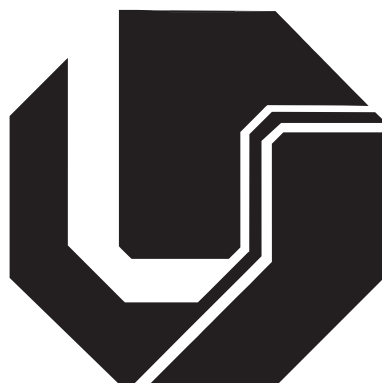


UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA  
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



UMA PROPOSTA DE ALGORITMO DE ESCALONAMENTO PARA O  
TRÁFEGO *UPLINK* EM REDES LTE

Fabício Geraldo Araújo

Uberlândia - 2014

**Fabício Geraldo Araújo**

**UMA PROPOSTA DE ALGORITMO DE ESCALONAMENTO PARA O  
TRÁFEGO *UPLINK* EM REDES LTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências, aprovada em 14 de Fevereiro de 2014 pela banca examinadora:

Paulo Roberto Guardieiro, Dr. - Orientador (UFU)

Márcio Andrey Teixeira, Dr. (IFSP)

Éderson Rosa da Silva, Dr. (UFU)

**Fabrício Geraldo Araújo**

**UMA PROPOSTA DE ALGORITMO DE ESCALONAMENTO PARA O  
TRÁFEGO *UPLINK* EM REDES LTE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do grau de Mestre em Ciências.

---

Prof. Paulo Roberto Guardieiro, Dr.  
Orientador

---

Prof. Edgard A. Lamounier Júnior, Dr.  
Coordenador do Programa de Pós-Graduação

# Agradecimentos

Agradeço, primeiramente, a Deus por estar comigo a cada dia. Agradeço pela perseverança, saúde e alegria que estiveram presentes durante todos os dias de trabalho.

Ao Professor Dr. Paulo Roberto Guardieiro, pela sempre dedicada e paciente orientação. Agradeço pelo incentivo e por me ensinar não somente conceitos técnicos, mas também por ser exemplo de conduta e profissionalismo.

À minha família, pelo apoio em todos os momentos. Agradeço à minha mãe Neusa, ao meu pai Jaci e à minha irmã Laísa pelo apoio nos momentos difíceis, por compreenderem a minha ausência em tantos momentos e pela confiança depositada em mim.

Agradeço aos meus amigos de república e do trabalho pela companhia, apoio, aprendizado, e tantos momentos de descontração e alegria.

Aos professores e técnicos da Faculdade de Engenharia Elétrica, pelo aprendizado e colaboração.

Por fim, agradeço a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo auxílio financeiro para a viabilização deste trabalho.

*"É preciso força pra sonhar e perceber que a estrada vai além do que se vê."*

*Marcelo Camelo*

# Publicações

A seguir, são apresentadas as publicações resultantes das pesquisas realizadas no decorrer deste trabalho:

ARAÚJO, F. G.; GUARDIEIRO, P. R. A Novel Scheduling Algorithm for Uplink Traffic in LTE Networks. Accepted for publication in *Thirteenth International Conference on Networks (ICN 2014)*, Nice, France, 2013.

ARAÚJO, F. G.; GUARDIEIRO, P. R. A Novel Scheduling Algorithm for Uplink Traffic in LTE Networks. Accepted for publication in *28th International Conference on Information Networking (ICOIN 2014)*, Phuket, Thailand, 2013.

ARAÚJO, F. G.; GUARDIEIRO, P. R. A Novel Scheduling Algorithm for Uplink Traffic in LTE Networks. Accepted for publication in *Second International Conference on Future Generation Communication Technologies (FGCT 2013)*, Technically co-sponsored by UK & RI IEEE, London, United Kingdom, 2013.

ARAÚJO, F. G.; GUARDIEIRO, P. R. Uma Proposta de Algoritmo de Escalonamento para Rede LTE. Em *XI Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (XI CEEL 2013)*, Uberlândia, 2013.

# Resumo

Araújo, F. G., *UMA PROPOSTA DE ALGORITMO DE ESCALONAMENTO PARA O TRÁFEGO UPLINK EM REDES LTE*, UFU, Uberlândia, Brasil, 2014, 89p.

A rede *Long Term Evolution* (LTE) padronizada pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) tem como principais objetivos: alcançar uma alta taxa de transferência, uma melhor eficiência espectral e uma latência reduzida. Para isso houve uma evolução da interface de rádio além da arquitetura da rede em relação às redes móveis celulares anteriores. Baseado no *Release 8* definido pelo 3GPP, o LTE utiliza o *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) como esquema de transmissão no tráfego *uplink*. Dessa forma, os recursos alocados para um mesmo usuário precisam ser contíguos no domínio da frequência. A alocação eficiente de recursos para a rede LTE é um desafio e requer total atenção por parte do escalonador. Os principais algoritmos de escalonamento encontrados na literatura utilizam uma matriz construída no domínio do tempo com base em dois paradigmas, o *Channel Dependent* (CD) e *Proportional Fairness* (PF), para a filtragem de usuários que serão escalonados posteriormente, mas ambos não consideram os requisitos de *Quality of Service* (QoS) em suas abordagens. Em vista disso, propõe-se um algoritmo de escalonamento para atender estes requisitos. O mecanismo proposto considera o *Modulation and Coding Scheme* (MCS), além de aspectos sobre os tipos de serviços durante a construção da matriz. Posteriormente, no domínio da frequência, a alocação de recursos baseia-se no algoritmo *Riding Peaks*. Finalmente, a solução proposta foi avaliada por meio de modelagem e simulação. Os resultados de simulação demonstram que o mecanismo proposto atinge um melhor desempenho para as aplicações de tempo real se equiparado a algoritmos frequentemente encontrados na literatura.

Palavras-chave: LTE, Uplink, Modelagem, Simulação, LTE-Sim, Algoritmo de Escalonamento

# Abstract

Araújo, F. G., *A PROPOSAL OF SCHEDULING ALGORITHM FOR UPLINK TRAFFIC IN LTE NETWORKS*, UFU, Uberlândia, Brazil, 2014, 89p.

The Long Term Evolution (LTE) network standardized by the 3rd Generation Partnership Project (3GPP) has as main objectives: achieving a high throughput, improved spectrum efficiency and reduced latency. For this, there was an evolution of the radio interface and network architecture compared to previous mobile cellular networks. Based on 3GPP's Release 8, LTE uses the multiple access technique Single Carrier Frequency Division Multiple Access (SC-FDMA) in uplink traffic, thus, resources allocated to a single user must be contiguous in the frequency domain. The efficient resource allocation for LTE network is a challenge and requires full attention from the scheduler. The main scheduling algorithms found in the literature use a matrix constructed in the time domain based on two paradigms, Channel Dependent (CD) and Proportional Fairness (PF), for the filtering of users that will be scheduled later. But, both do not consider the Quality of Service (QoS) requirements in their approaches. In view of this, we propose a scheduling algorithm to meet these requirements. The proposed mechanism considers the Modulation and Coding Scheme (MCS) as well as aspects about the types of services during the construction of the matrix. Thereafter, in the frequency domain, the resource allocation is based on the Riding Peaks algorithm. Finally, the proposed solution was evaluated using modeling and simulation. The simulation results show that the proposed scheme achieves improved performance for real-time applications when compared to other algorithms found in the literature.

Index-terms: LTE, Uplink, Modeling, Simulation, LTE-Sim, Scheduling Algorithm

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiv</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Definição do Problema e Solução Proposta . . . . .	2
1.2 Trabalhos Relacionados . . . . .	3
1.3 Justificativa . . . . .	5
1.4 Objetivos e Metas . . . . .	6
1.5 Estrutura da Dissertação . . . . .	6
<b>2 Sistema LTE</b>	<b>8</b>
2.1 Introdução . . . . .	8
2.2 <i>Long Term Evolution</i> (LTE) . . . . .	9
2.3 Arquitetura das Redes LTE . . . . .	10
2.3.1 E-UTRAN . . . . .	13
2.3.2 EPC . . . . .	14
2.3.3 <i>User Equipment</i> (UE) . . . . .	15
2.4 Arquitetura de Protocolos . . . . .	16
2.4.1 Subcamada PDCP . . . . .	17
2.4.2 Subcamada RLC . . . . .	18
2.4.3 Subcamada MAC . . . . .	18
2.5 Camada PHY . . . . .	19
2.5.1 OFDMA . . . . .	20

2.5.2	SC-FDMA . . . . .	21
2.6	Gerenciamento dos Recursos de Rádio . . . . .	22
2.6.1	Controle de Admissão . . . . .	23
2.6.2	Escalonamento de Pacotes . . . . .	23
2.6.2.1	<i>Scheduling Request</i> (SR) . . . . .	24
2.6.2.2	<i>Buffer Status Report</i> (BSR) . . . . .	25
2.6.2.3	<i>Sounding Reference Signal</i> (SRS) . . . . .	26
2.7	Qualidade de Serviço em Redes LTE . . . . .	27
2.8	Considerações Finais . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Escalonamento de Pacotes no Tráfego <i>Uplink</i> em Redes LTE</b>	<b>30</b>
3.1	Introdução . . . . .	30
3.2	Escalonamento de Pacotes . . . . .	31
3.2.1	<i>Link Adaptation</i> (LA) . . . . .	34
3.2.2	<i>Round Robin</i> (RR) . . . . .	35
3.2.3	<i>First Maximum Expansion</i> (FME) . . . . .	36
3.2.4	<i>Recursive Maximum Expansion</i> (RME) . . . . .	37
3.2.5	<i>Minimum Area Difference</i> (MAD) . . . . .	38
3.2.6	<i>Search-Tree Based Packet Scheduler</i> (STB-PS) . . . . .	40
3.2.7	<i>Riding Peaks</i> . . . . .	41
3.3	Análise de Complexidade . . . . .	43
3.4	Considerações Finais . . . . .	45
<b>4</b>	<b>Uma Proposta de Algoritmo de Escalonamento para o Tráfego <i>Uplink</i> em Redes LTE</b>	<b>46</b>
4.1	Introdução . . . . .	46
4.2	Descrição do Problema . . . . .	47
4.3	Solução Proposta . . . . .	47
4.3.1	Algoritmo de Escalonamento Proposto . . . . .	48
4.4	Análise de Complexidade do Algoritmo Proposto . . . . .	55
4.5	Considerações Finais . . . . .	55
<b>5</b>	<b>Avaliação de Desempenho do Algoritmo de Escalonamento Proposto</b>	<b>57</b>
5.1	Introdução . . . . .	57

5.2	Modelagem e Simulação . . . . .	57
5.2.1	Ferramenta de Simulação . . . . .	57
5.2.2	Ambiente e Parâmetros de Simulação . . . . .	59
5.3	Resultados Experimentais . . . . .	61
5.3.1	Avaliação do Escalonador Proposto para o Tráfego VoIP . . . . .	62
5.3.2	Avaliação do Escalonador Proposto para o Tráfego de Vídeo . . . . .	65
5.3.3	Avaliação do Escalonador Proposto para o Tráfego Web . . . . .	68
5.3.4	Avaliação do Escalonador Proposto para os Tráfegos de Tempo Real em Outros Cenários . . . . .	71
5.4	Considerações Finais . . . . .	79
<b>6</b>	<b>Conclusões Gerais</b>	<b>80</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>84</b>

# Lista de Figuras

2.1	Arquitetura de acesso das redes LTE. . . . .	11
2.2	Conexões típicas entre eNBs. . . . .	12
2.3	Arquitetura de Protocolos. . . . .	16
2.4	Ajuste de frequência na técnica SC-FDMA. . . . .	21
2.5	BSR curto e longo. . . . .	26
2.6	Transmissão de um SRS. . . . .	27
3.1	Procedimento geral para o escalonamento no <i>uplink</i> . . . . .	31
3.2	Escalonamento no domínio do tempo e da frequência. . . . .	32
3.3	Algoritmo <i>Round Robin</i> . . . . .	35
3.4	Algoritmo <i>First Maximum Expansion</i> . . . . .	37
3.5	Algoritmo <i>Recursive Maximum Expansion</i> . . . . .	38
3.6	Algoritmo <i>Minimum Area Difference</i> . . . . .	39
3.7	Algoritmo <i>Search-Tree Based Packet Scheduler</i> . . . . .	40
3.8	Ilustração de uma árvore utilizada no algoritmo STB-PS . . . . .	41
3.9	Algoritmo <i>Riding Peaks</i> . . . . .	42
5.1	Topologia utilizada nas simulações através do LTE-Sim. . . . .	59
5.2	Vazão média em função da quantidade de usuários para o tráfego VoIP utilizando uma distribuição 50/10/40. . . . .	63
5.3	Índice de justiça em função da quantidade de usuários para o tráfego VoIP utilizando uma distribuição 50/10/40. . . . .	64
5.4	Atraso médio em função da quantidade de usuários para o tráfego VoIP utilizando uma distribuição 50/10/40. . . . .	66
5.5	Vazão média em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo utilizando uma distribuição 50/10/40. . . . .	67

5.6	Índice de justiça em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo utilizando uma distribuição 50/10/40. . . . .	67
5.7	Atraso médio em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo utilizando uma distribuição 50/10/40. . . . .	68
5.8	Vazão média em função da quantidade de usuários para o tráfego Web utilizando uma distribuição 50/10/40. . . . .	69
5.9	Índice de justiça em função da quantidade de usuários para o tráfego Web utilizando uma distribuição 50/10/40. . . . .	70
5.10	Atraso médio em função da quantidade de usuários para o tráfego Web utilizando uma distribuição 50/10/40. . . . .	71
5.11	Vazão média em função da quantidade de usuários para o tráfego VoIP utilizando uma distribuição 15/15/70. . . . .	72
5.12	Vazão média em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo utilizando uma distribuição 15/15/70. . . . .	73
5.13	Atraso médio em função da quantidade de usuários para o tráfego VoIP utilizando uma distribuição 15/15/70. . . . .	73
5.14	Atraso médio em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo utilizando uma distribuição 15/15/70. . . . .	74
5.15	Vazão média em função da quantidade de usuários para o tráfego VoIP utilizando uma distribuição 40/40/20. . . . .	75
5.16	Vazão média em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo utilizando uma distribuição 40/40/20. . . . .	76
5.17	Taxa média de perda de pacotes em função da quantidade de usuários para o tráfego VoIP utilizando uma distribuição 15/15/70. . . . .	77
5.18	Taxa média de perda de pacotes em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo utilizando uma distribuição 40/40/20. . . . .	77
5.19	Atraso médio em função da quantidade de usuários para o tráfego VoIP utilizando uma distribuição 40/40/20. . . . .	78
5.20	Atraso médio em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo utilizando uma distribuição 40/40/20. . . . .	78

# Lista de Tabelas

2.1	Tabela de Categorias do UE (Adaptada de [1]). . . . .	15
2.2	Parâmetros físicos dos RBs. . . . .	20
2.3	Tabela QCI (Adaptada de [2]). . . . .	29
3.1	Matriz que representa o mapeamento UEs-RBs. . . . .	33
3.2	Matriz STB-PS . . . . .	41
3.3	Análise de complexidade dos algoritmos examinados. . . . .	45
4.1	Tabela de índices MCS e TBS baseada em [3] . . . . .	50
4.2	Exemplo: Matriz de UEs/RBs para 10 UEs . . . . .	54
5.1	Parâmetros utilizados nas simulações . . . . .	60
5.2	Parâmetros das aplicações baseado em [4] . . . . .	61
5.3	Distribuição do tráfego baseado em [5] . . . . .	62
5.4	Distribuição do tráfego visando tráfego de <i>background</i> . . . . .	72
5.5	Distribuição do tráfego visando aplicações de tempo real . . . . .	75

# Lista de Abreviaturas e Siglas

3GPP	<i>3rd Generation Partnership Project</i>
AC	<i>Admission Control</i>
AM	<i>Acknowledged Mode</i>
AMC	<i>Adaptive Modulation and Coding</i>
ARP	<i>Allocation Retention Priority</i>
BSR	<i>Buffer Status Report</i>
CAPEX	<i>CAPital EXpenditure</i>
CP	<i>Control Plane</i>
CQI	<i>Channel Quality Indicator</i>
CS	<i>Circuit Switch</i>
CSI	<i>Channel State Information</i>
DFT	<i>Discrete Fourier Transform</i>
DFT-S-OFDMA	<i>Discrete Fourier Transform Spread OFDMA</i>
DRX	<i>Discontinuous Reception</i>
E-UTRAN	<i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i>
eNB	<i>Evolved Node B</i>
EPC	<i>Evolved Packet Core</i>
EPS	<i>Evolved Packet System</i>

FDD	<i>Frequency Division Duplex</i>
FDPS	<i>Frequency Domain Packet Scheduler</i>
FME	<i>First Maximum Expansion</i>
FPC	<i>Fractional Power Control</i>
GBR	<i>Guaranteed Bit Rate</i>
GPLv3	<i>GNU General Public License version 3</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
GW	<i>Gateway</i>
HARQ	<i>Hybrid Automatic Repeat Request</i>
HSPA	<i>High Speed Packet Access</i>
HSS	<i>Home Subscription Server</i>
IDFT	<i>Inverse Discrete Fourier Transform</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISI	<i>Inter-Symbol-Interference</i>
LA	<i>Link Adaptation</i>
LTE	<i>Long Term Evolution</i>
MAC	<i>Medium Access Protocol</i>
MAD	<i>Minimum Area Difference</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>
NAS	<i>Non-Access-Stratum</i>

non-GBR	<i>Non Guaranteed Bit Rate</i>
NP-hard	<i>Non-deterministic Polynomial-time hard</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency-Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
OPEX	<i>OPerating EXpenses</i>
OSI	<i>Open Systems Interconnection</i>
P-GW	<i>Packet Data Network Gateway</i>
PAPR	<i>Peak-to-Average Power-Ratio</i>
PCC	<i>Policy and Charging Control</i>
PCRF	<i>Policy Control and Charging Rules Function</i>
PDCP	<i>Packet Data Convergence Protocol</i>
PDN	<i>Packet Data Network</i>
PF	<i>Proportional Fairness</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PLR	<i>Packet Loss Rate</i>
PRACH	<i>Physical Random Access Channel</i>
PS	<i>Packet Switch</i>
PUCCH	<i>Physical Uplink Control Channel</i>
PUSCH	<i>Physical Uplink Shared Channel</i>
QCI	<i>QoS Class Identifier</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAC	<i>Radio Admission Control</i>
RACH	<i>Random Access Channel</i>

RAN	<i>Radio Access Network</i>
RB	<i>Resource Block</i>
RBG	<i>Radio Bearer Group</i>
RC	<i>Resource Chunks</i>
RLC	<i>Radio Link Control</i>
RME	<i>Recursive Maximum Expansion</i>
RR	<i>Round Robin</i>
RRC	<i>Radio Resource Control</i>
RRM	<i>Radio Resource Management</i>
RTT	<i>Round Trip Time</i>
S-GW	<i>Serving Gateway</i>
SAE	<i>System Architecture Evolution</i>
SC-FDMA	<i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i>
SIMO	<i>Single Input, Multiple Output</i>
SINR	<i>Signal to Interference plus Noise Ratio</i>
SR	<i>Scheduling Request</i>
SRS	<i>Sounding Reference Signal</i>
STB-PS	<i>Search-Tree Based Packet Scheduler</i>
TB	<i>Transport Block</i>
TBS	<i>Transport Block Size</i>
TCP	<i>Transmission Control Protocol</i>
TDD	<i>Time Division Duplex</i>
TDPS	<i>Time Domain Packet Scheduler</i>

TM	<i>Transparent Mode</i>
TTI	<i>Transmission Time Interval</i>
UE	<i>User Equipment</i>
UL-SCH	<i>Uplink Shared Channel</i>
UM	<i>Unacknowledged Mode</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
UP	<i>User Plane</i>
VoIP	<i>Voice over IP</i>

# Capítulo 1

## Introdução

As gerações anteriores de redes móveis celulares, tais como, *Global System for Mobile Communications* (GSM) e *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS), suportam vários tipos de serviços a um baixo desempenho, o que as tornam totalmente inviáveis nos tempos de hoje, devido a alta demanda por novas aplicações e pelos requisitos de *Quality of Service* (QoS) que estas necessitam para serem utilizadas eficientemente [6].

