: Springer Science & Business Media, 2011a. 277 p.

ALI-YAHIYA, Tara. Introduction to Mobile Broadband Wireless. In: **Understanding LTE and its Performance**. Springer New York, 2011b. p. 3-15.

AMZALLAG, David et al. Cell selection in 4G cellular networks. **Mobile Computing, IEEE Transactions on**, v. 12, n. 7, p. 1443-1455, 2013.

BAHL, Paramvir et al. Cell breathing in wireless LANs: Algorithms and evaluation. **Mobile Computing, IEEE Transactions on**, v. 6, n. 2, p. 164-178, 2007.

BECVAR, Zdenek; MACH, Pavel. Mitigation of redundant handovers to femtocells by estimation of throughput gain. **Mobile Information Systems**, v. 9, n. 4, p. 315-330, 2013.

BEN HADJ SAID, S. et al. New control plane in 3GPP LTE/EPC architecture for on-demand connectivity service. In: **Cloud Networking (CloudNet), 2013 IEEE 2nd International Conference on**. IEEE, 2013. p. 205-209.

BOLCH, Gunter et al. **Queueing networks and Markov chains: modeling and performance evaluation with computer science applications**. 2ed. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2006. 896 p.

DAHLMAN, Erik; PARKVALL, Stefan; SKÖLD, Johan. **4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband**. Burlington, MA, USA: Academic press, 2013. 447 p.

DANTE, Luiz Roberto. **Matemática, volume único**. 1ed. São Paulo, Brasil: Ática, 2005. 504 p.

DAVASLIOGLU, Kemal; AYANOGLU, Ender. Interference-based cell selection in heterogenous networks. In: **Information Theory and Applications Workshop (ITA)**, IEEE, 2013. p. 1-6.

GALEANA-ZAPIÉN, Hiram; FERRÚS, Ramon. Design and evaluation of a backhaul-aware base station assignment algorithm for OFDMA-based cellular networks. **Wireless Communications, IEEE Transactions on**, v. 9, n. 10, p. 3226-3237, 2010.

GEVROS, Panos et al. Congestion control mechanisms and the best effort service model. **Network, IEEE**, v. 15, n. 3, p. 16-26, 2001.

GHALEB, Abdulziz M. et al. Throughput performance insights of LTE Release 8: Malaysia's perspective. In: **Wireless Communications and Mobile Computing Conference (IWCMC), 2013 9th International**. IEEE, 2013. p. 258-263.

HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. **Introduction to Operations Research**. 7ed. New York, USA: McGraw Hill, 2001. 1237 p.

HOLMA, Harri; TOSKALA, Antti. **LTE for UMTS: Evolution to LTE-advanced**. 2ed. Nokia Siemens Networks, Finland: John Wiley & Sons, 2011. 559 p.

IBRAHIM, A. et al. QoS-aware Traffic Offloading in 4G/WiFi Multi-RAT Heterogeneous Networks: Opnet-based Simulations and Real Prototyping Implementation. In: **The Ninth International Conference on Wireless and Mobile Communications, ICWMC**, 2013, pp.82-88.

OLMOS, Juan J.; FERRÚS, Ramon; GALEANA-ZAPIÉN, Hiram. Analytical modeling and performance evaluation of cell selection algorithms for mobile networks with backhaul capacity constraints. **Wireless Communications, IEEE Transactions on**, v. 12, n. 12, p. 6011-6023, 2013.

LA-ROQUE, E. J. C.; SILVA, C. P. A.; FRANCÊS, C. R. L. A New Cell Selection and Handover Approach in Heterogeneous LTE Networks: Additional Criteria Based on Capacity Estimation and User Speed. In: **The Eleventh Advanced International Conference on Telecommunications (AICT)**, IARIA, 2015. p. 57-65. ISBN 978-1-61208-411-4.

LIN, Cheng-Chung et al. Optimized performance evaluation of LTE hard handover algorithm with average RSRP constraint. **International Journal of Wireless & Mobile Networks**, v. 3, n. 2, p. 1-16, 2011.

LOBINGER, A. et al. Load balancing in downlink LTE self-optimizing networks. In: **71st Vehicular Technology Conf. (VTC 2010-Spring)**, IEEE, 2010, p. 1-5.

MATLAB - The Language of Technical Computing. 2015. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/products/matlab/index-b.html>>. Acesso em: 13 jul. 2015.