A rede *Long Term Evolution* (LTE) surge para atender tal demanda. Essa nova rede, também designada de rede de quarta geração, emerge com [7]:

- Velocidades altas para transmissões;
- Baixa latência;
- Recursos para gerenciamento de energia;
- Um melhor suporte para os novos produtos e serviços.

As especificações das redes LTE foram publicadas como parte do *Release 8* em Dezembro de 2008 pelo *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) [8] e iniciando o processo de desenvolvimento em meados de 2009. Essas especificações trouxeram várias características, além das que já foram citadas, a tecnologia *Multiple Input Multiple Output* (MIMO) para transmissão e recepção de dados e a capacidade de comutar todos os serviços disponíveis via pacotes pela rede.

A nova rede de acesso (*Radio Access Network* – RAN) desenvolvida é chamada de *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) a qual consiste de estações base (nomeadas de *Evolved Node B* (eNB)) interconectadas por meio de interfaces

X2 [9, 10]. Uma eNB é responsável pelas principais funcionalidades de gerenciamento de recursos de rádio, assim, dentre todas as funções, engloba tanto o escalonamento quanto a alocação de recursos em ambas as direções, *downlink* e *uplink*.

Diante disso, o esquema de transmissão adotado para o *downlink* é o *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access* (OFDMA) e o *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) foi padronizado para o *uplink* [11]. Este último carrega algumas características específicas durante a distribuição de recursos entre os vários usuários e seus diferentes serviços. O escalonamento de pacotes é uma área amplamente estudada em redes LTE de uma forma geral, e, é um desafio encontrar a melhor forma de realizar a alocação de recursos para os usuários da rede de maneira justa.

Um escalonador de pacotes eficiente deve considerar vários fatores que são importantes para manter o alto desempenho na rede em sua execução. Portanto, é imprescindível que o escalonador tenha conhecimento de todos os tipos de serviços suportados pela rede e seus respectivos requisitos de QoS. O *Voice over IP* (VoIP) é um exemplo de serviço com requisitos de QoS rígidos e que precisa de prioridade em relação a outros.

Com isso, surge a necessidade de buscar uma forma efetiva de alocação dos recursos de rádio do sistema. Nesse cenário, os algoritmos de escalonamento e alocação de recursos se tornam de extrema importância para todo o desenvolvimento do sistema e para uma melhor utilização dos recursos que são limitados.

## 1.1 Definição do Problema e Solução Proposta

O LTE possui uma nova tecnologia de acesso e arquitetura de rede padronizada pelo 3GPP, em que busca uma melhor utilização dos recursos de rádio disponíveis. Para isso a rede possui algumas funcionalidades encontradas no *Radio Resource Management* (RRM):

- Controle de Admissão (*Admission Control* - AC);
- Escalonador de Pacotes (*Packet Scheduling* - PS):
  - *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ);
  - *Link Adaptation* (LA):
    - \* *Adaptive Modulation and Coding* (AMC);
    - \* *Fractional Power Control* (FPC).

Dessa forma, o LTE executa todas essas funcionalidades de forma específica para o *downlink* e *uplink*, pois cada sentido possui suas particularidades. Para o *uplink*, que é foco deste trabalho, possui como principal restrição a contiguidade exigida pelo SC-FDMA, além da melhoria da eficiência espectral e provisionamento de QoS.

Dentre as funcionalidades mencionadas anteriormente, o escalonamento de pacotes é um campo a ser explorado e aperfeiçoado para melhores resultados nas redes LTE. O 3GPP não especifica qualquer técnica ou algoritmo de escalonamento para distribuir os recursos disponíveis na rede, deixando a cargo das empresas tomarem suas próprias decisões em relação a isso.

Uma vez que cada empresa possui a liberdade de adotar suas próprias técnicas de escalonamento, pode ocorrer que nem todos os perfis de usuários e aplicações (principalmente as de tempo real) sejam atendidos de forma satisfatória. Com isso, encontrar uma estratégia de escalonamento e alocação dos recursos de rádio para atender de forma efetiva as aplicações com requisitos de QoS rigorosos, é imprescindível para uma melhor eficiência dos serviços.

Para esse propósito, vários algoritmos podem ser encontrados na literatura. Entretanto, a maioria dos trabalhos foca em uma abordagem que opera de acordo com a qualidade do canal reportada por cada usuário, o que pode implicar que nem todos os usuários sejam atendidos de forma eficiente e que também impõe um padrão “egoísta” no quesito diversidade de usuários atendidos.

Diante do exposto, essa dissertação apresenta uma proposta para atender de forma eficiente as aplicações de tempo real transmitidas no tráfego *uplink* das redes LTE. A proposta é baseada no algoritmo *Riding Peaks* desenvolvido em [12] por apresentar melhores resultados em relação à vazão média se comparado a outros algoritmos [13]. Além disso, o algoritmo proposto garante uma vazão mínima e um atraso máximo limitado a fim de prover QoS para as aplicações com requisitos rígidos.

## 1.2 Trabalhos Relacionados

Esta seção tem por objetivo levantar os principais trabalhos desenvolvidos pela comunidade acadêmica sobre algoritmos de escalonamento no tráfego *uplink* das redes LTE. Dentre estes trabalhos, é possível identificar, no geral, enfoques nas condições de canal dos

usuários, eficiência total do sistema e na equidade entre os serviços a serem escalonados durante o desenvolvimento dos algoritmos.

Pode-se identificar também a carência de trabalhos voltados para o sentido *uplink* das redes LTE. Isso se deve ao fato da técnica de transmissão utilizada (nesse caso, o SC-FDMA) e suas particularidades, principalmente em relação a contiguidade e o cuidado com a heurística de desenvolvimento, para não ocasionar em problemas de *NP-hard*.

Diante disso, em [13], [14], [15], [16] e [17] são apresentadas avaliações de desempenho dos principais algoritmos de escalonamento desenvolvidos para o tráfego *uplink* nas redes LTE. Alguns dos algoritmos avaliados nestes trabalhos serão também abordados no presente estudo para comparação de desempenho com a proposta desenvolvida.

Em [18], os autores propõem um algoritmo para maximizar a eficiência de toda a rede através de uma nova abordagem para distribuição de recursos entre os usuários juntamente com a capacidade de adaptação que os mesmos possuem no enlace. Dessa forma, o algoritmo busca alocar recursos utilizando a contiguidade e informações acerca do custo de energia.

No trabalho apresentado em [19], os autores também buscam uma maximização da vazão do sistema. Para isso, é proposto um método de escalonamento que opera no domínio da frequência que, além de aplicar a contiguidade, utiliza a diferença da métrica de qualidade de sinal de cada usuário em relação a um específico bloco de recurso durante o processo de escalonamento. Assim, alcança um desempenho maior em relação a vazão geral do sistema.

Todos os trabalhos apresentados anteriormente operam, principalmente, de acordo com as condições de canal dos usuários. Já em [12], o autor busca a equidade entre os usuários que desejam transmitir. Para isso, é avaliado o índice de justiça alcançado com o algoritmo convencional *Proportional Fairness* (PF) em ambos os domínios, tempo e frequência, apresentando também as dificuldades que obtiveram em relação ao *NP-hard*.

Em [20], os autores apresentam algumas variações do algoritmo PF e o aplica também em ambos os domínios, tempo e frequência. Dessa forma, é visto que ao considerar a vazão do usuário no domínio do tempo e a razão SINR no domínio da frequência, pode-se alcançar melhores resultados se equiparados às outras abordagens com relação ao índice de justiça.

Em [21], os autores propõem dois algoritmos de escalonamento para o tráfego *uplink*

com foco em baixa complexidade. Diante disso, pode-se utilizar diferentes funções de utilidade juntamente com as heurísticas desenvolvidas.

Com relação à QoS, alguns trabalhos foram encontrados. Em [22], os autores propõem um algoritmo de escalonamento para minimizar a perda de pacotes ao mesmo tempo em que busca uma maior equidade entre os serviços. Para isso utiliza-se informações e mecanismos encontrados no *Buffer Status Report* (BSR).

Já em [23], [5] e [24] os autores apresentam algoritmos de escalonamento que consideram o requisito de atraso máximo durante a distribuição de recursos entre os usuários. Dessa forma, busca-se atender de forma justa as aplicações de tempo real que estão com um atraso alto, porém não consideram a vazão que o usuário pode alcançar em relação às suas condições e tampouco um bom desempenho com a contiguidade quando utilizada.

Diante dos trabalhos pesquisados para o tráfego *uplink*, é visto que se torna necessário um algoritmo de escalonamento que atenda os serviços de tempo real de forma eficiente. Logo, o trabalho desenvolvido une algumas características encontradas em alguns destes trabalhos, ao mesmo tempo em que busca um melhor desempenho no sistema como um todo, garantindo uma vazão mínima e um atraso máximo limitado para os serviços de tempo real dos usuários.

### 1.3 Justificativa

A partir dos trabalhos citados na seção anterior é possível observar que existe uma carência de algoritmos para prover QoS às aplicações de tempo real relacionadas ao tráfego *uplink* das redes LTE.

Apesar dos trabalhos [5] e [24] apresentarem algoritmos para reduzir os atrasos das aplicações, nota-se que ambos os trabalhos não priorizam uma vazão mínima para as aplicações de tempo real, além de não utilizarem um método para uma contiguidade eficiente no canal SC-FDMA utilizado no sentido *uplink* das redes LTE.

Considerando, portanto, que existem poucos trabalhos desenvolvidos para o tráfego *uplink*, e principalmente, que abordem QoS durante seus desenvolvimentos, a proposta apresentada nesta dissertação busca contribuir com um algoritmo de escalonamento e alocação de recursos para atender de forma eficiente as aplicações de tempo real dos usuários que desejam transmitir no tráfego *uplink*.

## 1.4 Objetivos e Metas

O objetivo geral desta dissertação é propor um algoritmo de escalonamento que possibilite uma alocação eficiente de recursos para as aplicações de tempo real no sentido *uplink*.

Para alcançar este objetivo foram definidas algumas metas:

- Inserção de funcionalidades no simulador para auxiliar na execução do algoritmo proposto;
- Definição da atuação do algoritmo e seu desenvolvimento, no domínio do tempo e da frequência;
- Avaliação e comparação do mecanismo proposto com outros algoritmos de escalonamento encontrados na literatura.

Dessa forma espera-se que o algoritmo de escalonamento proposto contribua para um melhor desempenho dos tráfegos *uplink* de tempo real.

## 1.5 Estrutura da Dissertação

Além deste capítulo introdutório, esta dissertação estrutura-se com as unidades descritas a seguir.

O Capítulo 2 apresenta os fundamentos e principais características padronizadas para as redes LTE pelo 3GPP.

O Capítulo 3 aborda o escalonamento no sentido *uplink* das redes LTE, descrevendo sua execução e parâmetros necessários para obter um algoritmo de escalonamento efetivo. Neste capítulo também são apresentadas as principais técnicas de escalonamento encontradas na literatura, mostrando seus funcionamentos e atuações no processo de distribuição de recursos entre os usuários.

O Capítulo 4 apresenta o algoritmo de escalonamento proposto para o tráfego *uplink* e seu mecanismo de atuação durante a alocação de recursos.

O Capítulo 5 descreve os procedimentos realizados para avaliação da proposta por meio de modelagem e simulação computacional, estabelecendo o cenário, os parâmetros gerais e os resultados obtidos. Após a obtenção dos resultados são feitas considerações

acerca do desempenho do mecanismo proposto em relação a outros algoritmos encontrados na literatura.

As conclusões gerais deste trabalho são apresentadas no Capítulo 6 juntamente com as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros como continuidade dessa pesquisa.

# Capítulo 2

## Sistema LTE

### 2.1 Introdução

O *3rd Generation Partnership Project* (3GPP) é o órgão responsável pela especificação do *Long Term Evolution* (LTE) que está descrito nos chamados *Releases*. Dessa forma, o *Release* 8 especifica a rede LTE com vários requisitos aperfeiçoados para suportar a demanda de serviços atuais.

Este capítulo descreve uma visão geral da tecnologia LTE [25, 26] que é a evolução das redes *Global System for Mobile Communications* (GSM) e de terceira geração. O LTE tem como um dos objetivos principais apresentar uma arquitetura simplificada e evoluída chamada de *System Architecture Evolution* (SAE) [27, 28], com uma redução no número de elementos e camadas quando comparada com a arquitetura de redes anteriores [29].

Diante disso, serão apresentadas as principais características da tecnologia LTE em seus vários aspectos, iniciando com uma breve introdução à tecnologia, analisando seus requisitos, arquitetura de rede, seguidos pela descrição dos principais protocolos e suas funcionalidades suportadas em cada camada.

Posteriormente, será abordado o *Radio Resource Management* (RRM) do LTE, objetivando o escalonamento no tráfego *uplink*. Logo após, conclui-se o capítulo com os requisitos de qualidade de serviço (*Quality of Service* - QoS) associados às diferentes aplicações.

## 2.2 Long Term Evolution (LTE)

O processo de criação da tecnologia LTE iniciou em meados de 2004 pelo 3GPP. Foram necessários mais de cinco anos para estabelecer padrões e especificações, e, dessa forma, atingir a implementação comercial do sistema.

Os requisitos definidos para essa nova rede, incluem melhorias à capacidade e cobertura do sistema, melhorias à experiência do usuário através de altas taxas de transmissão e uma latência reduzida, além de uma redução nos custos de desenvolvimento e operação [1]. Para alcançar esses objetivos foi projetada uma nova rede de acesso aérea e um novo núcleo de rede baseado em uma rede IP (*Internet Protocol* - IP).

Estes requisitos podem ser descritos com base em [25]:

- Desempenho: a tecnologia LTE alcança até 100 Mbps no *downlink* e 50 Mbps no sentido *uplink*, tais valores, assumindo um canal com largura de banda de 20 MHz e considerando a utilização de 2 antenas para transmissão no *downlink* e 1 antena de transmissão no *uplink*. Essa capacidade é alcançada devido à eficiência espectral que corresponde a 5 bits/seg/Hz para o *downlink* e 2,5 bits/seg/Hz para o *uplink*. A taxa de transmissão varia linearmente de acordo com o canal e sua largura de banda alocada, e com o número de antenas na recepção e envio.
- Eficiência espectral: para o *downlink* pode ser até quatro vezes superior às tecnologias anteriores e para o *uplink* em até três vezes.
- Largura de banda do canal: uma das grandes vantagens das redes LTE é possibilitar a flexibilidade de alocação de espectro, pois suporta canais de 1,4, 5, 10, 15 ou 20 MHz. O sistema possui capacidade de até 200 usuários em um canal com largura de banda de 5 MHz e até 400 com um canal de 20 MHz.
- Nível de potência: os usuários são definidos em algumas classes de custos de potência. Essas classes especificam a potência máxima que um usuário pode operar. Em [30] está definido somente a classe 3, em que o nível de potência nominal máximo é de 23 dBm com tolerância de 2 dB para mais ou para menos. O nível de potência mínimo é de -40 dBm, e, quando o transmissor está em modo desligado, o nível deve ser de -50 dBm.

- Latência: o tempo de viagem de ida e volta (ou *Round Trip Time*(RTT)) é reduzido impulsionando a interatividade no sistema LTE. Os requisitos de latência cobrem tanto o plano de controle (*Control Plane* - CP) quanto o plano de usuário (*User Plane* - UP) [27]. A latência do plano de controle foi reduzida para um tempo de transição menor que 100 ms do modo *idle* para o ativo. No plano de usuário, a latência é definida como o tempo de viagem de ida e volta desde a camada IP até o núcleo da rede. A especificação permite um atraso menor que 5 ms em uma célula sem usuários.
- Complexidade: com o objetivo de melhorar a interoperabilidade com outros sistemas e diminuir os custos com terminais, a complexidade das redes LTE é minimizada. No lado do usuário, é reduzido principalmente o consumo de bateria para alcançar uma maior economia no uso dos serviços disponíveis. Uma arquitetura de baixo custo é essencial para o mercado, reduzindo valores de *CAPital EXpenditure* (CAPEX) e *OPerating EXpenses* (OPEX), tornando o custo de migração das redes atuais para uma rede móvel LTE baixo.
- Interoperabilidade: com o objetivo de prover suporte ao usuário (*User Equipment* - UE) em relação às outras tecnologias, como GSM e *High Speed Packet Access* (HSPA), tanto entre redes padronizadas pelo 3GPP quanto em não-3GPP.
- Espectro: pode operar tanto no modo *Frequency Division Duplex* (FDD) quanto no modo *Time Division Duplex* (TDD). No modo FDD, requer bandas emparelhadas, uma para o *downlink* e outra para o *uplink*. Já no modo TDD, o espectro é compartilhado, uma vez que tanto o *downlink* quanto o *uplink* estão em uma única frequência, mas separados no tempo.
- Qualidade de serviço: como já mencionado, a tecnologia LTE opera em uma arquitetura *all-IP*. Dessa forma, é necessário garantir QoS aos vários tipos de serviços e aplicações existentes.