OPNET. Introduction os Simulation and OPNET. 2014a. Disponível em: <<http://networks2atksu.files.wordpress.com/2011/09/introduction-of-simulation-and-opnet.pptx>>. Acesso em: 13 jul. 2015.

OPNET. Network Simulation (OPNET Modeler Suite). 2014b. Disponível em: <<http://www.riverbed.com/products-solutions/products/network-performance-management/network-planning-simulation/Network-Simulation.html>>. Acesso em: 01 fev 2014.

PARRA-HERNANDEZ, Rafael; DIMOPOULOS, Nikitas J. A new heuristic for solving the multichoice multidimensional knapsack problem. **Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, IEEE Transactions on**, v. 35, n. 5, p. 708-717, 2005.

PERAHIA, Eldad; STACEY, Robert. **Next Generation Wireless LANS: 802.11n and 802.11ac**. 3ed. United Kingdom: Cambridge university press, 2013. 480 p.

PRASAD, R.; PRASAD, N. **802.11 WLANs and IP Networking: Security, QoS, and Mobility**. USA MA Norwood: Artech House. 2005.

QIAN, Cen; ZHANG, Sihai; ZHOU, Wuyang. A novel cell selection strategy with load balancing for both idle and RRC-connected users in 3GPP LTE network. In: **Wireless Communications & Signal Processing (WCSP), 2012 International Conference on**. IEEE, 2012. p. 1-6.

RODRIGUEZ, J. et al. Load balancing in a realistic urban scenario for LTE networks. In: **Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd, IEEE**, 2011. p. 1-5.

SESIA, Stefania; TOUFIK, Issam; BAKER, Matthew. **LTE–The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice**. 2ed. United Kingdom: John Wiley & Sons, Ltd., 2011. 794 p.

ULVAN, A.; BESTAK, R.; ULVAN, M. Handover Scenario and Procedure in LTE-based Femtocell Networks. In: **The Fourth International Conference on Mobile Ubiquitous Computing, Systems, Services and Technologies, UBICOMM**, 2010, p. 213-218.

ZHANG, Haijun et al. A novel handover mechanism between femtocell and macrocell for LTE based networks. In: **Communication Software and Networks, 2010. ICCSN'10. Second International Conference on, IEEE**, 2010. p. 228-231.

ZHANG, Mengru et al. A Lightly-loaded cell initiated Load Balancing in LTE self-optimizing networks. In: **Communications and Networking in China (CHINACOM), 2011 6th International ICST Conference on**. IEEE, 2011. p. 421-425.

Apêndice A – Determinação do Tamanho do Bloco de Transporte

A.1 Introdução

O conteúdo abaixo tem por objetivo complementar as informações que auxiliam no entendimento do cálculo de alocação de recursos de banda para redes LTE, tendo sido compilado a partir da Especificação Técnica ETSI TS 136 213 V8.3.0 (2008-11): *LTE – Evolved Universal Terrestrial Radio Access E-UTRA) – Physical Layer Procedures* (3GPP TS 36.213 version 8.3.0 Release 8). As informações foram retiradas a partir do item 7.1.7.2 (*Transport Block Size determination*)³² do documento mencionado.

A.2 Determinação do Tamanho do Bloco de Transporte

Para um *MCS Index* (I_{MCS}) entre 0 e 28, o UE deve primeiramente determinar o *TBS Index* (I_{TBS}), para isso utilizando o I_{MCS} e a Tabela 19.

Para um bloco de transporte (TB) que não esteja mapeado a uma multiplexação espacial de duas camadas, o TBS pode ser determinado através do procedimento no item A.2.1 abaixo. Caso o TB esteja mapeado a uma multiplexação de duas camadas, o TBS pode ser determinado através do procedimento no item A.2.2 adiante.

A.2.1 TBs Não Mapeados à Multiplexação de Duas Camadas

Para um número de PRBs (N_{PRB}) entre 1 e 110, o TBS é dado pela entrada (I_{TBS} , N_{PRB}) encontrada na Tabela 19.

³² O documento completo pode ser encontrado no site http://www.etsi.org/deliver/etsi_ts/136200_136299/136213/08.03.00_60/ts_136213v080300p.pdf, de onde somente a parte relativa à determinação do TBS foi retirada (3GPP, 2008).