## 2.3 Arquitetura das Redes LTE

O LTE foi projetado para suportar serviços através da comutação por pacotes, deixando para trás a comutação por circuitos de tecnologias anteriores.

A arquitetura é composta principalmente por dois componentes: a *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network* (E-UTRAN) e o *Evolved Packet Core* (EPC) [10], como é possível notar na Figura 2.1.

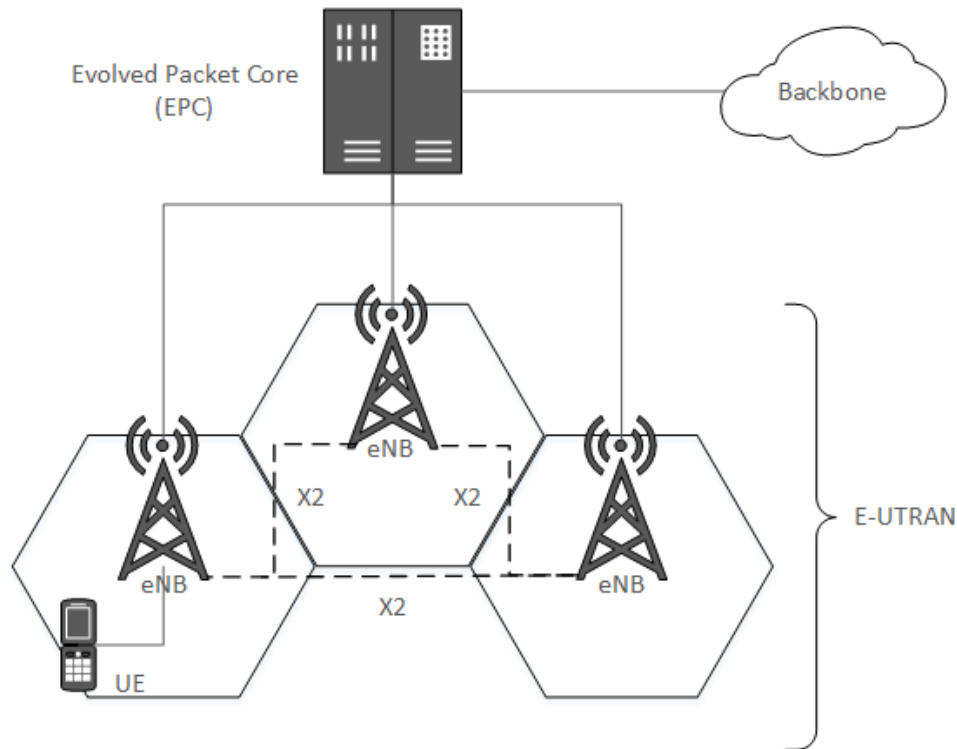


Figura 2.1: Arquitetura de acesso das redes LTE.

A E-UTRAN é responsável pelo gerenciamento do acesso aéreo e provê suporte ao plano de usuário e controle para os UEs. O plano de usuário se refere a um grupo de protocolos utilizados para auxiliar a transmissão de dados de um UE através da rede, enquanto que o plano de controle atua em protocolos para gerenciar a conexão e transmissão entre os usuários e a rede [31].

Além disso, uma outra característica importante da E-UTRAN é a existência de apenas estações bases (eNodeB, ou eNB) [10]. Estas surgem como principais conexões ao núcleo da rede, conectando em duas unidades padrões no EPC: o *Mobility Management Entity* (MME) e o *Serving Gateway* (S-GW).

A eNB possui também como principal funcionalidade a distribuição de recursos entre os UEs, admitindo ou rejeitando conexões e priorizando tráfegos ao escalonar recursos de acordo com os requisitos de QoS de cada aplicação.

O processo de *Handover* é um mecanismo utilizado para que os UEs se movam entre

as redes e também uma responsabilidade para a eNB. Nesse caso, ocorre de acordo com uma interface lógica para comunicação entre uma eNB e outra, a interface X2.

A Figura 2.2 apresenta as principais conexões que uma eNB possui, de maneira que uma eNB pode atender a múltiplos usuários, mas um usuário estará conectado a apenas uma eNB por vez.

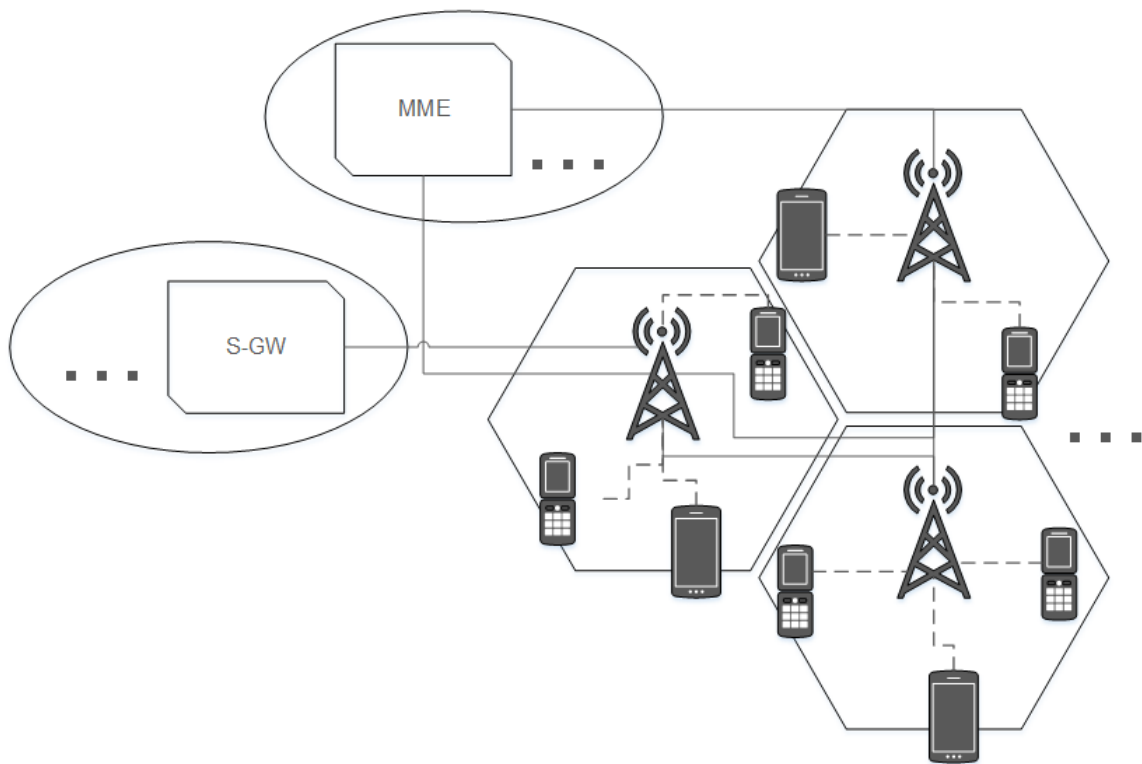


Figura 2.2: Conexões típicas entre eNBs.

O EPC é o núcleo das redes LTE e entre suas principais funções estão [27, 29]:

- Gerenciamento da mobilidade do UE;
- Sinalização entre os elementos do núcleo para mobilidade entre redes de acesso diferentes;
- Verificação da célula atual do UE;
- *Roaming*;
- Autenticação;
- Alocação de endereço IP para o UE;

- Apoio para o *handover* entre as eNBs;
- Conexão com outras redes;
- Roteamento de pacotes;
- Segurança.

Para executar todas essas funções, o EPC é constituído de algumas entidades [1], dentre elas:

- *Mobility Management Entity* (MME);
- *Serving Gateway* (S-GW);
- *Packet Data Network Gateway* (P-GW);

Comparada com arquiteturas de tecnologias anteriores do 3GPP, a arquitetura especificada para as redes LTE possui menos nós e portanto uma menor latência para o usuário [32, 33]. Entretanto, essa característica requer que a eNB se torne responsável por funções que não lhe eram atribuídas, como a criptografia. Diante disso, tanto a E-UTRAN quanto o EPC são responsáveis pela QoS nas redes LTE [34, 35].

### 2.3.1 E-UTRAN

A E-UTRAN provê a interface aérea entre os UEs e a eNB. A rede de acesso aéreo das redes LTE suporta as seguintes funções [10]:

- Gerenciamento dos recursos de rádio;
- Controle de admissão;
- Controle de mobilidade;
- Alocação de recursos para o *downlink* e *uplink*;
- HARQ;
- Compressão do cabeçalho IP;
- Escalonamento, transmissão e *paging*;

- Relatórios de medidas para escalonamento e mobilidade.

Além disso, a E-UTRAN suporta os seguintes protocolos do plano de usuário: *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP), *Radio Link Control* (RLC), *Medium Access Control* (MAC) e *Physical layer* (PHY); onde são efetuadas algumas das principais funções apresentadas anteriormente.

### 2.3.2 EPC

No LTE é utilizado um único núcleo para a rede baseado em uma arquitetura IP. Dessa forma, a arquitetura especificada é plana e possui um número reduzido de entidades.

Como já mencionado, o EPC consiste de algumas entidades como MME, S-GW e P-GW. Além dessas, pode-se adicionar o *Home Subscriber Server* (HSS) e o *Policy Control and Charging Rules Functions* (PCRF).

As funções de cada entidade encontrada no EPC são definidas em [36]:

- *Mobility Management Entity* (MME): é o principal elemento do EPC. O MME possui uma conexão lógica entre o CP e o UE. Esta conexão é utilizada como canal de controle entre o UE e a rede. Além disso, tem como principais funções [36]:
  - Autenticação e segurança: atua quando o UE se registra em uma nova rede pela primeira vez.
  - Gerenciamento de mobilidade: MME mantém um registro da localização de todos os UEs. Dessa forma, logo que um UE se registra em uma nova rede, o MME cria uma entrada com sua localização no *Home Subscription Server* (HSS) encontrado na rede local do UE. O MME também é responsável pelas mensagens de controle no *handover*.
  - Gerenciamento dos perfis de assinaturas e conectividade do serviço: no momento em que um novo usuário se registra em uma rede pela primeira vez, o MME se torna responsável por buscar as informações necessárias sobre o perfil do usuário.
- *Home Subscription Server* (HSS): responsável por armazenar os perfis de assinatura dos usuários e posteriormente utilizar como autenticação para um UE.

- *Packet Data Network Gateway* (P-GW): além de atribuir endereços IPs para os usuários, também é responsável pela conectividade entre outras redes *Packet Data Network* (PDN) exteriores e com tecnologias não-3GPP.
- *Serving Gateway* (S-GW): durante o *handover* do UE entre eNBs, o S-GW atua como âncora para a mobilidade. O S-GW provê um túnel entre uma eNB e outra, encaminhando os dados do usuário enquanto o UE termina o *handover* junto ao MME.
- *Policy Control and Charging Rules Function* (PCRF): responsável pela *Policy and Charging Control* (PCC), ou seja, toma decisões de como lidar com os serviços em termos de QoS.

### 2.3.3 User Equipment (UE)

Nas redes LTE, o usuário se comunica com a E-UTRAN e com o EPC utilizando protocolos de rádio. Do lado do plano de usuário, os protocolos utilizados para a comunicação são os já mencionados: PDCP, RLC, MAC e PHY. Já para o plano de controle é utilizado o protocolo *Radio Resource Control* (RRC) para comunicação com a eNB e o *Non-Access-Stratum* (NAS) para comunicação com o MME [1].

De acordo com os diferentes tipos de *hardwares* existentes em cada UE, eles podem ser classificados de acordo com a Tabela 2.1 baseada em [37].

Tabela 2.1: Tabela de Categorias do UE (Adaptada de [1]).

Categoria UE	Número máximo de bits em um sub-frame <i>downlink</i>	Número máximo de bits em um sub-frame <i>uplink</i>	Número máximo de camadas MIMO no <i>downlink</i>
1	10296	5160	1
2	51024	25456	2
3	102048	51024	2
4	150752	51024	2
5	299552	75376	4

Assim, os usuários são classificados de acordo com a capacidade máxima suportada para transmissão de dados ou pela quantidade de *streams* que consegue manter.

## 2.4 Arquitetura de Protocolos

A arquitetura de protocolos correspondente à camada 2 do Modelo *Open Systems Interconnection*(OSI) é basicamente formada por 3 subcamadas [38]:

- Subcamada *Packet Data Convergence Protocol* (PDCP): possui como principais funções a compressão do cabeçalho, criptografia e segurança;
- Subcamada *Radio Link Control* (RLC): possui como principal função a segmentação e remontagem de PDCP-*Protocol Data Unit* (PDCP-PDU), além de executar correções de erros;
- Subcamada *Medium Access Protocol* (MAC): responsável pelo escalonamento e multiplexação de dados, além de também fornecer correções de erros.

Já na camada abaixo (ou camada 1, também correspondente à camada 1 do Modelo OSI) se encontra a camada física (*Physical Layer* - PHY), como é apresentado na Figura 2.3 [38].

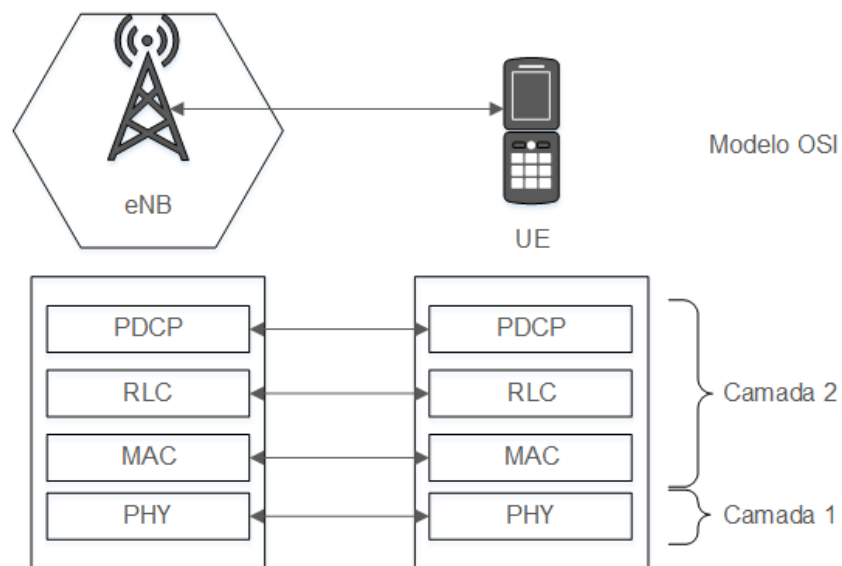


Figura 2.3: Arquitetura de Protocolos.

### 2.4.1 Subcamada PDCP

Como já mencionado, a subcamada PDCP é responsável por compressão e descompressão do cabeçalho de pacotes IP que são recebidos e enviados. Além disso, a subcamada também é responsável pelas funções de segurança, como a criptografia e descriptografia, por exemplo, e funções para servir de suporte ao *handover* de usuários e descarte de pacotes que atingiram o *timeout*.

A compressão e descompressão do cabeçalho é uma das funções mais importantes da subcamada PDCP, pois não há suporte ao transporte de voz via Comutação de Circuitos (*Circuit Switch* - CS) nas redes LTE. Dessa forma para atender aos fluxos de voz na Comutação de Pacotes (*Packet Switch* - PS) é necessário comprimir o cabeçalho dos pacotes IP, UDP e RTP, que normalmente são utilizados para o tráfego VoIP [39].

Já a arquitetura de segurança apresentada nessa subcamada se responsabiliza pela criptografia e integridade dos dados transmitidos durante uma conexão.

A subcamada PDCP também atende ao *handover* executado pelos usuários que estão se movendo da área de cobertura de uma eNB para outra. Há duas formas de *handover* principais, sendo elas:

- *Seamless Handover*: é aplicada principalmente para tráfego tolerante à perda de pacotes, mas não a atrasos. Portanto é utilizada principalmente para tráfego de voz.
- *Lossless Handover*: é aplicada principalmente para serviços tolerantes a atrasos que, por exemplo, utilizam o protocolo *Transmission Control Protocol* (TCP).

Um objetivo importante da subcamada PDCP é a atuação em decisões para descarte de pacotes, visto que devido às condições de canal de um UE em dado momento pode infligir em uma variação extensa da taxa de transmissão. Além disso, congestionamentos de tráfego são corriqueiros em toda a rede. Devido a esses fatos, PDCP atua como um mecanismo para prevenir atrasos excessivos através de um temporizador, logo, pode tomar decisão de retransmissão ou até mesmo de descarte de pacotes a fim de atender os requisitos de QoS das aplicações [40].

## 2.4.2 Subcamada RLC

A subcamada RLC se localiza entre as camadas PDCP e MAC. É responsável principalmente pela segmentação, remontagem e com a ordem em que as unidades de dados são passadas para a subcamada PDCP ou MAC.

Além disso, se a subcamada MAC possui a necessidade de efetuar uma operação *Hybrid Automatic Repeat Request* (HARQ), o RLC se encarrega de organizar em sequência todos os segmentos para a tarefa. Dessa forma, evita-se a utilização de um espaço extra no *buffer* [39].

As principais funções executadas pela subcamada RLC são realizadas por entidades nomeadas de RLC *Entities* que podem operar nos seguintes modos:

- *Transparent Mode* (TM): utilizado principalmente para troca de mensagens de configuração, uma vez que não utiliza *overhead*.
- *Unacknowledged Mode* (UM): utilizado principalmente para fluxos do tipo VoIP, que não são tolerantes a atrasos mas sim, a perdas. Isso porque não é necessário um segmento de *feedback* para a normalidade da função.
- *Acknowledged Mode* (AM): tem como principal funcionalidade a retransmissão.

Dessa forma é utilizado por serviços que são tolerantes a atrasos, mas não a perdas.

## 2.4.3 Subcamada MAC

A subcamada MAC se localiza, por fim, entre as três subcamadas da camada 2 do plano de usuário. A subcamada se comunica com a camada abaixo PHY utilizando canais de transporte, e para se comunicar com a subcamada acima RLC utiliza-se de canais lógicos [38].

Essa subcamada consiste de várias entidades, tais como: HARQ, uma entidade para multiplexação e demultiplexação, entidade de priorização de canais lógicos, acesso randômico e uma entidade de controle para o escalonamento e de consumo de energia.