Tabela 19 – Tamanho do Bloco de Transporte (TBS) (dimensão 27 x 110)

I_{TBS}	N_{PRB}									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	16	32	56	88	120	152	176	200	232	248
1	24	48	88	120	160	200	232	272	304	344
2	32	72	120	160	200	248	296	336	376	424
3	40	104	152	208	272	320	392	440	504	568
4	48	120	200	264	320	408	488	552	632	696
5	72	152	232	320	424	504	600	680	776	872
6	320	176	288	392	504	600	712	808	936	1032
7	104	232	320	472	584	712	840	968	1096	1224
8	120	248	392	536	680	808	968	1096	1256	1384
9	136	296	456	616	776	936	1096	1256	1416	1544
10	152	320	504	680	872	1032	1224	1384	1544	1736
11	176	376	584	776	1000	1192	1384	1608	1800	2024
12	208	440	680	904	1128	1352	1608	1800	2024	2280
13	232	488	744	1000	1256	1544	1800	2024	2280	2536
14	264	552	840	1128	1416	1736	1992	2280	2600	2856
15	280	600	904	1224	1544	1800	2152	2472	2728	3112
16	320	632	968	1288	1608	1928	2280	2600	2984	3240
17	336	696	1064	1416	1800	2152	2536	2856	3240	3624
18	376	776	1160	1544	1992	2344	2792	3112	3624	4008
19	408	840	1288	1736	2152	2600	2984	3496	3880	4264
20	440	904	1384	1864	2344	2792	3240	3752	4136	4584
21	488	1000	1480	1992	2472	2984	3496	4008	4584	4968
22	520	1064	1608	2152	2664	3240	3752	4264	4776	5352
23	552	1128	1736	2280	2856	3496	4008	4584	5160	5736
24	584	1192	1800	2408	2984	3624	4264	4968	5544	5992
25	616	1256	1864	2536	3112	3752	4392	5160	5736	6200
26	648	1320	1992	2664	3368	4008	4584	5352	5992	6712

I_{TBS}	N_{PRB}									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
0	288	304	344	376	392	424	456	488	504	536
1	376	424	456	488	520	568	600	632	680	712
2	472	520	568	616	648	696	744	776	840	872
3	616	680	744	808	872	904	968	1032	1096	1160
4	776	840	904	1000	1064	1128	1192	1288	1352	1416
5	968	1032	1128	1224	1320	1384	1480	1544	1672	1736
6	1128	1224	1352	1480	1544	1672	1736	1864	1992	2088
7	1320	1480	1608	1672	1800	1928	2088	2216	2344	2472
8	1544	1672	1800	1928	2088	2216	2344	2536	2664	2792
9	1736	1864	2024	2216	2344	2536	2664	2856	2984	3112
10	1928	2088	2280	2472	2664	2792	2984	3112	3368	3496
11	2216	2408	2600	2792	2984	3240	3496	3624	3880	4008
12	2472	2728	2984	3240	3368	3624	3880	4136	4392	4584
13	2856	3112	3368	3624	3880	4136	4392	4584	4968	5160
14	3112	3496	3752	4008	4264	4584	4968	5160	5544	5736
15	3368	3624	4008	4264	4584	4968	5160	5544	5736	6200
16	3624	3880	4264	4584	4968	5160	5544	5992	6200	6456
17	4008	4392	4776	5160	5352	5736	6200	6456	6712	7224
18	4392	4776	5160	5544	5992	6200	6712	7224	7480	7992
19	4776	5160	5544	5992	6456	6968	7224	7736	8248	8504
20	5160	5544	5992	6456	6968	7480	7992	8248	8760	9144
21	5544	5992	6456	6968	7480	7992	8504	9144	9528	9912
22	5992	6456	6968	7480	7992	8504	9144	9528	10296	10680
23	6200	6968	7480	7992	8504	9144	9912	10296	11064	11448
24	6712	7224	7992	8504	9144	9912	10296	11064	11448	12216
25	6968	7480	8248	8760	9528	10296	10680	11448	12216	12576
26	7224	7992	8504	9144	9912	10680	11448	11832	12576	12960