A entidade HARQ é responsável pela retransmissão de blocos de transportes (*Transport Blocks* - TBs), quando é identificado erro de transmissão através de mensagens de sinalização ACK/NACK. Dessa forma, a operação da entidade executa como o *Stop-and-Wait*, ou seja, dados são transmitidos e posteriormente espera-se *feedback* para, se necessário, enviar novamente [36].

Entidade HARQ pode operar nos modos:

- Síncrono: o processo de retransmissão ocorrerá durante períodos pré-definidos em relação à transmissão original. Utilizado principalmente no canal *uplink* das redes LTE.
- Assíncrono: utilizado no canal *downlink* do LTE, este processo de retransmissão pode ocorrer durante períodos aleatórios em relação à transmissão original. Com isso, é necessário enviar mensagens de sinalização para identificar o processo HARQ.

Já as entidades de multiplexação e demultiplexação se encarregam de montar e/ou desmontar as unidades de dados enquanto houver recursos disponíveis para transmitir e/ou receber. A decisão de envio parte da entidade de priorização do canal lógico para o canal de transporte, enquanto, para o recebimento, ocorre de forma contrária.

Outra característica importante é o controle de acesso randômico encontrado na subcamada MAC, que é responsável pelo procedimento *Random Access Channel* (RACH). Esse processo ocorre quando um UE não está alocado para receber recursos, mas possui dados para serem enviados; ou se não está sincronizado com a eNB. Com isso, há duas formas de ter acesso a esse canal randômico: baseado em contenção e livre de contenção.

E, finalmente, a entidade de controle, que tem como principal função evitar o gasto excessivo de bateria pelo lado do UE. Esta entidade utiliza-se principalmente de funcionalidades do *Discontinuous Reception* (DRX) para esse propósito [39].

## 2.5 Camada PHY

Técnicas de modulação e acesso múltiplo são importantes para redes móveis celulares alcançarem um bom desempenho no sistema. Tipicamente canais de comunicações móveis apresentam problemas aos efeitos negativos introduzidos pelo desvanecimento multipercurso, dessa forma torna-se essencial a utilização de multiportadoras separadas por bandas de guarda em redes LTE [40].

A técnica de transmissão *Orthogonal Frequency Division Multiplexing* (OFDM) tem sido largamente utilizada em comunicações móveis, por se tratar de uma técnica de multiportadoras com grande robustez contra os desvanecimentos seletivos do canal citados anteriormente.

O OFDM não é uma técnica de acesso múltiplo. É um tipo de modulação em que divide-se o canal em subportadoras, alocando-as para um mesmo UE em cada instante de tempo.

Mas, nas redes móveis celulares atuais, como o LTE, tem-se a necessidade de vários usuários acessarem o sistema. Devido a isso, o 3GPP padronizou a técnica de transmissão *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA) para o tráfego *downlink* e *Single Carrier Frequency Division Multiple Access* (SC-FDMA) para o *uplink*.

Além disso, o padrão LTE define dois modos de duplexação para alocar *frames* de transmissão entre os tráfegos de *uplink* e *downlink* [36]. São eles:

- *Frequency Division Duplexing* (FDD): dados para os canais de *uplink* e *downlink* são enviados separadamente em bandas de frequências diferentes;
- *Time Division Duplexing* (TDD): usa um mesmo canal de radiofrequência que é alocado em *time slots* diferentes para a transmissão e recepção.

### 2.5.1 OFDMA

O tráfego *downlink* em redes LTE utiliza OFDMA como esquema de transmissão. OFDMA é uma extensão do OFDM para um sistema multiusuário, sendo a principal diferença, a divisão das subportadoras em grupos e a alocação para os diferentes usuários de acordo com a demanda.

Cada grupo é formado por no mínimo 12 subportadoras com um espaçamento regular de 15 kHz, assim formando um *Resource Block* (RB) [38]. A quantidade de RBs está associado à banda disponível, conforme é apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Parâmetros físicos dos RBs.

Prefixo Cíclico	Subportadoras (kHz)	Número de Subportadoras	Símbolos OFDM
Normal	15	12	7
Estendido	15	12	6
Estendido	7,5	24	3

OFDMA consiste basicamente de uma tecnologia digital com o uso do *Discrete Fourier*

*Transform* (DFT) e pela operação inversa, *Inverse Discrete Fourier Transform* (IDFT). Dessa forma, aloca recursos no domínio do tempo e da frequência [39].

O prefixo cíclico (*Cyclic Prefix*) é adicionado entre sucessivos símbolos OFDM durante a transmissão como medida de prevenção para o problema de multipercurso. Um prefixo cíclico consiste basicamente de uma repetição da última parte do símbolo OFDM anterior, e por isso é utilizado como um modo de sinalização e detecção pelo lado do receptor [40].

### 2.5.2 SC-FDMA

Para o tráfego *uplink* em redes LTE utiliza-se o SC-FDMA como esquema de transmissão. Assim como o OFDM, SC-FDMA divide o espectro de transmissão em múltiplas subportadoras em paralelo, utilizando a ortogonalidade entre elas e também fazendo uso do prefixo cíclico assim como o OFDMA. Nesse caso, o prefixo é utilizado periodicamente, pois a taxa de símbolos no domínio do tempo é maior para o SC-FDMA.

O SC-FDMA foi escolhido para o tráfego *uplink* por apresentar uma *Peak-to-Average Power-Ratio* (PAPR) baixa [41, 42]. Para tanto, não se utiliza OFDMA pelo fato de apresentar uma grande variação de energia durante a transmissão. Uma PAPR alta causa ineficiência no consumo de energia para os terminais móveis que desejam transmitir no canal *uplink*, criando assim um obstáculo para sua utilização.

O funcionamento do SC-FDMA ou DFT-S-OFDMA (*Discrete Fourier Transform Spread OFDMA*) consiste em um esquema de transmissão que através da aplicação da DFT a um conjunto de símbolos encontrados no canal *uplink*, consegue mapear cada transmissão em diferentes subportadoras com frequências distintas, ver Figura 2.4.

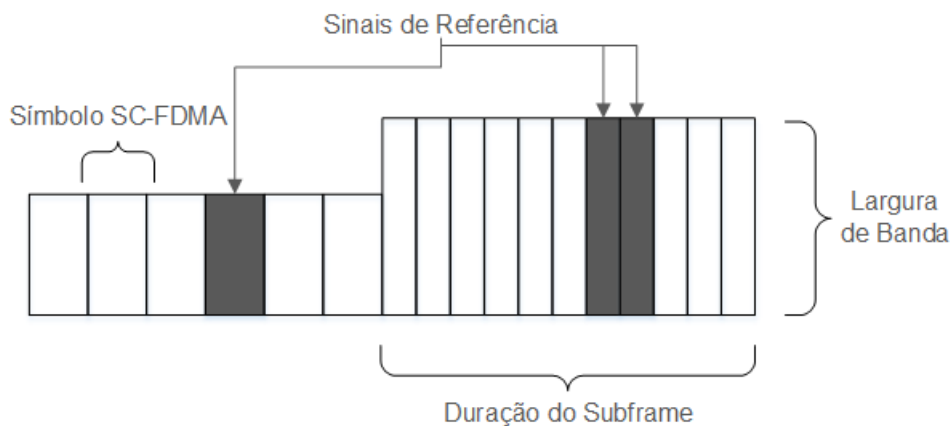


Figura 2.4: Ajuste de frequência na técnica SC-FDMA.

Com relação à divisão de recursos, um RB para o SC-FDMA é definido da mesma forma que para o OFDMA. Com isso, são utilizados no mínimo 12 subportadoras com um espaçamento de 15 kHz. Logo após o mapeamento de recursos, o sinal é alimentado no domínio do tempo para geração do sinal SC-FDMA acrescentando o prefixo cíclico, que pode ser estendido ou não. Tal procedimento permite que vários usuários possam compartilhar recursos, tanto no domínio do tempo quanto no domínio da frequência. No domínio do tempo, a granularidade de transmissão é de 1 ms, dividido em 2 slots de 0,5 ms, e no domínio da frequência é 180 kHz. A eNB controla cada transmissão para evitar que recursos se sobreponham [39].

A eNB receptora consegue detectar a transmissão de acordo com o recurso no domínio do tempo e frequência. Como todo o escalonamento do tráfego *uplink* é feito na eNB, com exceção do canal randômico RACH, a eNB sempre conhece qual UE aguarda por recursos para transmitir.

Uma vez que um UE inicia uma transmissão no domínio do tempo utiliza-se apenas um símbolo de modulação, mantendo assim as características denominadas pelo método de modulação aplicado. Diante disso, permite que o SC-FDMA alcance uma PAPR baixa, aumentando a eficiência dos amplificadores de sinais.

Embora o SC-FDMA apresente tal vantagem com relação a PAPR baixa, é necessário que todas as subportadoras alocadas para um UE sejam adjacentes no domínio da frequência. Com isso, tem-se uma melhor eficiência espectral e simplifica o esquema de transmissão do sistema [4].

## 2.6 Gerenciamento dos Recursos de Rádio

O *Radio Resource Management* (RRM) é responsável por várias técnicas para alcançar a eficiência no uso dos recursos de rádio [36]:

- Escalonamento;
- Controle do custo de energia;
- *Handover*;
- Monitoramento de conexão (aceitar/rejeitar).

O RRM utiliza-se de técnicas de adaptação disponíveis além de requisitos de QoS para garantir que os recursos sejam usados de forma devida entre os usuários. Neste sentido, o RRM concentra-se em dois principais mecanismos: *Radio Admission Control* (RAC) e Escalonamento de Pacotes (*Packet Scheduling*).

### 2.6.1 Controle de Admissão

O controle de admissão encontrado na eNB tem como principal função decidir se as novas requisições recebidas serão aceitas ou rejeitadas. Para isso os recursos disponíveis na célula e requisitos de QoS, tanto para as conexões já ativas quanto para as novas conexões, são utilizados como meio para tomada de decisões.

As decisões, tanto das políticas definidas quanto do algoritmo utilizado, são controladas pela eNB. Uma nova requisição de conexão recebida pela eNB em que os requisitos de QoS são possíveis de serem atendidos, apenas será atribuída se sua prioridade for maior dentre outras conexões já estabelecidas. Isso ocorre quando há congestionamento de solicitações. Um exemplo de requisição de conexão seria um UE em processo de *handover* se movendo entre as células vizinhas até a célula alvo.

Todos os *requests* de um mesmo tipo de serviço tem o mesmo tratamento de QoS. É possível modificar os parâmetros de QoS das conexões existentes de forma dinâmica. Da mesma forma, é possível ativar uma conexão em paralelo para atender os diferentes perfis de QoS simultaneamente. A nova conexão pode ser iniciada pelo UE ou pelo núcleo da rede [36].

O 3GPP não especifica qualquer técnica de controle de admissão que a eNB deve adotar, deixando a cargo das próprias empresas tomarem suas decisões de acordo com as especificações desejadas.

### 2.6.2 Escalonamento de Pacotes

Uma das principais funções exercidas pela eNB é o gerenciamento de recursos para os usuários. O objetivo é atender de forma satisfatória a maior quantidade de UEs possíveis, desde que consiga garantir a todos os requisitos de QoS de suas aplicações.

Escalonamento de pacotes se refere a alocar RBs para os UEs ativos no sistema durante um período. Assim, no LTE, a alocação de recursos ocorre uma vez a cada *subframe* ou *Transmission Time Interval* (TTI).

No sistema LTE, o escalonamento de pacotes envolve em selecionar uma quantidade de UEs (ou serviços) para serem escalonados durante um TTI. Com isso, o algoritmo de escalonamento decide qual utilizará o grupo de RBs disponíveis para alocação. Essa decisão visa maximizar a satisfação dos requisitos do sistema e dos UEs.

No sentido *uplink*, todos os UEs possuem várias filas de serviços com dados para transmitir correspondente a diferentes canais lógicos, sendo que cada um contém suas restrições. Do mesmo modo, para o *downlink*, a eNB pode manter vários *buffers* por UE contendo tráfego de dados, além de filas para transmissão em *broadcast*. As diferentes filas de tráfegos na eNB são gerenciadas pelo escalonador de pacotes e cada uma possui suas devidas condições [39].

O escalonador de pacotes alcança a otimização do sistema baseado em alguma métrica de desempenho desejada, por exemplo:

- Vazão máxima, mínima ou média;
- Atraso máximo, mínimo ou médio;
- Índice de justiça entre UEs;
- Eficiência espectral total ou por UE;
- Taxa de perda de pacotes (*Packet Loss Rate* - PLR);
- Probabilidade de interrupção de transmissão.

A escolha da métrica de desempenho influencia em como o escalonador irá atuar para alocar recursos entre os UEs. Assim como ocorre no controle de admissão, o 3GPP não especifica qualquer algoritmo de escalonamento ou métrica de desempenho que a eNB precise utilizar, deixando a cargo das próprias empresas tomarem suas decisões de acordo com as especificações desejadas.

#### 2.6.2.1 *Scheduling Request* (SR)

O mecanismo de escalonamento utilizado para o tráfego uplink pode iniciar através de um *Scheduling Request* (SR) enviado para a eNB pelo UE.

O SR é geralmente utilizado por um UE para solicitar recursos através do canal *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH), sendo transmitido durante algum evento de sinalização acionado pelo UE, por exemplo ACK/NACK, e que não esteja sendo escalonado no TTI em questão.

O UE pode enviar um SR de duas formas, no qual fora definido pelo 3GPP [43, 32]:

- Utilizando um bit dedicado durante o *Buffer Status Report* (BSR) através do canal PUSCH.
- Utilizando o procedimento de acesso ao canal randômico. Dessa forma, ocorre quando não há alocação para o canal PUSCH e recursos para o canal *Physical Uplink Control Channel* (PUCCH). O UE também pode enviar SR quando tenta sincronizar com a eNB.

Sendo assim, o SR utiliza um simples bit para acionar ou não. No momento em que o UE necessita de recursos, é enviado um bit de valor 1 no mesmo formato em que se enviam mensagens de sinalização. Logo, se não há a necessidade de mais recursos, é enviado um bit de valor 0.

Além disso, o padrão LTE pode utilizar outros mecanismos para obter informações durante o gerenciamento dos recursos de rede e distribuí-los.

### 2.6.2.2 *Buffer Status Report* (BSR)

Relatórios *Buffer Status Report* (BSR) são utilizados pelos UEs para informarem o status de seus *buffers* para a eNB. É um mecanismo necessário para garantir QoS aos serviços escalonados no tráfego *uplink*, já que o escalonador utiliza-se do BSR para se informar sobre a quantidade de dados que ainda há para serem enviados.

3GPP padronizou o relatório BSR para ser enviado por grupo de portadoras (*Radio Bearer Group* - RBG) que possuem os mesmos requisitos de QoS. Fixando um valor máximo de 4 RBGs.

O BSR pode ser utilizado em dois formatos [39], como apresenta a Figura 2.5:

- BSR curto: quando há dados de apenas um RBG para reportar;
- BSR longo: quando há dados em todas as RBGs para reportar.

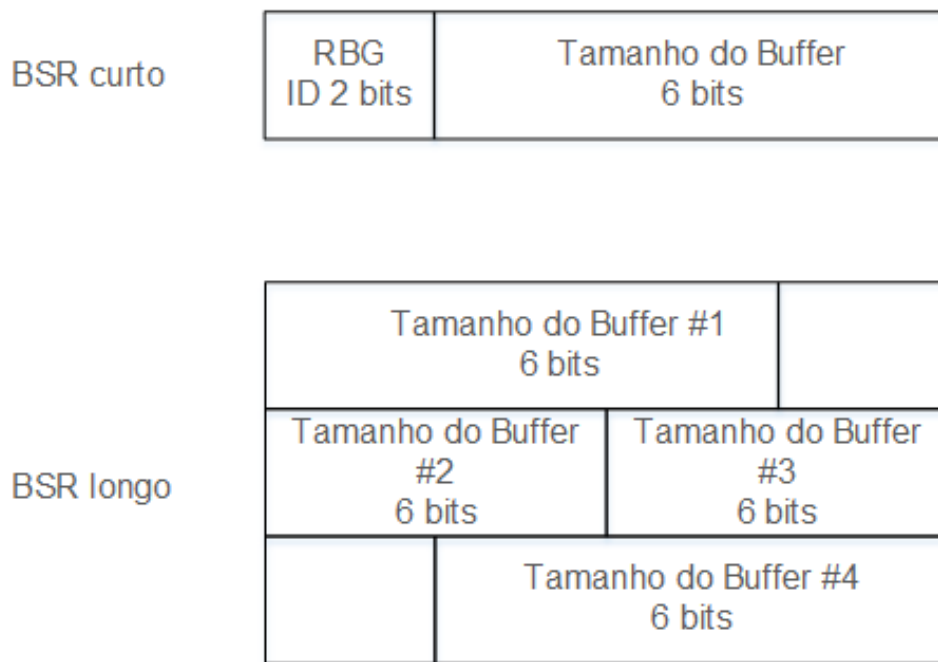


Figura 2.5: BSR curto e longo.

### 2.6.2.3 Sounding Reference Signal (SRS)

O *Sounding Reference Signal* (SRS) é utilizado para prover informações sobre a qualidade do canal durante uma transmissão pelo PUSCH no *uplink*. A informação obtida sobre o canal pode ser usada para otimização do processo de escalonamento, principalmente no domínio da frequência, do tráfego *uplink* [36].

SRS é transmitido no último símbolo de um subframe SC-FDMA, podendo ser enviado de forma única ou periodicamente, variando de acordo com as configurações definidas, como ilustra a Figura 2.6.

Transmissões SRS de diferentes UEs podem ser multiplexadas de várias formas [36]:

- No domínio do tempo: envio de SRSs periódicos intercalados em diferentes subframes;
- No domínio da frequência: para facilitar a multiplexação;
- Com deslocamentos cíclicos: sendo possíveis de serem configurados até oito deslocamentos;
- Transmissão *comb* de forma distribuída: ao contrário do deslocamento cíclico, o envio *comb* não precisa de sinais de multiplexação para ocupar uma mesma banda

disponível.