I_{TBS}	N_{PRB}									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0	568	600	616	648	680	712	744	776	776	808
1	744	776	808	872	904	936	968	1000	1032	1064
2	936	968	1000	1064	1096	1160	1192	1256	1288	1320
3	1224	1256	1320	1384	1416	1480	1544	1608	1672	1736
4	1480	1544	1608	1736	1800	1864	1928	1992	2088	2152
5	1864	1928	2024	2088	2216	2280	2344	2472	2536	2664
6	2216	2280	2408	2472	2600	2728	2792	2984	2984	3112
7	2536	2664	2792	2984	3112	3240	3368	3368	3496	3624
8	2984	3112	3240	3368	3496	3624	3752	3880	4008	4264
9	3368	3496	3624	3752	4008	4136	4264	4392	4584	4776
10	3752	3880	4008	4264	4392	4584	4776	4968	5160	5352
11	4264	4392	4584	4776	4968	5352	5544	5736	5992	5992
12	4776	4968	5352	5544	5736	5992	6200	6456	6712	6712
13	5352	5736	5992	6200	6456	6712	6968	7224	7480	7736
14	5992	6200	6456	6968	7224	7480	7736	7992	8248	8504
15	6456	6712	6968	7224	7736	7992	8248	8504	8760	9144
16	6712	7224	7480	7736	7992	8504	8760	9144	9528	9912
17	7480	7992	8248	8760	9144	9528	9912	10296	10296	10680
18	8248	8760	9144	9528	9912	10296	10680	11064	11448	11832
19	9144	9528	9912	10296	10680	11064	11448	12216	12576	12960
20	9912	10296	10680	11064	11448	12216	12576	12960	13536	14112
21	10680	11064	11448	12216	12576	12960	13536	14112	14688	15264
22	11448	11832	12576	12960	13536	14112	14688	15264	15840	16416
23	12216	12576	12960	13536	14112	14688	15264	15840	16416	16992
24	12960	13536	14112	14688	15264	15840	16416	16992	17568	18336
25	13536	14112	14688	15264	15840	16416	16992	17568	18336	19080
26	14112	14688	15264	15840	16416	16992	17568	18336	19080	19848

I_{TBS}	N_{PRB}									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
0	840	872	904	936	968	1000	1032	1032	1064	1096
1	1128	1160	1192	1224	1256	1288	1352	1384	1416	1416
2	1384	1416	1480	1544	1544	1608	1672	1672	1736	1800
3	1800	1864	1928	1992	2024	2088	2152	2216	2280	2344
4	2216	2280	2344	2408	2472	2600	2664	2728	2792	2856
5	2728	2792	2856	2984	3112	3112	3240	3368	3496	3496
6	3240	3368	3496	3496	3624	3752	3880	4008	4136	4136
7	3752	3880	4008	4136	4264	4392	4584	4584	4776	4968
8	4392	4584	4584	4776	4968	4968	5160	5352	5544	5544
9	4968	5160	5160	5352	5544	5736	5736	5992	6200	6200
10	5544	5736	5736	5992	6200	6200	6456	6712	6712	6968
11	6200	6456	6712	6968	6968	7224	7480	7736	7736	7992
12	6968	7224	7480	7736	7992	8248	8504	8760	8760	9144
13	7992	8248	8504	8760	9144	9144	9528	9912	9912	10296
14	8760	9144	9528	9912	9912	10296	10680	11064	11064	11448
15	9528	9912	10296	10296	10680	11064	11448	11832	11832	12216
16	9912	10296	10680	11064	11448	11832	12216	12216	12576	12960
17	11064	11448	11832	12216	12576	12960	13536	13536	14112	14688
18	12216	12576	12960	13536	14112	14112	14688	15264	15264	15840
19	13536	13536	14112	14688	15264	15264	15840	16416	16992	16992
20	14688	14688	15264	15840	16416	16992	16992	17568	18336	18336
21	15840	15840	16416	16992	17568	18336	18336	19080	19848	19848
22	16992	16992	17568	18336	19080	19080	19848	20616	21384	21384
23	17568	18336	19080	19848	19848	20616	21384	22152	22152	22920
24	19080	19848	19848	20616	21384	22152	22920	22920	23688	24496
25	19848	20616	20616	21384	22152	22920	23688	24496	24496	25456
26	20616	21384	22152	22920	22920	23688	24496	25456	25456	26416

I_{TBS}	N_{PRB}									
	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
0	1128	1160	1192	1224	1256	1256	1288	1320	1352	1384
1	1480	1544	1544	1608	1608	1672	1736	1736	1800	1800
2	1800	1864	1928	1992	2024	2088	2088	2152	2216	2216
3	2408	2472	2536	2536	2600	2664	2728	2792	2856	2856
4	2984	2984	3112	3112	3240	3240	3368	3496	3496	3624
5	3624	3752	3752	3880	4008	4008	4136	4264	4392	4392
6	4264	4392	4584	4584	4776	4776	4968	4968	5160	5160
7	4968	5160	5352	5352	5544	5736	5736	5992	5992	6200
8	5736	5992	5992	6200	6200	6456	6456	6712	6968	6968
9	6456	6712	6712	6968	6968	7224	7480	7480	7736	7992
10	7224	7480	7480	7736	7992	7992	8248	8504	8504	8760
11	8248	8504	8760	8760	9144	9144	9528	9528	9912	9912
12	9528	9528	9912	9912	10296	10680	10680	11064	11064	11448
13	10680	10680	11064	11448	11448	11832	12216	12216	12576	12960
14	11832	12216	12216	12576	12960	12960	13536	13536	14112	14112
15	12576	12960	12960	13536	13536	14112	14688	14688	15264	15264
16	13536	13536	14112	14112	14688	14688	15264	15840	15840	16416
17	14688	15264	15264	15840	16416	16416	16992	17568	17568	18336
18	16416	16416	16992	17568	17568	18336	18336	19080	19080	19848
19	17568	18336	18336	19080	19080	19848	20616	20616	21384	21384
20	19080	19848	19848	20616	20616	21384	22152	22152	22920	22920
21	20616	21384	21384	22152	22920	22920	23688	24496	24496	25456
22	22152	22920	22920	23688	24496	24496	25456	25456	26416	27376
23	23688	24496	24496	25456	25456	26416	27376	27376	28336	28336
24	25456	25456	26416	26416	27376	28336	28336	29296	29296	30576
25	26416	26416	27376	28336	28336	29296	29296	30576	31704	31704
26	27376	27376	28336	29296	29296	30576	31704	31704	32856	32856

I_{TBS}	N_{PRB}									
	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
0	1416	1416	1480	1480	1544	1544	1608	1608	1608	1672
1	1864	1864	1928	1992	1992	2024	2088	2088	2152	2152
2	2280	2344	2344	2408	2472	2536	2536	2600	2664	2664
3	2984	2984	3112	3112	3240	3240	3368	3368	3496	3496
4	3624	3752	3752	3880	4008	4008	4136	4136	4264	4264
5	4584	4584	4776	4776	4776	4968	4968	5160	5160	5352
6	5352	5352	5544	5736	5736	5992	5992	5992	6200	6200
7	6200	6456	6456	6712	6712	6712	6968	6968	7224	7224
8	7224	7224	7480	7480	7736	7736	7992	7992	8248	8504
9	7992	8248	8248	8504	8760	8760	9144	9144	9144	9528
10	9144	9144	9144	9528	9528	9912	9912	10296	10296	10680
11	10296	10680	10680	11064	11064	11448	11448	11832	11832	12216
12	11832	11832	12216	12216	12576	12576	12960	12960	13536	13536
13	12960	13536	13536	14112	14112	14688	14688	14688	15264	15264
14	14688	14688	15264	15264	15840	15840	16416	16416	16992	16992
15	15840	15840	16416	16416	16992	16992	17568	17568	18336	18336
16	16416	16992	16992	17568	17568	18336	18336	19080	19080	19848
17	18336	19080	19080	19848	19848	20616	20616	20616	21384	21384
18	19848	20616	21384	21384	22152	22152	22920	22920	23688	23688
19	22152	22152	22920	22920	23688	24496	24496	25456	25456	25456
20	23688	24496	24496	25456	25456	26416	26416	27376	27376	28336
21	25456	26416	26416	27376	27376	28336	28336	29296	29296	30576
22	27376	28336	28336	29296	29296	30576	30576	31704	31704	32856
23	29296	29296	30576	30576	31704	31704	32856	32856	34008	34008
24	31704	31704	32856	32856	34008	34008	35160	35160	36696	36696
25	32856	32856	34008	34008	35160	35160	36696	36696	37888	37888
26	34008	34008	35160	35160	36696	36696	37888	37888	39232	39232