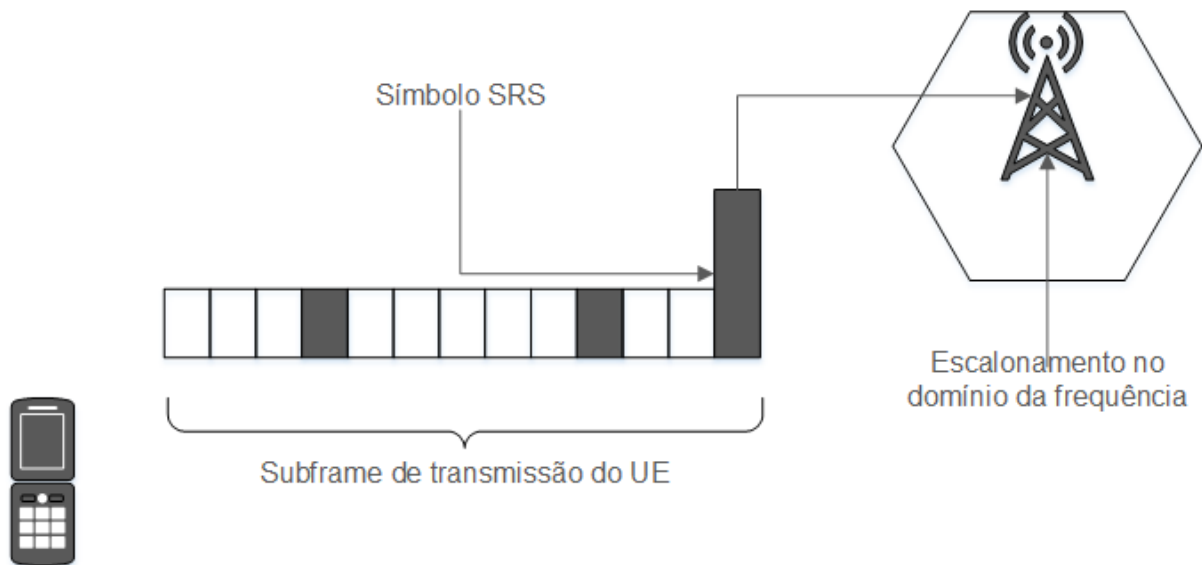


Figura 2.6: Transmissão de um SRS.

## 2.7 Qualidade de Serviço em Redes LTE

O conceito de QoS foi introduzido pelo 3GPP em [44] e [45]. Múltiplas aplicações são executadas ao mesmo tempo em um UE e cada uma possui seus requisitos de QoS para garantir o bom uso de seus serviços.

De acordo com o 3GPP, o LTE organiza os fluxos de tráfego de forma lógica em paralelo, sendo que cada fluxo possui seus atributos de QoS associados. Como exemplo, pode-se citar um usuário utilizando VoIP durante uma chamada de voz enquanto mantém o navegador de Internet aberto efetuando *download* de um arquivo. Fluxo de dados VoIP possui requisitos de QoS mais rígidos se comparado ao arquivo em *download*. Dessa forma, os diferentes serviços são mantidos por diferentes portadoras *Evolved Packet System* (EPS).

Diante disso, as portadoras podem ser classificadas em duas categorias [39]:

- *Guaranteed Bit Rate* (GBR): são utilizadas por aplicações do tipo VoIP, por exemplo. Serviços associados a esta categoria precisam de um valor mínimo de taxa de transmissão para que consigam manter os requisitos de QoS. Taxas superiores a este valor podem ser alcançadas se houver recursos disponíveis.

- *Non Guaranteed Bit Rate* (non-GBR): são utilizadas por aplicações como tráfego WEB ou FTP. Nesse caso, não se garante nenhum valor de taxa de transmissão mínimo para os serviços referentes.

Cada portadora EPS é caracterizada pelos seus parâmetros de QoS, sendo gerenciados através da arquitetura *Policy and Charging Control* (PCC). Esta arquitetura é responsável pelos mecanismos de policiamento e controle de carga que são aplicados a cada portadora criada entre o UE e a PDN [4].

Uma portadora EPS é associada a um *QoS Class Identifier* (QCI) e a um *Allocation Retention Priority* (ARP). Cada QCI possui uma prioridade, limite de atraso máximo e taxa aceitável de perda de pacotes. Todos esses requisitos são utilizados pelo escalonador de pacote para gerenciamento dos recursos. Os parâmetros QCI são apresentados na Tabela 2.3, no qual é reproduzida de [2].

Já o ARP é utilizado para o controle de admissão de conexões. Assim, gerencia a prioridade de cada portadora já conectada, além de novas requisições de conexão. Atua também durante o processo de *handover*.

ARP tem papel fundamental durante o controle de congestionamento, onde utiliza-se dos parâmetros de QoS para decidir quais conexões irão ser mantidas. Com isso, possui papel fundamental tanto durante o controle de admissão quanto no escalonamento de pacotes.

## 2.8 Considerações Finais

Neste capítulo, identificaram-se as principais características da tecnologia LTE. Inicialmente foi apresentada uma breve introdução sobre o assunto. Posteriormente, foi descrito a rede de acesso E-UTRAN, fornecendo uma visão geral de como ocorre a comunicação entre estações bases e também entre uma estação e usuários finais. Logo, a camada MAC e suas subcamadas juntamente com a camada PHY tiveram suas especificações detalhadas com base no modelo de referência do padrão. Por fim, foi apresentado o escalonamento e suas características para o tráfego *uplink* com uma atenção especial a QoS em redes LTE.

Tabela 2.3: Tabela QCI (Adaptada de [2]).

QCI	Tipo de Recurso	Prioridade	Atraso Máximo [ms]	Taxa de Perda de Pacotes	Exemplos
1	GBR	2	100	$10^{-2}$	Voz conversacional
2	GBR	4	150	$10^{-3}$	Vídeo conversacional ( <i>live streaming</i> )
3	GBR	3	50	$10^{-3}$	Jogos em tempo real
4	GBR	5	300	$10^{-6}$	Vídeo não-conversacional
5	non-GBR	1	100	$10^{-6}$	Sinalização IMS
6	non-GBR	6	300	$10^{-6}$	Vídeo( <i>buffered streaming</i> ) baseado em TCP
7	non-GBR	7	100	$10^{-3}$	Voz, vídeo ( <i>live streaming</i> ) e jogos interativos
8	non-GBR	8	300	$10^{-6}$	Vídeo( <i>buffered streaming</i> ) baseado em TCP
9	non-GBR	9	300	$10^{-6}$	Vídeo( <i>buffered streaming</i> ) baseado em TCP

# Capítulo 3

## Escalonamento de Pacotes no Tráfego *Uplink* em Redes LTE

### 3.1 Introdução

Como mencionado no capítulo anterior, o SC-FDMA é a tecnologia de acesso na interface aérea utilizada no tráfego *uplink* devido a baixa PAPR apresentada. Dessa forma, tal tecnologia provê canais físicos separados para a transmissão e sinalização, nesse caso utilizados para controle de conexões do tráfego *downlink*.

A camada física de transmissão para o tráfego *uplink* em redes LTE inclui três principais canais [31]:

- *Physical Random Access Channel* (PRACH): responsável por suportar os dados transportados no canal *Random Access Channel* (RACH);
- *Physical Uplink Shared Channel* (PUSCH): responsável por suportar dados do canal de transporte *Uplink Shared Channel* (UL-SCH);
- *Physical Uplink Control Channel* (PUCCH): transporta mensagens de sinalização ACK/NACKs das transmissões do tráfego *downlink*.

Já o escalonador de pacotes opera na segunda camada da pilha de protocolos das redes LTE e aloca dinamicamente recursos físicos a cada 1 ms. A alocação de recursos e transferência dos dados são feitas através do canal de transporte UL-SCH, sendo o canal físico PUSCH responsável por transportar esses recursos. Logo, a decisão de escalonar

recursos entre múltiplos usuários é uma funcionalidade importante do RRM para aumentar a eficiência de toda a rede.

O procedimento geral para o escalonamento no tráfego *uplink* é ilustrado na Figura 3.1.

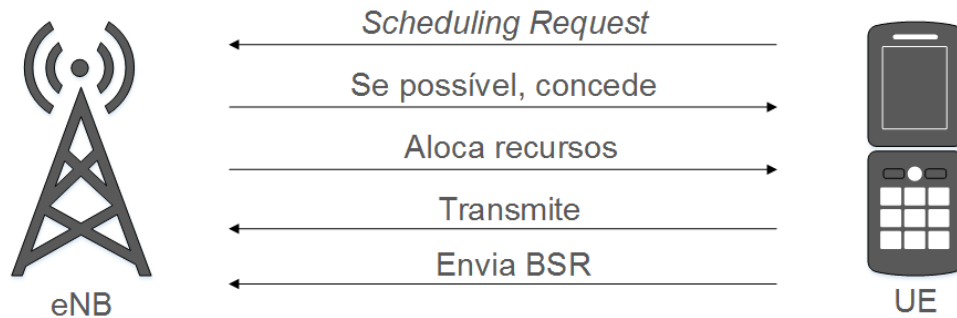


Figura 3.1: Procedimento geral para o escalonamento no *uplink*.

Dessa maneira, o objetivo principal deste capítulo é descrever as principais características do escalonamento de pacotes no tráfego *uplink* e de alguns dos principais algoritmos para essa função encontrados na literatura. Diante disso, na próxima seção é introduzido o funcionamento do escalonamento e alocação de recursos, consistindo em alguns fatores necessários durante o desenvolvimento de um novo algoritmo. Posteriormente, é apresentada uma importante característica utilizada durante a distribuição de recursos entre os usuários, que é a capacidade de adaptação do enlace para melhor atender as necessidades de cada usuário. Por fim, o capítulo apresenta os principais algoritmos de escalonamento estudados.

## 3.2 Escalonamento de Pacotes

O escalonador de pacotes para o tráfego *uplink* localiza-se na eNB como uma parte do RRM e consiste no processo de tomada de decisões para distribuir os recursos disponíveis no canal PUSCH de forma eficiente entre os UEs.

Na padronização das redes LTE atribui-se 1 ms (no domínio do tempo) para cada *subframe* (0,5 ms para cada *slot*) escalonado que se equivale a um TTI. Com isso, a cada 1 ms o escalonador de pacotes decide quais usuários serão escalonados no próximo TTI. Já no domínio da frequência, cada RB consiste de 12 subportadoras consecutivas [46].

Os escalonadores encontrados na literatura passam principalmente por duas etapas durante cada TTI [47]:

- Seleção de usuários: processo em que o escalonador seleciona um conjunto de UEs que estão aguardando para transmitir no próximo TTI. Esse processo ocorre de acordo com algum critério definido pelo desenvolvedor do algoritmo, podendo ser baseado em requisitos de QoS, tamanho do *buffer*, ou a combinação de vários.
- Multiplexação no domínio da frequência: uma vez que o escalonador selecionou o conjunto de UEs, torna-se necessário a distribuição dos recursos disponíveis entre os mesmos.

Portanto, o escalonamento de pacotes pode ser descrito como apresenta a Figura 3.2. Durante a fase no domínio do tempo (*Time Domain Packet Scheduler* - TDPS), o escalonador verifica a prioridade de todos os UEs de acordo com um critério anteriormente definido. Dessa forma, UEs com maiores prioridades serão alocados a uma fila específica. A quantidade de usuários selecionados depende da heurística do escalonador implementado, entretanto, a quantidade de recursos disponíveis depende das configurações definidas na eNB juntamente ao canal de controle do *downlink*.

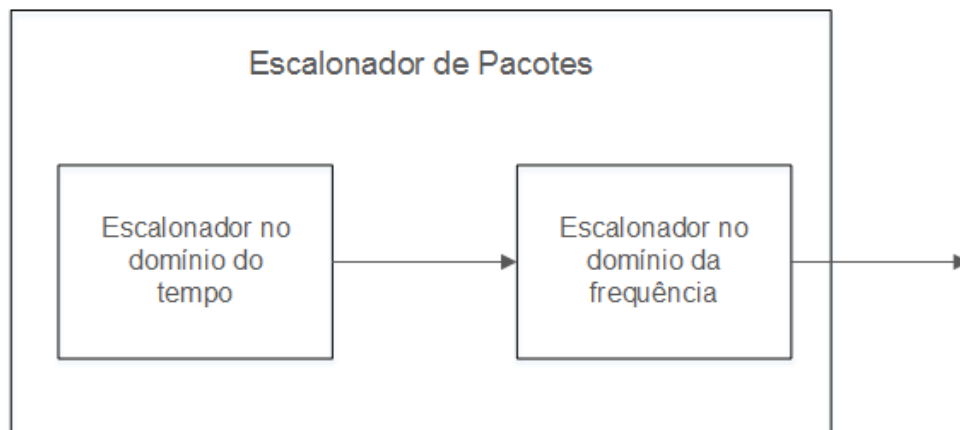


Figura 3.2: Escalonamento no domínio do tempo e da frequência.

Durante o escalonamento no domínio da frequência (*Frequency Domain Packet Scheduler* - FDPS), o algoritmo executa uma alocação dinâmica de recursos para os UEs selecionados no domínio do tempo. O algoritmo que atua no FDPS executa tal funcionalidade de acordo com algum método definido, da mesma forma que ocorre no TDPS. Mas

se diferem pelo fato de que no FDPS o escalonador busca um equilíbrio entre os RBs e os UEs, principalmente através das condições dos canais.

Dessa forma, ambos os domínios utilizam uma função de utilidade  $U$ . Essa função é um modelo matemático que proporciona, em valores numéricos, o nível de desempenho do sistema através de alguns requisitos tais como vazão do sistema ou por UE, atraso de transmissão de dados por UE, índice de justiça entre os serviços dos UEs, taxa de perda de pacotes e assim por diante [39]. Sendo assim,  $U$  pode ser definido [4]:

$$U \rightarrow M^{TD}(u), M^{FD}(u, r) \quad (3.1)$$

onde  $M^{TD}(u)$  é a métrica de alguns dos requisitos citados acima no domínio do tempo, e o  $M^{FD}(u, r)$  é a métrica utilizada no domínio da frequência para o usuário  $u$  e RB  $r$ , ambos no próximo TTI. Com base nesses valores, pode-se formar uma matriz de UEs/RBs no FDPS e assim, alocar os recursos disponíveis, como apresenta a Tabela 3.1.

Tabela 3.1: Matriz que representa o mapeamento UEs-RBs.

$UE/RB$	$RB_1$	$RB_2$	$\dots$	$RB_{N_{RB}}$
$UE_1$	$M_{1,1}$	$M_{1,2}$	$\dots$	$M_{1,N_{RB}}$
$UE_2$	$M_{2,1}$	$M_{2,2}$	$\dots$	$M_{2,N_{RB}}$
$\vdots$	$\vdots$			$\vdots$
$UE_N$	$M_{N,1}$	$M_{N,2}$	$\dots$	$M_{N,N}$

Durante o processo de definição de uma nova política de alocação de recursos, é necessário que o escalonador de pacotes atenda cada UE de forma efetiva, garantindo os requisitos de QoS ao mesmo tempo em que disponibiliza recursos para múltiplos usuários. Diante disso, o escalonador precisa considerar alguns fatores [4]:

- Retransmissões HARQ: o escalonador precisa determinar uma quantidade de RBs para essa operação;
- Relatórios *Channel State Information* (CSI): provê à eNB informações sobre as condições do canal de cada usuário;

- Parâmetros de QoS: é necessário atentar-se aos requisitos de QoS de todas as conexões ativas na eNB;
- Quantidade máxima de UEs: é necessário determinar um número máximo de usuários para serem escalonados no próximo TTI;
- Contiguidade: para o escalonamento no tráfego *uplink* é necessário que os recursos sejam alocados de forma contígua para atingir uma melhor eficiência do SC-FDMA;
- Adaptar a modulação ao enlace de acordo com as condições de cada usuário;
- Limitação do consumo de energia: se deve ao fato do UE possuir uma bateria com energia limitada, com isso é preciso minimizar seu consumo.

### 3.2.1 *Link Adaptation* (LA)

Nas comunicações móveis é comum existirem variações significativas em relação as condições de canal dos usuários. Por este motivo, é necessário lidar com tais variações, realizando adaptações aos parâmetros de canal, de modo que possa minimizar os efeitos negativos durante a utilização dos recursos de rádio.

Diante disso, o processo de seleção dos parâmetros de transmissão e do *Modulation and Coding Scheme* (MCS) correspondente é conhecido como *Link Adaptation* (LA). Com o objetivo de maximizar a capacidade da célula, LA compensa as variações das condições de canal do usuário durante a alocação de recursos e envio de dados.

*Adaptive Modulation and Coding* (AMC) é utilizado pelo LA para ajustar o esquema de modulação e a taxa de codificação utilizada entre o usuário e a eNB. Uma técnica de modulação que fornece uma taxa de transmissão de dados superior possui, por outro lado, uma maior propensão a erros. Dessa forma, ela deverá ser escolhida apenas para altos valores de *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio* (SINR). A taxa de codificação pode ser adaptada de tal forma que uma baixa taxa é definida para canais ruins [48].

De acordo com a padronização do 3GPP para as redes LTE, a eNB utiliza o valor de *Channel Quality Indicator* (CQI) reportado por cada usuário para identificar a qualidade do sinal do usuário e assim alocar os respectivos recursos suportados durante o escalonamento no tráfego *downlink*. Para o *uplink*, a eNB utiliza o SRS para esse propósito.

### 3.2.2 Round Robin (RR)

RR é um algoritmo de escalonamento simples e de fácil implementação. Utiliza-se o princípio da divisão de recursos de forma igual entre todos os usuários selecionados para alocação de recursos [49]. Dessa forma, não considera informações acerca das condições de canal dos usuários.

Cada UE ativo em uma célula terá acesso a mesma quantidade de recursos durante um certo período. Com isso, o algoritmo RR possui uma grande capacidade de equidade entre os usuários, garantindo que todos consigam transmitir.

Essa capacidade é alcançada ao considerar a quantidade de recursos distribuídos entre os UEs durante certo período, porém se levar em conta a qualidade de canal de cada UE, o RR não provê uma mesma qualidade de recursos a todos os UEs. Além disso, devido a essas características, o RR possui uma baixa vazão se comparado a outros algoritmos que serão apresentados nesse capítulo.

Um fluxograma demonstrando o processo de escalonamento do algoritmo RR é apresentado na Figura 3.3 [6].

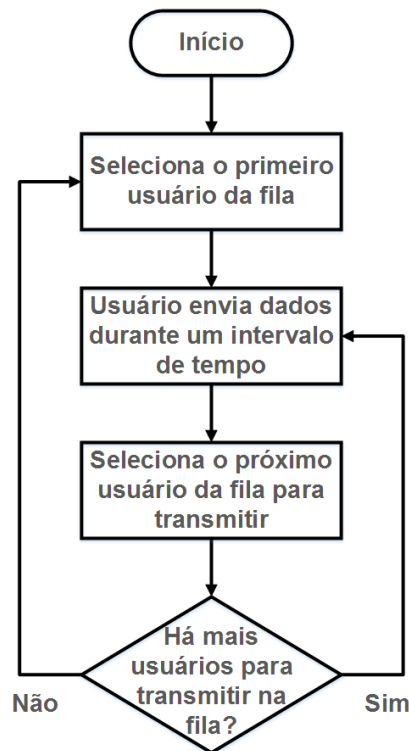


Figura 3.3: Algoritmo *Round Robin*.

### 3.2.3 *First Maximum Expansion (FME)*

O algoritmo de escalonamento FME foi proposto em [50]. O objetivo principal do FME é alocar RBs para os UEs de forma contígua no domínio da frequência como é necessário ao utilizar o SC-FDMA.

FME utiliza a matriz de UE/RB para atribuir recursos entre os usuários. O algoritmo inicia pelo maior valor encontrado na matriz e expande a alocação em ambas as direções (esquerda e direita). Um usuário será considerado “servido” se o algoritmo encontrar outro UE com melhor valor na matriz.

Para formar tal matriz  $M_{u,r}$ , o FME por padrão utiliza informações sobre as condições de canal de cada usuário [51],

$$M_{u,r} = x_{u,r}(t) \quad (3.2)$$

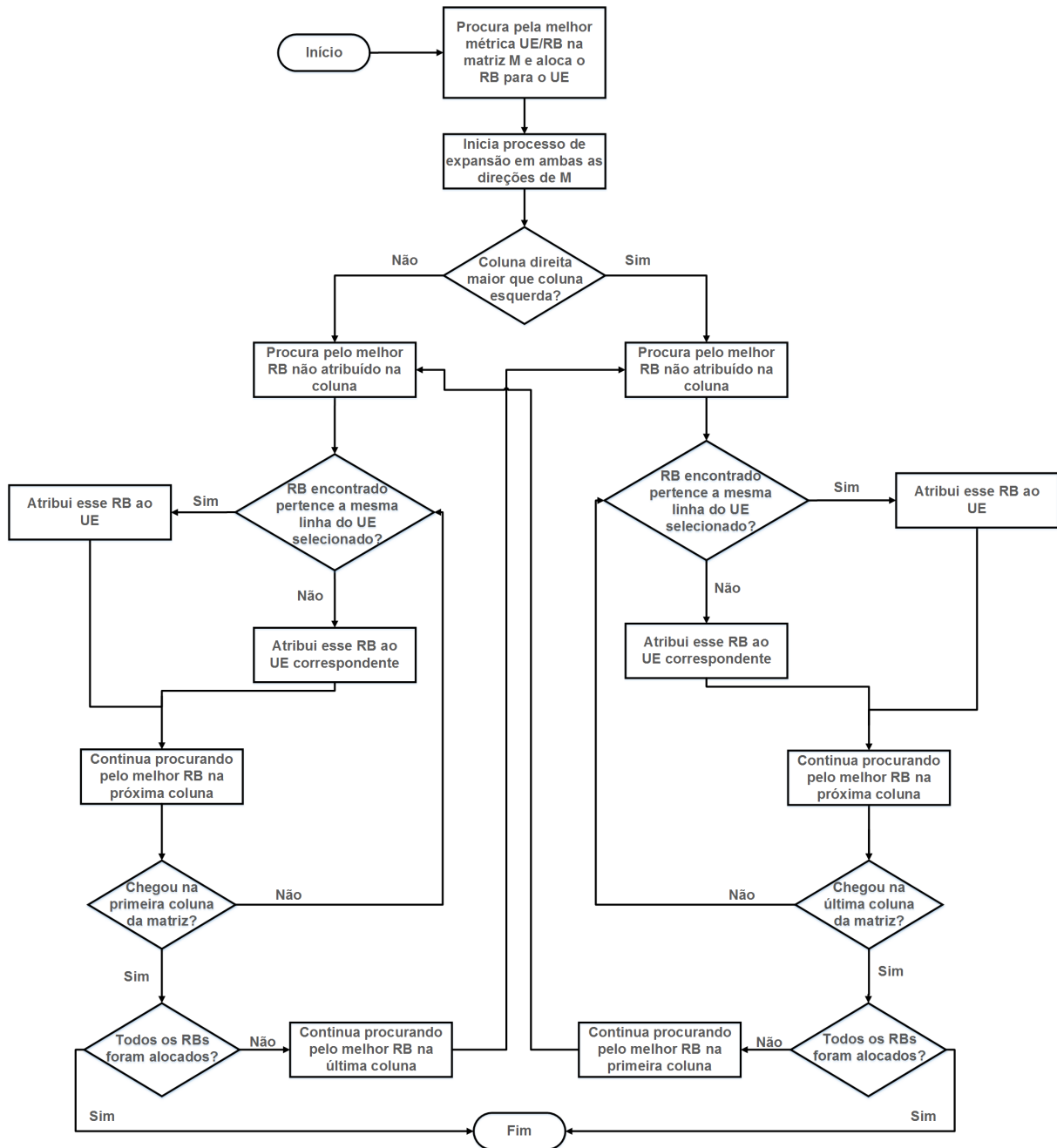
onde  $x_{u,r}(t)$  representa a qualidade do canal do usuário  $u$  em relação ao RB  $r$  no tempo  $t$ . Com esse paradigma o algoritmo consegue alcançar altos níveis de vazão, pois usuários com melhores condições terão mais recursos alocados. Da mesma forma, usuários com condições ruins de canal poderão ficar em “inanição”.

Para resolver parcialmente esse problema, o FME pode utilizar o paradigma *Proportional Fairness* (PF). O PF também utiliza informações sobre as condições de canal de cada usuário, porém atribui a isso um histórico de utilização do enlace. Dessa forma, usuários que não conseguiram transmitir anteriormente terão maior probabilidade de serem atendidos no próximo TTI. Para construção da matriz  $M_{u,r}$ , o PF pode ser definido [13],

$$M_{u,r} = x_{u,r}(t)/X_u(t) \quad (3.3)$$

onde  $x_{u,r}(t)$  representa a qualidade do canal do usuário  $u$  no RB  $r$  e no tempo  $t$ .  $X_u(t)$  representa o histórico de transmissões do usuário  $u$  até o tempo  $t$ .

Na Figura 3.4 é apresentado um fluxograma do algoritmo de escalonamento FME, baseado em [13].

Figura 3.4: Algoritmo *First Maximum Expansion*.

### 3.2.4 Recursive Maximum Expansion (RME)

O algoritmo RME também foi proposto em [50]. A ideia do RME é parecida com a do FME, mas se diferem pelo fato de que este executa uma busca recursiva pelo maior valor na matriz UE/RB. Uma vez encontrado o valor, o algoritmo se expande em ambas as direções até que encontre um usuário com valor maior. Assim, o RME coloca o usuário “servido” em modo *idle* até que termine a distribuição entre os outros usuários. Se todos os

usuários estiverem servidos, mas ainda há RBs sobrando, o algoritmo atribui os recursos restantes aos vizinhos de forma a manter a contiguidade.

A matriz  $M_{u,r}$  utilizada no domínio do tempo é formada também pelos mesmos paradigmas utilizados no FME e descritos na subseção anterior.

A Figura 3.5 descreve o algoritmo de escalonamento RME, baseado em [13].

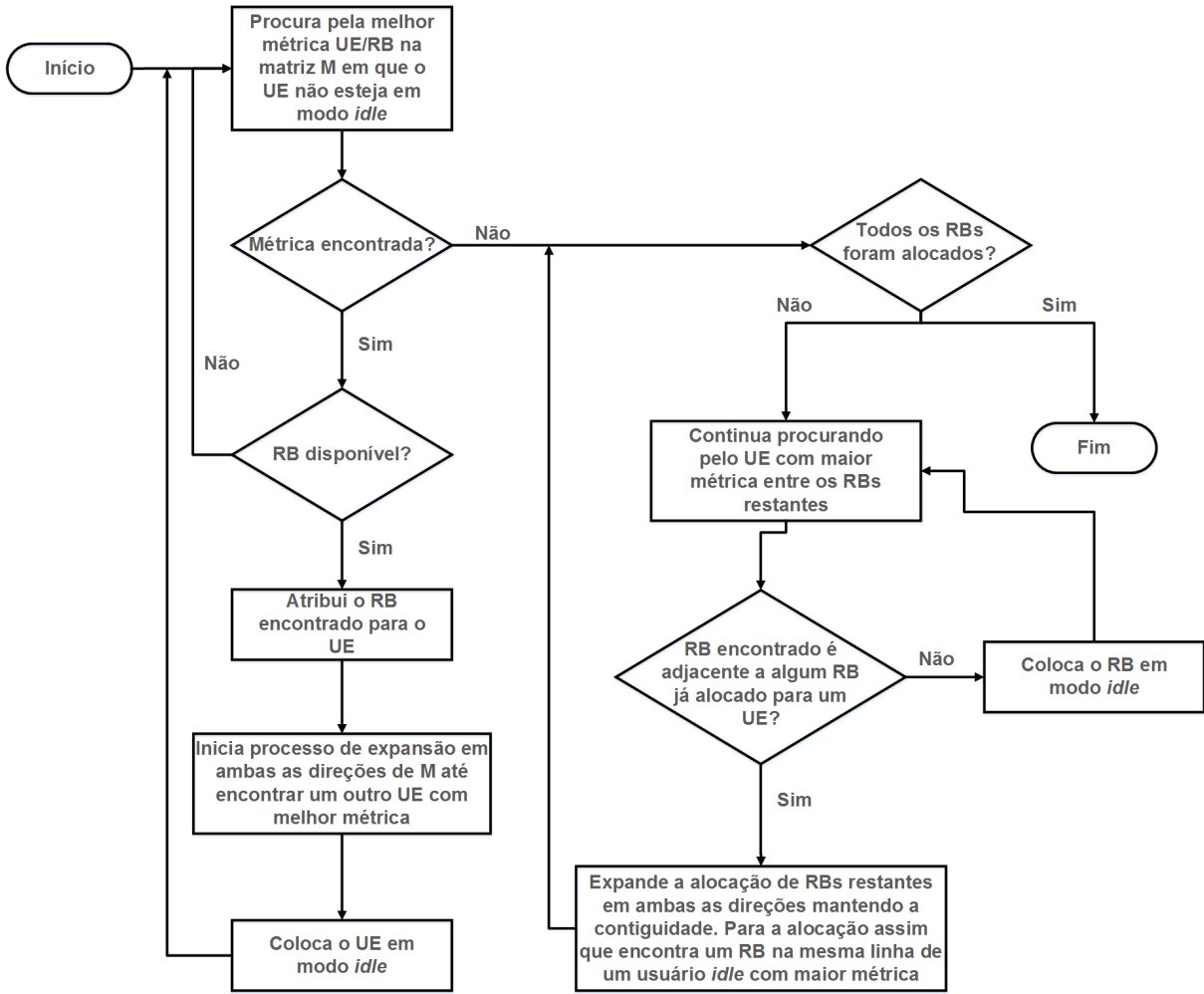


Figura 3.5: Algoritmo *Recursive Maximum Expansion*.

### 3.2.5 Minimum Area Difference (MAD)

O algoritmo de escalonamento MAD foi descrito em [50]. A ideia principal do MAD é alocar recursos para os vários usuários de forma que alcance uma diferença mínima entre suas métricas e o *envelope-metric*.

O *envelope-metric* representa um vetor contendo todas as métricas dos usuários em relação aos RBs disponíveis. Além disso, MAD agrupa diferentes RBs em *Resource Chunks*

(RC), que seriam quantidades de RBs contíguos pertencentes aos diferentes usuários com melhores condições em uma matriz  $M_{u,r}$ .

Dessa forma, o algoritmo trabalha com uma segunda matriz formada pela quantidade de UEs e RCs. Os valores alocados a tal matriz são formados pela diferença entre o *envelope-metric* e a métrica de um UE. Como o MAD utiliza RCs para combinar com as métricas da nova matriz, o algoritmo consegue diminuir um pouco a complexidade computacional e alcançar resultados satisfatórios.

A Figura 3.6 demonstra o algoritmo de escalonamento MAD.

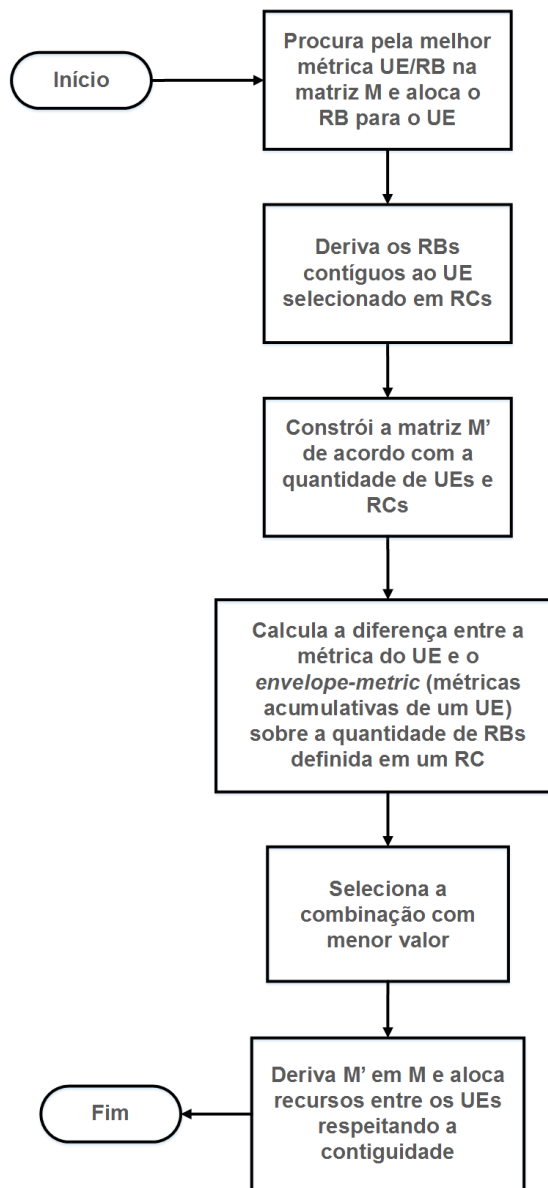


Figura 3.6: Algoritmo *Minimum Area Difference*.

### 3.2.6 Search-Tree Based Packet Scheduler (STB-PS)

O algoritmo de escalonamento *Search-Tree Based Packet Scheduler* (STB-PS) foi proposto em [52]. A ideia principal desse algoritmo é maximizar a métrica geral do sistema. Diferentemente dos algoritmos descritos anteriormente, o STB-PS não se atenta totalmente aos usuários com melhores condições e sim, com a eficiência no uso de todos os recursos disponíveis para alcançar uma melhor eficiência espectral.

O STB-PS também utiliza uma matriz de métricas  $M_{u,r}$ , porém ele constrói uma árvore binária com os valores encontrados na matriz com diferentes caminhos. Dessa forma, o algoritmo soma os diferentes caminhos atribuídos de UEs/RBs e verifica qual deles é o maior, assim maximizando a métrica global do sistema.

Com essas características, pode-se notar que o STB-PS nem sempre irá priorizar os usuários com valores maiores na matriz  $M_{u,r}$ , pois irá depender da soma global a definição da atribuição de recursos.

A Figura 3.7 apresenta o fluxograma do algoritmo de escalonamento STB-PS.

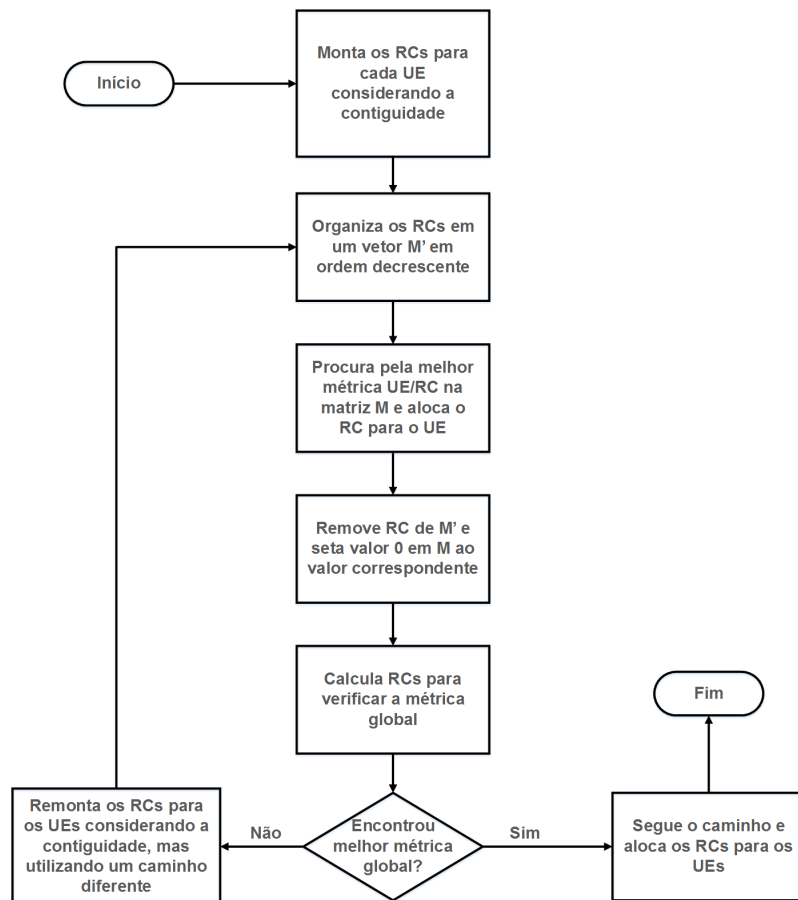


Figura 3.7: Algoritmo *Search-Tree Based Packet Scheduler*.

A Figura 3.8 ilustra um exemplo do processo anterior. A matriz apresentada na Tabela 3.2 mostra diferentes condições de canal para 3 UEs em uma célula com 3 RCs de forma simbólica.