I_{TBS}	N_{PRB}									
	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
0	1672	1736	1736	1800	1800	1800	1864	1864	1928	1928
1	2216	2280	2280	2344	2344	2344	2408	2472	2536	2536
2	2728	2792	2856	2856	2856	2984	2984	3112	3112	3112
3	3624	3624	3624	3752	3752	3880	3880	4008	4008	4136
4	4392	4392	4584	4584	4584	4776	4776	4968	4968	4968
5	5352	5544	5544	5736	5736	5736	5992	5992	5992	6200
6	6456	6456	6456	6712	6712	6968	6968	6968	7224	7224
7	7480	7480	7736	7736	7992	7992	8248	8248	8504	8504
8	8504	8760	8760	9144	9144	9144	9528	9528	9528	9912
9	9528	9912	9912	10296	10296	10296	10680	10680	11064	11064
10	10680	11064	11064	11448	11448	11448	11832	11832	12216	12216
11	12216	12576	12576	12960	12960	13536	13536	13536	14112	14112
12	14112	14112	14112	14688	14688	15264	15264	15264	15840	15840
13	15840	15840	16416	16416	16992	16992	16992	17568	17568	18336
14	17568	17568	18336	18336	18336	19080	19080	19848	19848	19848
15	18336	19080	19080	19848	19848	20616	20616	20616	21384	21384
16	19848	19848	20616	20616	21384	21384	22152	22152	22152	22920
17	22152	22152	22920	22920	23688	23688	24496	24496	24496	25456
18	24496	24496	24496	25456	25456	26416	26416	27376	27376	27376
19	26416	26416	27376	27376	28336	28336	29296	29296	29296	30576
20	28336	29296	29296	29296	30576	30576	31704	31704	31704	32856
21	30576	31704	31704	31704	32856	32856	34008	34008	35160	35160
22	32856	34008	34008	34008	35160	35160	36696	36696	36696	37888
23	35160	35160	36696	36696	37888	37888	37888	39232	39232	40576
24	36696	37888	37888	39232	39232	40576	40576	42368	42368	42368
25	39232	39232	40576	40576	40576	42368	42368	43816	43816	43816
26	40576	40576	42368	42368	43816	43816	43816	45352	45352	46888

I_{TBS}	N_{PRB}									
	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
0	1992	1992	2024	2088	2088	2088	2152	2152	2216	2216
1	2600	2600	2664	2728	2728	2792	2792	2856	2856	2856
2	3240	3240	3240	3368	3368	3368	3496	3496	3496	3624
3	4136	4264	4264	4392	4392	4392	4584	4584	4584	4776
4	5160	5160	5160	5352	5352	5544	5544	5544	5736	5736
5	6200	6200	6456	6456	6712	6712	6712	6968	6968	6968
6	7480	7480	7736	7736	7736	7992	7992	8248	8248	8248
7	8760	8760	8760	9144	9144	9144	9528	9528	9528	9912
8	9912	9912	10296	10296	10680	10680	10680	11064	11064	11064
9	11064	11448	11448	11832	11832	11832	12216	12216	12576	12576
10	12576	12576	12960	12960	12960	13536	13536	13536	14112	14112
11	14112	14688	14688	14688	15264	15264	15840	15840	15840	16416
12	16416	16416	16416	16992	16992	17568	17568	17568	18336	18336
13	18336	18336	19080	19080	19080	19848	19848	19848	20616	20616
14	20616	20616	20616	21384	21384	22152	22152	22152	22920	22920
15	22152	22152	22152	22920	22920	23688	23688	23688	24496	24496
16	22920	23688	23688	24496	24496	24496	25456	25456	25456	26416
17	25456	26416	26416	26416	27376	27376	27376	28336	28336	29296
18	28336	28336	29296	29296	29296	30576	30576	30576	31704	31704
19	30576	30576	31704	31704	32856	32856	32856	34008	34008	34008
20	32856	34008	34008	34008	35160	35160	35160	36696	36696	36696
21	35160	36696	36696	36696	37888	37888	39232	39232	39232	40576
22	37888	39232	39232	40576	40576	40576	42368	42368	42368	43816
23	40576	40576	42368	42368	43816	43816	43816	45352	45352	45352
24	43816	43816	45352	45352	45352	46888	46888	46888	48936	48936
25	45352	45352	46888	46888	46888	48936	48936	48936	51024	51024
26	46888	46888	48936	48936	48936	51024	51024	51024	52752	52752