Tabela 3.2: Matriz STB-PS

$UE/RC$	$RC_1$	$RC_2$	$RC_3$
$UE_1$	$M_{1,1}$	$M_{1,2}$	$M_{1,3}$
$UE_2$	$M_{2,1}$	$M_{2,2}$	$M_{2,3}$
$UE_3$	$M_{3,1}$	$M_{3,2}$	$M_{3,3}$

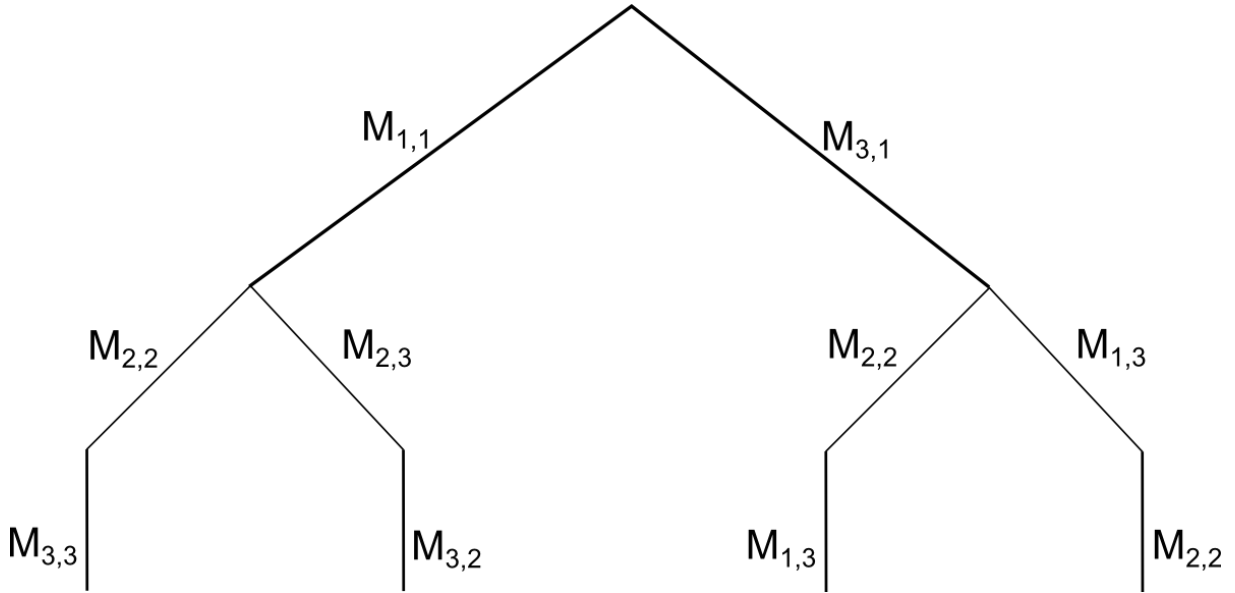


Figura 3.8: Ilustração de uma árvore utilizada no algoritmo STB-PS

### 3.2.7 *Riding Peaks*

O algoritmo de escalonamento *Riding Peaks* foi proposto em [12]. Este algoritmo surgiu da necessidade de melhorar o desempenho do algoritmo *Largest-Metric-Value-RB-First* também proposto em [12].

O algoritmo *Largest-Metric-Value-RB-First* aloca os RBs com melhores métricas primeiro, entretanto apresenta um problema: se um usuário  $u$  é um “candidato” a receber um  $RB_n$  (com valores altos de métrica) para transmitir, mas esse RB não é adjacente aos

RBs já alocados a este UE, ele não o irá recebê-lo para não quebrar a contiguidade no domínio da frequência.

Diante disso, o algoritmo *Riding Peaks* surge, principalmente, para solucionar tal problema. A ideia principal do algoritmo é agrupar os picos dos usuários, ou seja, os maiores valores de métricas em relação aos RBs serão mantidos juntos para cada UE. Dessa forma, assume-se que se um  $RB_n$  possui uma métrica alta, consequentemente,  $RB_{n-1}$  e  $RB_{n+1}$  possui valores próximos a essa métrica [17]. Assim, o algoritmo busca alocar os RBs mais altos mantendo a contiguidade necessária para o *uplink*.

A Figura 3.9 apresenta o fluxograma do algoritmo de escalonamento *Riding Peaks*.

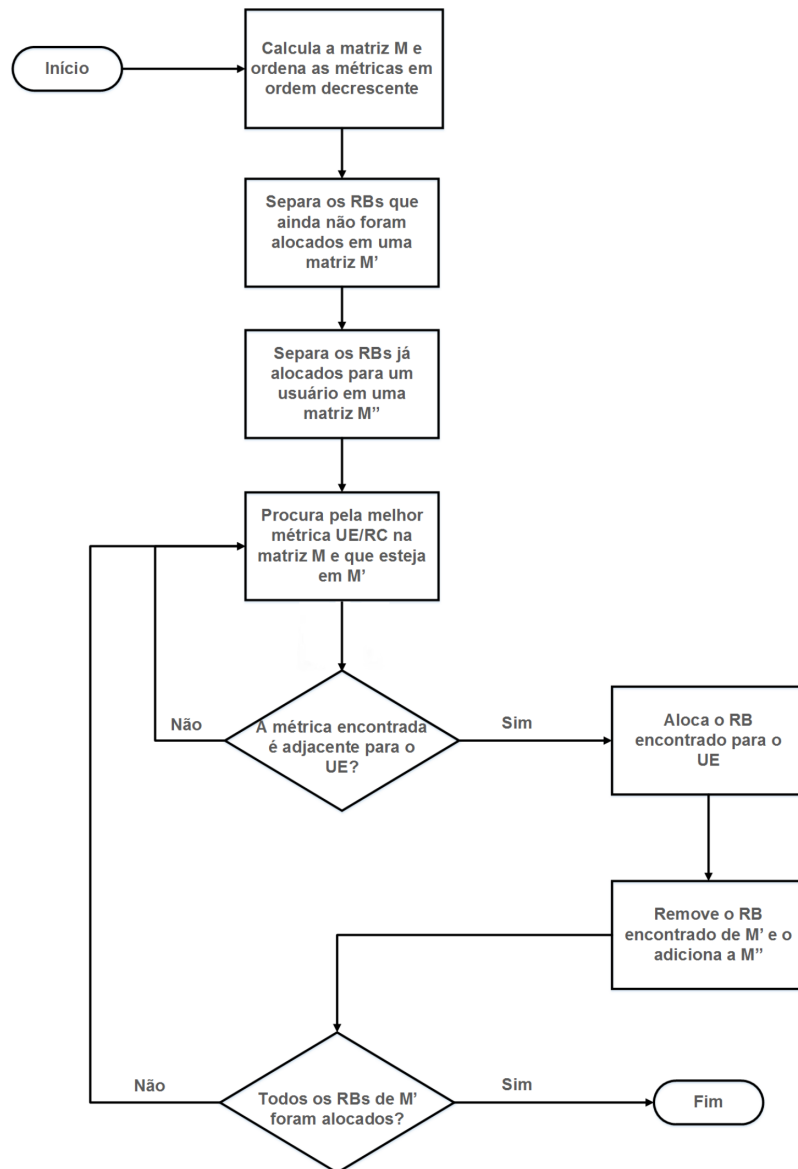


Figura 3.9: Algoritmo *Riding Peaks*.

### 3.3 Análise de Complexidade

A análise de complexidade dos algoritmos de escalonamento apresentados neste capítulo é baseada no número de iterações necessárias para executar uma busca em uma matriz de UEs/RBs.

Dessa forma, a complexidade dos algoritmos pode ser relacionada como uma função do número de usuários e recursos utilizados durante o processo de mapeamento e construção da matriz (UE/RB) no sistema.

O algoritmo RR possui uma complexidade de  $O(1)$  independente da quantidade de usuários e recursos. Com isso, é o único algoritmo que não possui uma relação com os parâmetros citados anteriormente.

A complexidade do algoritmo FME é estimada de acordo com o número de buscas na matriz  $M$  para encontrar o maior valor entre as combinações de UEs/RBs. Dessa forma, a busca inicial compreende em uma quantidade de comparações [50]:

$$N \cdot N_{RB} \quad (3.4)$$

onde  $N$  é a quantidade de usuários e  $N_{RB}$  a quantidade de recursos. Portanto uma busca sucessiva por toda a matriz ocorrerá em  $(N - 1)$  elementos, logo, terá executado um total de  $N \cdot (2N_{RB} - 1)$  operações. Com isso, a complexidade do algoritmo pode ser definida como [50]:

$$O(N \cdot N_{RB}) \quad (3.5)$$

A complexidade do algoritmo RME depende dos valores de métricas alcançados pelos usuários juntamente aos recursos no mapeamento da matriz  $M$ . Pois, se considerar o pior dos cenários, em que o algoritmo precise efetuar buscas recursivas para todos os usuários e que nenhum deles possa se expandir em nenhuma direção de seu valor máximo, o algoritmo executará um grande número de operações [4]:

$$\sum_{u=1}^N u \cdot (N_{RB} - (N - u)) \quad (3.6)$$

Após essas operações, o RME percorrerá  $(N_{RB} - N)$  elementos para encontrar o valor máximo entre os elementos restantes. Dessa forma, neste cenário bastante ruim, o algoritmo executa um total de operações [4]:

$$\sum_{u=1}^N u \cdot (N_{RB} - (N - u)) + \sum b = 1^{N_{RB}-N} N \cdot b \quad (3.7)$$

Resultando também em uma complexidade igual ao do algoritmo FME apresentada na Equação 3.5.

A complexidade do algoritmo MAD é menor (dependendo do cenário) por abordar RCs ao contrário dos outros algoritmos que utilizam RBs. Dessa forma, a complexidade pode ser definida [50]:

$$O(N_{RC}^{(N-1)}) \quad (3.8)$$

O algoritmo STB-PS apresenta uma complexidade variável de acordo com o valor de  $N_{out}$  que seriam as “ramificações” da árvore de métricas. O algoritmo apresenta ganhos maiores para um  $N_{out} = 1$  o que é um valor muito baixo, pois poderá operar com poucos recursos, nesse caso RCs. Como o algoritmo STB-PS busca uma maximização da métrica global, torna-se necessária a soma de todas as possibilidades de alocação possíveis [52].

Com um  $N_{out} = 1$  pode-se dizer que o algoritmo possui uma complexidade computacional parecida com a do algoritmo MAD, apresentada na Equação 3.8, por ambos operarem com RCs. Mas apresenta uma complexidade menor por não utilizar envelope de métricas para a diferença entre a matriz  $M$  e  $M'$  utilizada no MAD. Dessa forma:

$$O(N \cdot N_{RC}) \quad (3.9)$$

Para um  $N_{out} > 1$  o algoritmo precisa executar  $N \cdot N_{RC}(M^{N_{out}})$  operações para verificar todas as possibilidades de escalonamento. Com isso, pode-se dizer que o algoritmo STB-PS possui uma complexidade de:

$$O(N \cdot N_{RC})^{N_{out}} \quad (3.10)$$

A complexidade do algoritmo *Riding Peaks* é a mesma dos algoritmos FME e RME apresentada na Equação 3.5. O *Riding Peaks* opera em função da quantidade de usuários e, principalmente, pela quantidade de recursos, visto que sua recursividade ocorrerá até que todos os recursos sejam alocados ( $N_{RB} - N$ ).

A Tabela 3.3 apresenta a complexidade de cada algoritmo examinado.

Tabela 3.3: Análise de complexidade dos algoritmos examinados.

Algoritmo de escalonamento	Complexidade
RR	$O(1)$
FME	$O(N \cdot N_{RB})$
RME	$O(N \cdot N_{RB})$
MAD	$O(N_{RC}^{(N-1)})$
STB-PS	$O(N \cdot N_{RC})^{N_{out}}$
<i>Riding Peaks</i>	$O(N \cdot N_{RB})$

### 3.4 Considerações Finais

Neste capítulo, apresentou-se os principais aspectos com relação ao escalonamento no tráfego *uplink* em redes LTE. Foram abordadas as principais características do escalonador de pacotes encontrado na eNB, bem como o processo de adaptação do enlace para os diferentes usuários. Posteriormente, foram descritos os principais algoritmos de escalonamento encontrados na literatura destacando seus funcionamentos e abordagens em relação a alocação de recursos. Esses conceitos abordados são essenciais para fundamentar a proposta deste trabalho descrita no próximo capítulo.

# Capítulo 4

## Uma Proposta de Algoritmo de Escalonamento para o Tráfego *Uplink* em Redes LTE

### 4.1 Introdução

Como já mencionado no Capítulo 2, as redes LTE operam com uma arquitetura *all-IP*, ou seja, todos os serviços são comutados em pacotes. Dessa forma, ao alocar recursos aos usuários é necessário atentar-se aos requisitos de QoS de cada aplicação a fim de atender de forma eficiente aqueles mais rígidos, tipicamente dos serviços de tempo real.

O 3GPP não especifica qualquer técnica ou algoritmo de escalonamento para distribuir os recursos disponíveis nas redes LTE, deixando a cargo das empresas tomarem suas próprias decisões.

Diante disso, e com base na Tabela 2.3 apresentada no Capítulo 2, a qual apresenta e descreve as principais classes de serviços e suas características principais, este capítulo visa expor a proposta de um algoritmo de escalonamento para o tráfego *uplink* em redes LTE para prover uma alocação de recursos eficiente entre os usuários que necessitam de prioridade (serviços de tempo real) durante o escalonamento.

Assim, estrutura-se este capítulo da seguinte maneira: Na Seção 4.2 é descrito o problema e a motivação de pesquisa. Já a seção seguinte apresenta em detalhes a solução proposta (o algoritmo de escalonamento). E, na seção final, são apresentadas as considerações finais acerca do capítulo.

## 4.2 Descrição do Problema

Como já mencionado, o padrão 3GPP não especifica, além de outros mecanismos, qualquer técnica para escalonamento de pacotes ou alocação de recursos para as redes LTE. Dessa maneira, possibilita a elaboração de propostas por parte dos fabricantes de equipamentos de redes e também pela comunidade de pesquisadores. Essa é uma das principais motivações para a elaboração da proposta apresentada nessa dissertação.

Além disso, os principais algoritmos de escalonamento projetados para o tráfego *uplink* encontrados na literatura (como já apresentados no Capítulo 3) não priorizam os serviços de tempo real durante a alocação de recursos, o que se torna um obstáculo para as aplicações com requisitos de QoS rígidos.

Na maioria dos trabalhos, os algoritmos tratam com prioridade de escalonamento os usuários com melhores condições de sinal, pois buscam maximizar a eficiência da rede. Além desses, existem algoritmos que utilizam o paradigma de justiça entre os serviços a serem escalonados. Portanto, tais algoritmos também utilizam apenas as condições de sinal reportadas por cada usuário através do SRS para alocar RBs, fazendo uso de um histórico de utilização do enlace para proporcionar as mesmas chances de escalonamento entre os UEs. Dessa forma, torna-se necessário o desenvolvimento de mecanismos de escalonamento para atender os requisitos de QoS das aplicações de tempo real nas redes LTE.

## 4.3 Solução Proposta

Em razão da escassez de trabalhos que priorizam os serviços de tempo real durante o escalonamento no tráfego *uplink* nas redes LTE, neste trabalho propõe-se um algoritmo de escalonamento para suprir essa necessidade. O algoritmo proposto baseia-se nos requisitos de atraso máximo dispostos na Tabela 2.3 apresentada no Capítulo 2 e também em relação a vazão mínima necessária para os serviços de tempo real. Além disso, o algoritmo busca uma eficiência na alocação de recursos por se apoiar no mecanismo de contiguidade elaborado em [12].

### 4.3.1 Algoritmo de Escalonamento Proposto

A estratégia de escalonamento proposta baseia-se em um mecanismo que garanta uma vazão mínima e um atraso máximo limitado de acordo com cada serviço, priorizando os serviços de tempo real. Além disso, o algoritmo utiliza a contiguidade em sua heurística durante a alocação de recursos no domínio da frequência. Este é baseado no algoritmo *Riding Peaks*.

O esquema proposto baseia-se em tal algoritmo pelo fato deste apresentar um melhor desempenho em relação aos outros algoritmos encontrados na literatura no quesito vazão média da rede, como foi apresentado em [13]. Dessa forma, a solução proposta, além de priorizar os serviços sensíveis a QoS, busca maximizar a eficiência da rede e assim alcançar um melhor desempenho.

O algoritmo proposto opera nos dois domínios, tempo e frequência. No domínio do tempo é feita a seleção de usuários que poderão receber os recursos que serão alocados no domínio da frequência. Para isso, o esquema proposto verifica a prioridade de cada *request*  $u_{SR}$  entregue a eNB ao identificar o serviço que cada UE deseja transmitir. Essa identificação é feita através do BSR.

Após a identificação, a eNB verifica a possibilidade de atender esse usuário de forma que garanta os requisitos de QoS da aplicação, como é apresentado no Algoritmo 1.

Os valores de  $D_C^{max}$ , que se refere ao atraso máximo de acordo com o QCI, e  $T_C^{min}$ , que se refere a vazão mínima da classe de serviço, variam para cada tipo de aplicação. Dessa forma, como já mencionado, o algoritmo identifica o serviço e atualiza os parâmetros  $D_u^{max}$  e  $T_u^{min}$  para verificar se a eNB consegue atender de forma eficiente o UE. Se a eNB consegue garantir tais requisitos, o UE é adicionado ao conjunto de UEs que poderão ser alocados posteriormente.

Com o conjunto de usuários pré-selecionados para serem escalonados, o algoritmo proposto inicia o processo para construção da matriz  $M_{u,r}$ . Para tal, é feito o cálculo de uma função de utilidade para cada UE em relação a um RB:

$$M_{u,r} = (1 - a_c) \times \frac{T_u - T_c^{min}}{T_c^{min}} \times D_u \quad (4.1)$$

onde  $a_c$  é a prioridade da classe de serviço, variando entre 0,1 e 0,9 de acordo com a Tabela 2.3.  $T_u$  é a vazão máxima que o usuário pode alcançar de acordo com suas condições e  $T_c^{min}$  é a vazão mínima para garantir QoS para aplicação que o UE deseja

---

**Algoritmo 1** Verifica QoS dos Serviços

---

```

1:  $K_{UE} \leftarrow$  conjunto de usuários que desejam transmitir no próximo TTI
2:  $C \leftarrow$  conjunto de classes de serviços
3:  $a_c \leftarrow$  prioridade da classe de serviço
4: para todo  $u \in K_{UE}$  faça
5:     escolha ( $a_c \in u_{SR}$ )
6:     caso  $a_c \in C$  :
7:          $D_u^{max} \leftarrow D_C^{max}$ 
8:          $T_u^{min} \leftarrow T_C^{min}$ 
9:     fim caso
10:     $\vdots$ 
11:    fim escolha
12:    se  $D_u < D_u^{max} \ \&\& \ T_u > T_u^{min}$  então
13:         $U_{UE} \leftarrow u$  {Se a eNB consegue atender}
14:    fim se
15: fim para

```

---

transmitir. O  $D_u$  é o tempo em que o SR precisou para ser transmitido até a eNB. Este tempo é calculado a cada SR enviado.