I_{TBS}	N_{PRB}									
	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
0	2280	2280	2280	2344	2344	2408	2408	2472	2472	2536
1	2984	2984	2984	3112	3112	3112	3240	3240	3240	3240
2	3624	3624	3752	3752	3880	3880	3880	4008	4008	4008
3	4776	4776	4776	4968	4968	4968	5160	5160	5160	5352
4	5736	5992	5992	5992	5992	6200	6200	6200	6456	6456
5	7224	7224	7224	7480	7480	7480	7736	7736	7736	7992
6	8504	8504	8760	8760	8760	9144	9144	9144	9144	9528
7	9912	9912	10296	10296	10296	10680	10680	10680	11064	11064
8	11448	11448	11448	11832	11832	12216	12216	12216	12576	12576
9	12960	12960	12960	13536	13536	13536	13536	14112	14112	14112
10	14112	14688	14688	14688	14688	15264	15264	15264	15840	15840
11	16416	16416	16992	16992	16992	17568	17568	17568	18336	18336
12	18336	19080	19080	19080	19080	19848	19848	19848	20616	20616
13	20616	21384	21384	21384	22152	22152	22152	22920	22920	22920
14	22920	23688	23688	24496	24496	24496	25456	25456	25456	25456
15	24496	25456	25456	25456	26416	26416	26416	27376	27376	27376
16	26416	26416	27376	27376	27376	28336	28336	28336	29296	29296
17	29296	29296	30576	30576	30576	30576	31704	31704	31704	32856
18	31704	32856	32856	32856	34008	34008	34008	35160	35160	35160
19	35160	35160	35160	36696	36696	36696	37888	37888	37888	39232
20	37888	37888	39232	39232	39232	40576	40576	40576	42368	42368
21	40576	40576	42368	42368	42368	43816	43816	43816	45352	45352
22	43816	43816	45352	45352	45352	46888	46888	46888	48936	48936
23	46888	46888	46888	48936	48936	48936	51024	51024	51024	51024
24	48936	51024	51024	51024	52752	52752	52752	52752	55056	55056
25	51024	52752	52752	52752	55056	55056	55056	55056	57336	57336
26	52752	55056	55056	55056	57336	57336	57336	59256	59256	59256

I_{TBS}	N_{PRB}									
	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
0	2536	2536	2600	2600	2664	2664	2728	2728	2728	2792
1	3368	3368	3368	3496	3496	3496	3496	3624	3624	3624
2	4136	4136	4136	4264	4264	4264	4392	4392	4392	4584
3	5352	5352	5352	5544	5544	5544	5736	5736	5736	5736
4	6456	6456	6712	6712	6712	6968	6968	6968	6968	7224
5	7992	7992	8248	8248	8248	8504	8504	8760	8760	8760
6	9528	9528	9528	9912	9912	9912	10296	10296	10296	10296
7	11064	11448	11448	11448	11448	11832	11832	11832	12216	12216
8	12576	12960	12960	12960	13536	13536	13536	13536	14112	14112
9	14112	14688	14688	14688	15264	15264	15264	15264	15840	15840
10	15840	16416	16416	16416	16992	16992	16992	16992	17568	17568
11	18336	18336	19080	19080	19080	19080	19848	19848	19848	19848
12	20616	21384	21384	21384	21384	22152	22152	22152	22920	22920
13	23688	23688	23688	24496	24496	24496	25456	25456	25456	25456
14	26416	26416	26416	27376	27376	27376	28336	28336	28336	28336
15	28336	28336	28336	29296	29296	29296	29296	30576	30576	30576
16	29296	30576	30576	30576	30576	31704	31704	31704	31704	32856
17	32856	32856	34008	34008	34008	35160	35160	35160	35160	36696
18	36696	36696	36696	37888	37888	37888	37888	39232	39232	39232
19	39232	39232	40576	40576	40576	40576	42368	42368	42368	43816
20	42368	42368	43816	43816	43816	45352	45352	45352	46888	46888
21	45352	46888	46888	46888	46888	48936	48936	48936	48936	51024
22	48936	48936	51024	51024	51024	51024	52752	52752	52752	55056
23	52752	52752	52752	55056	55056	55056	55056	57336	57336	57336
24	55056	57336	57336	57336	57336	59256	59256	59256	61664	61664
25	57336	59256	59256	59256	61664	61664	61664	61664	63776	63776
26	59256	61664	61664	61664	63776	63776	63776	63776	66592	75376

I_{TBS}	N_{PRB}									
	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110
0	2792	2856	2856	2856	2984	2984	2984	2984	2984	3112
1	3752	3752	3752	3752	3880	3880	3880	4008	4008	4008
2	4584	4584	4584	4584	4776	4776	4776	4776	4968	4968
3	5992	5992	5992	5992	6200	6200	6200	6200	6456	6456
4	7224	7224	7480	7480	7480	7480	7736	7736	7736	7992
5	8760	9144	9144	9144	9144	9528	9528	9528	9528	9528
6	10680	10680	10680	10680	11064	11064	11064	11448	11448	11448
7	12216	12576	12576	12576	12960	12960	12960	12960	13536	13536
8	14112	14112	14688	14688	14688	14688	15264	15264	15264	15264
9	15840	16416	16416	16416	16416	16992	16992	16992	16992	17568
10	17568	18336	18336	18336	18336	18336	19080	19080	19080	19080
11	20616	20616	20616	21384	21384	21384	21384	22152	22152	22152
12	22920	23688	23688	23688	23688	24496	24496	24496	24496	25456
13	26416	26416	26416	26416	27376	27376	27376	27376	28336	28336
14	29296	29296	29296	29296	30576	30576	30576	30576	31704	31704
15	30576	31704	31704	31704	31704	32856	32856	32856	34008	34008
16	32856	32856	34008	34008	34008	34008	35160	35160	35160	35160
17	36696	36696	36696	37888	37888	37888	39232	39232	39232	39232
18	40576	40576	40576	40576	42368	42368	42368	42368	43816	43816
19	43816	43816	43816	45352	45352	45352	46888	46888	46888	46888
20	46888	46888	48936	48936	48936	48936	48936	51024	51024	51024
21	51024	51024	51024	52752	52752	52752	52752	55056	55056	55056
22	55056	55056	55056	57336	57336	57336	57336	59256	59256	59256
23	57336	59256	59256	59256	59256	61664	61664	61664	61664	63776
24	61664	61664	63776	63776	63776	63776	66592	66592	66592	66592
25	63776	63776	66592	66592	66592	66592	68808	68808	68808	71112
26	66592	66592	68808	68808	68808	71112	71112	71112	71112	73712

Fonte: (3GPP, 2008)

A.2.2 TBs Mapeados à Multiplexação de Duas Camadas

Para um número de PRBs (N_{PRB}) entre 1 e 55, o TBS é dado pela entrada ($I_{TBS}, 2 \times N_{PRB}$) da Tabela 19. Para um número de PRBs (N_{PRB}) entre 56 e 110, as colunas TBS_L1 são obtidas a partir das entradas (I_{TBS}, N_{PRB}) da Tabela 20 que, então, são traduzidas para as colunas TBS_L2, utilizando a regra de mapeamento mostrada na Tabela 19. Dessa forma, o TBS é dado pelas colunas TBS_L2.

Tabela 20 – Tradução do TBS de Uma para Duas Camadas

TBS_L1	TBS_L2	TBS_L1	TBS_L2	TBS_L1	TBS_L2	TBS_L1	TBS_L2
1544	3112	3752	7480	10296	20616	28336	57336
1608	3240	3880	7736	10680	21384	29296	59256
1672	3368	4008	7992	11064	22152	30576	61664
1736	3496	4136	8248	11448	22920	31704	63776
1800	3624	4264	8504	11832	23688	32856	66592
1864	3752	4392	8760	12216	24496	34008	68808
1928	3880	4584	9144	12576	25456	35160	71112
1992	4008	4776	9528	12960	25456	36696	73712
2024	4008	4968	9912	13536	27376	37888	76208
2088	4136	5160	10296	14112	28336	39232	78704
2152	4264	5352	10680	14688	29296	40576	81176
2216	4392	5544	11064	15264	30576	42368	84760
2280	4584	5736	11448	15840	31704	43816	87936
2344	4776	5992	11832	16416	32856	45352	90816
2408	4776	6200	12576	16992	34008	46888	93800
2472	4968	6456	12960	17568	35160	48936	97896
2536	5160	6712	13536	18336	36696	51024	101840
2600	5160	6968	14112	19080	37888	52752	105528
2664	5352	7224	14688	19848	39232	55056	110136
2728	5544	7480	14688	20616	40576	57336	115040
2792	5544	7736	15264	21384	42368	59256	119816
2856	5736	7992	15840	22152	43816	61664	124464
2984	5992	8248	16416	22920	45352	63776	128496
3112	6200	8504	16992	23688	46888	66592	133208
3240	6456	8760	17568	24496	48936	68808	137792
3368	6712	9144	18336	25456	51024	71112	142248
3496	6968	9528	19080	26416	52752	73712	146856
3624	7224	9912	19848	27376	55056	75376	151376

Fonte: (3GPP, 2008)