O parâmetro  $T_u$  é calculado de acordo com o MCS correspondente do UE [53]. Dessa forma, com o valor do MCS é possível pesquisar um índice referente na tabela *Transport Block Size* (TBS). A Tabela 4.1 apresenta os índices MCS e TBS com base em [3]. A tabela TBS pode ser encontrada em [3].

Com isso, pode-se executar um cálculo simples para conhecer a vazão máxima  $T_u$  [53]:

$$T_u = A \times \delta_{TBS} \quad (4.2)$$

onde  $A$  é a quantidade de antenas utilizada pelo UE e  $\delta_{TBS}$  é o número de bits indexados ao MCS do usuário, no qual foi encontrado junto à tabela TBS.

Ainda no domínio do tempo, o algoritmo proposto insere um limitador para a quantidade de recursos que o usuário precisa enviar durante o tempo de transmissão baseado em [54].

O objetivo principal desse limitador é atender de acordo com a demanda de recursos

Tabela 4.1: Tabela de índices MCS e TBS baseada em [3]

Índice MCS	Ordem de Modulação	Índice TBS
0	2	0
1	2	1
2	2	2
3	2	3
4	2	1
5	2	1
6	2	1
7	2	1
8	2	1
9	2	1
10	2	10
11	4	10
12	4	11
13	4	12
14	4	13
15	4	14
16	4	15
17	4	16
18	4	17
19	4	18
20	4	19
21	6	19
⋮	⋮	⋮
28	6	26
29	reservado	reservado
reservado	reservado	reservado
31	reservado	reservado

dos UEs, pois, ocorrem situações em que um UE próximo à eNB precise transmitir poucos dados, mas durante o processo de alocação de recursos (por exemplo, no algoritmo RME e *Riding Peaks*), tal usuário consegue ter acesso a todos os RBs devido a sua boa condição de sinal. Dessa forma, provavelmente vários RBs serão desperdiçados, o que inibe a diversidade de usuários em um mesmo tempo de transmissão.

Dada essa situação, o algoritmo proposto impõe um limitador para que no caso do UE possuir valores altos na matriz UE/RB, ele consiga ter acesso apenas à quantidade de recursos necessários para atendê-lo e, com isso, aumentar a diversidade de usuários atendidos durante o TTI atual.

Para esse objetivo, o algoritmo proposto utiliza também os valores de vazão máxima obtidos através da Tabela TBS. Com isso pode-se definir  $Q_u^r$ , que se refere à quantidade aproximada de recursos necessários:

$$Q_u^r = (1 - a_c) \times \frac{T_c^{min}}{T_u} + a_c T_u \quad (4.3)$$

Com isso, o algoritmo que exemplifica todas as funções ocorrentes no domínio do tempo é apresentado no Algoritmo 2.

Já no domínio da frequência, o esquema proposto baseia-se no algoritmo *Riding Peaks*. Além de executar a contiguidade requerida no SC-FDMA, o algoritmo utiliza o  $Q_u^r$  ao distribuir recursos entre os serviços. Dessa forma, é verificado o tamanho total do *frame*  $F$  para que se dê prioridade à diversidade de UEs de acordo com os serviços que desejam transmitir.

Uma vez que, se o usuário precisa de um *frame* inteiro para transmitir, mas a classe de serviço é inferior (em relação a prioridade) as demais, terá que esperar pelo próximo TTI. Assim, evita que mesmo que vários UEs com diferentes serviços sejam designados a receber RBs, sempre atenda com prioridade aqueles que vão transmitir fluxos de aplicações em tempo real.

Após essas verificações, que podem ser visualizadas através das linhas 14 à 21 apresentadas no Algoritmo 3, o esquema proposto aloca os recursos de forma contígua como é apresentado no restante das linhas, baseadas no algoritmo *Riding Peaks*.

---

**Algoritmo 2** Algoritmo no domínio do tempo

---

```

1:  $K_{UE} \leftarrow$  conjunto de usuários que desejam transmitir no próximo TTI
2:  $C \leftarrow$  conjunto de classes de serviços
3:  $a_c \leftarrow$  prioridade da classe de serviço
4:  $TBS_u^{MCS} \leftarrow$  matriz com valores da Tabela TBS
5: para todo  $u \in K_{UE}$  faça
6:     escolha ( $a_c \in u_{SR}$ )
7:     caso  $a_c \in C$  :
8:          $D_u^{max} \leftarrow D_C^{max}$ 
9:          $T_u^{min} \leftarrow T_C^{min}$ 
10:    fim caso
11:     $\vdots$ 
12:    fim escolha
13:    se  $D_u < D_u^{max}$  &&  $T_u > T_u^{min}$  então
14:         $U_{UE} \leftarrow u$  {Se a eNB consegue atender}
15:    fim se
16: fim para
17: {Passos para construção da Matriz UE/RB}
18: para todo  $r \in R_{RB}$  faça
19:    para todo  $u \in U_{UE}$  faça
20:         $\delta_{TBS} \leftarrow MCS \in TBS_u^{MCS}$ 
21:         $T_u \leftarrow A \times \delta_{TBS}$ 
22:         $M_{u,r} = (1 - a_c) \times \frac{T_u - T_c^{min}}{T_c^{min}} \times D_u$ 
23:         $Q_u^r = (1 - a_c) \times \frac{T_c^{min}}{T_u} + a_c T_u$ 
24:    fim para
25: fim para

```

---

Um exemplo de uma matriz de UEs/RBs utilizada para alocação de recursos para 10 UEs é ilustrado na Tabela 4.2. Essa matriz é construída durante a execução da primeira parte do algoritmo, onde aplica-se as funções de utilidade e assim consegue-se verificar a prioridade dos serviços para a distribuição de recursos que ocorrerá no domínio da frequência.

---

**Algoritmo 3** Algoritmo no domínio da frequência

---

```

1:  $B \leftarrow$  conjunto de RBs ordenados em ordem decrescente
2:  $R_{RB} \leftarrow$  conjunto de RBs não alocados
3:  $U_{UE} \leftarrow$  conjunto de UEs não escalonados
4:  $Q_u^r \leftarrow$  quantidade de recursos necessários
5:  $F \leftarrow$  tamanho total do frame
6:  $I \leftarrow$  RBs alocados ao usuário  $u$ 
7: enquanto ( $R_{RB} \neq \emptyset$ ) && ( $U_{UE} \neq \emptyset$ ) faça
8:     {Encontra a melhor métrica em  $M_{u,r}$  }
9:     se ! $R_{RB}$  então
10:         se ( $r < M_{u,r}$ ) && ( $M_{u,r} > 0$ ) então
11:              $r \leftarrow M_{u,r}$ 
12:         fim se
13:     fim se
14:     se ( $Q_u^r < F$  &&  $a_c \in C < C_{U-1}$ ) || ( $Q_u^r == F$  &&  $a_c \in C > C_{U-1}$ ) então
15:         {Um RB é alocado para o UE}
16:          $U_{UE} \leftarrow U_{UE} \setminus \{u\}$ ,  $R_{RB} \leftarrow R_{RB} \setminus \{r\}$ 
17:          $M(u, r) \leftarrow 0$ 
18:          $I \leftarrow r$ 
19:     senão
20:          $\{u\} \rightarrow U_{UE}$ 
21:     fim se
22:     {Assim  $r_r \leftarrow r + 1$ }
23:     enquanto  $M(u, r_r) == \max(B)$  &&  $r_r \leq B$  faça
24:         se ( $r_r$  é adjacente a  $I$ ) || ( $I == \emptyset$ ) então
25:              $R_{RB} \leftarrow R_{RB} \setminus \{r_r\}$ 
26:              $I \leftarrow r_r$ ,  $B \setminus r_r$ ,  $r_r \leftarrow r_r + 1$ 
27:         fim se
28:     fim enquanto
29:      $U_{UE} \leftarrow U_{UE} \setminus \{u\}$ ,  $R_{RB} \leftarrow R_{RB} \setminus \{r\}$ 
30: fim enquanto

```

---

Tabela 4.2: Exemplo: Matriz de UEs/RBs para 10 UEs

UE	Prioridade	Métrica de Prioridade	MCS	$Q_u^r$	$RB_1$	$RB_2$	$RB_3$	$RB_4$	$RB_5$	$RB_6$	...
1	2	0,8	8	3	0,00399295	0,00399169	0,00399012	0,00397919	0,00397124	0,00399012	...
2	5	0,5	14	4	0,00099684	0,00099752	0,00099752	0,00099823	0,00099873	0,00098915	...
3	9	0,1	8	7	0,0756678	0,0757969	0,0754783	0,0754783	0,0756678	0,0756678	...
4	2	0,8	8	1	0,00918699	0,00950739	0,0088764	0,00950739	0,00950739	0,00967532	...
5	2	0,8	26	2	0,00095073	0,00095073	0,00093710	0,00083050	0,00091869	0,0008876	...
6	9	0,1	10	2	3,98397	4,0815	4,08508	4,06853	4,08787	3,98397	...
7	5	0,5	12	2	0,0159356	0,0159668	0,0159718	0,0159356	0,0159605	0,0159718	...
8	2	0,8	20	6	0,00698545	0,00698545	0,00699115	0,00698965	0,0069827	0,00698766	...
9	9	0,1	24	7	0,260711	0,26067	0,26067	0,26054	0,260711	0,260614	...
10	9	0,1	8	10	1,69613	1,70146	1,70146	1,70146	1,70199	1,69962	...

## 4.4 Análise de Complexidade do Algoritmo Proposto

Como já visto, o algoritmo proposto opera tanto no domínio do tempo quanto na frequência, dessa forma sua complexidade tende a ser um pouco maior em relação ao *Riding Peaks*.

O algoritmo proposto inicialmente opera sobre um vetor de usuários para questões de priorização e verifica a disponibilidade de recursos diante da prioridade de cada um. Dessa forma executa:

$$c_1 + \max(c_2 \cdots c_{10}) + c_{11} \quad (4.4)$$

onde cada variável  $c_n$  corresponde às instruções e/ou entradas do algoritmo. Com isso, nota-se uma linearidade  $N$  do algoritmo durante sua primeira fase no domínio do tempo.

Para a fase seguinte, o algoritmo percorre um vetor de usuários e recursos com a finalidade de aplicar a função de utilidade definida, e assim, montar a matriz de UEs/RBs que será utilizada durante o processo de alocação de recursos. Assim, tem-se uma complexidade quadrática  $N^2$  variando de acordo com a quantidade de entradas.

Já no processo de distribuição de recursos, o algoritmo executa uma busca na matriz semelhante ao algoritmo *Riding Peaks* onde há uma ordenação dos recursos para aplicar a contiguidade, posteriormente. Dessa forma, pode-se dizer que no domínio da frequência a complexidade se define de acordo com a quantidade de UEs e RBs ( $N \cdot N_{RB}$ ).

Portanto, considera-se que o algoritmo proposto possui uma complexidade de:

$$O(2N^2 \cdot N_{RB}) \quad (4.5)$$

Essa complexidade pode variar de acordo com as entradas no algoritmo (quantidade de UEs e RBs), assim como ocorre com os outros algoritmos mencionados no Capítulo 3, o que implica em uma maior complexidade durante a execução das sub-rotinas. Mas, nota-se uma complexidade pouco superior a esses algoritmos, uma vez que não empregam QoS em suas heurísticas.

## 4.5 Considerações Finais

Diante o problema de pesquisa apresentado na Seção 4.2, este capítulo apresentou uma proposta de algoritmo de escalonamento para a provisão de QoS no tráfego *uplink* das

redes LTE. O esquema proposto é baseado no algoritmo *Riding Peaks* e foi desenvolvido para prover prioridade de escalonamento para os serviços de tempo real, ao mesmo tempo em que mantém a contiguidade necessária para o enlace *uplink*.

# Capítulo 5

## Avaliação de Desempenho do Algoritmo de Escalonamento Proposto

### 5.1 Introdução

Neste capítulo, avalia-se por meio de modelagem e simulação, o algoritmo de escalonamento proposto para a provisão de QoS a aplicações típicas de tempo real apresentado no Capítulo 4. Para isso, o esquema proposto é avaliado de acordo com as principais classes de serviços especificadas pelo 3GPP, considerando cenários de redes tipicamente urbanos.

Com isso, a Seção 5.2 descreve as ferramentas e os ambientes de rede utilizados nas simulações computacionais. Na Seção 5.3 é apresentada uma análise dos resultados obtidos e a seção seguinte traz as considerações finais sobre este capítulo.

### 5.2 Modelagem e Simulação

#### 5.2.1 Ferramenta de Simulação

A análise de desempenho do algoritmo de escalonamento proposto no Capítulo 4 foi realizada através da ferramenta de simulação LTE-Sim versão 5 [55].

O LTE-Sim é um simulador de eventos escrito na linguagem C++ (*open source*, sob a licença GPLv3 [56]) utilizando o paradigma orientado a objetos. É um simulador multi-plataforma, ou seja, é suportado pelos principais sistemas operacionais existentes, o que facilita o desenvolvimento do trabalho.

Esta ferramenta foi criada exclusivamente para simular redes LTE e prover uma verificação completa do desempenho do sistema. O simulador suporta três tipos de nós principais:

- Usuários (UEs);
- Estações-base (eNBs);
- Entidade MME e *Gateway* (MME/GW).

Além disso, suporta quatro componentes principais:

- *Simulator*;
- *Network Manager*;
- *Flows Manager*;
- *Frame Manager*.

Para cada um desses, o LTE-Sim dedica uma classe exclusiva. Dessa forma, apenas um objeto de cada componente é criado durante as simulações, o que evita um crescimento da complexidade computacional no decorrer dos eventos.

Para o desenvolvimento e avaliação do esquema proposto, foi necessário incorporar ao LTE-Sim algumas funcionalidades no sentido *uplink*:

- Identificação do serviço que cada UE deseja enviar por meio do SR e BSR;
- Algoritmos de escalonamento utilizados para comparação com os resultados obtidos através do algoritmo proposto:
  - RME;
  - *Riding Peaks* (foi utilizado como base para a proposta).
- Implementação da Tabela de índices MCS/TBS e de um método de pesquisa para a Tabela TBS utilizada no *uplink*, visto que essa funcionalidade é ofertada apenas para o *downlink* na versão do simulador utilizada neste trabalho.

Embora tenha ocorrido a necessidade de tais modificações, o LTE-Sim foi escolhido para este trabalho pelo fato de ser um ambiente focado apenas na tecnologia LTE e também pela equipe de desenvolvedores que está ativa e mantém um fórum de discussão sobre o simulador atualizado.

### 5.2.2 Ambiente e Parâmetros de Simulação

Os cenários considerados nas simulações envolveram uma eNB e vários UEs inseridos na rede sucessivamente, em um certo intervalo de tempo. Os UEs são distribuídos na área de cobertura da célula de forma aleatória, com uma distância máxima permitida entre um UE e a eNB de 500 metros.

A Figura 5.1 apresenta o cenário geral considerado nas simulações.

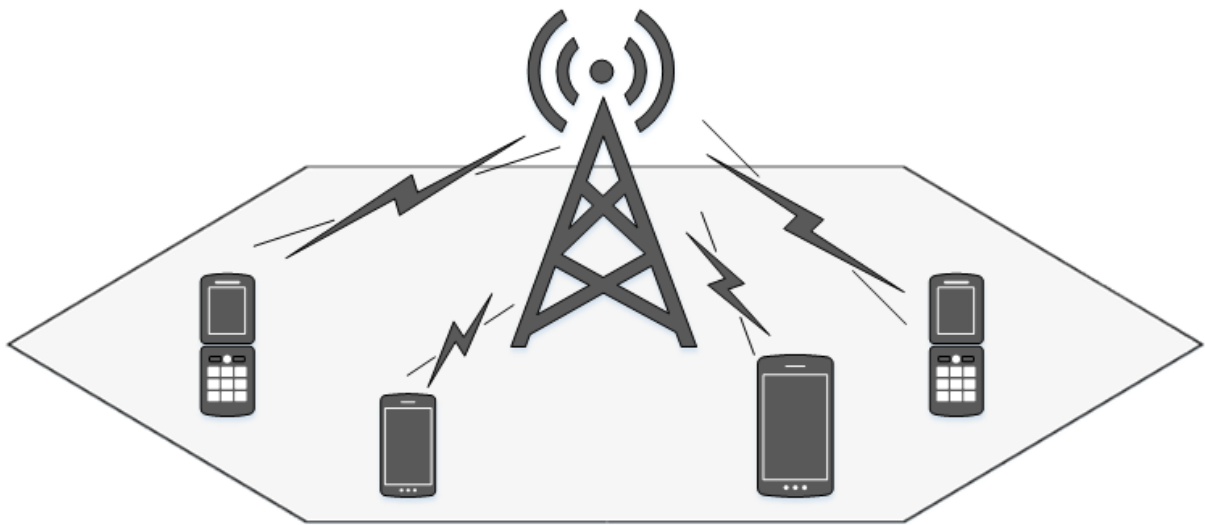


Figura 5.1: Topologia utilizada nas simulações através do LTE-Sim.

É considerado que cada usuário está equipado com uma antena de transmissão, enquanto que a eNB possui duas antenas para recepção (*Single Input, Multiple Output - SIMO*).

O *Radio Admission Control* (RAC) não foi considerado, uma vez que o foco do trabalho é a avaliação do desempenho dos algoritmos de escalonamento no tráfego *uplink*. Todos os usuários são criados no início das simulações e são adicionados durante a execução.

As simulações realizadas consideraram uma conexão por UE. O restante dos parâmetros utilizados durante as simulações podem ser encontrados na Tabela 5.1. Esses parâmetros foram escolhidos em razão de serem utilizados na maioria dos trabalhos encontrados na literatura, como por exemplo [5, 12, 13, 15].

Tabela 5.1: Parâmetros utilizados nas simulações

Parâmetros	Valores
Duração da simulação	10000 TTIs
Duração do TTI	1 ms
Número de RBs	25
Largura de banda	5 MHz
<i>Subcarrier spacing</i>	15 kHz
Potência de transmissão da eNB	43 dBm
Esquema de reuso de frequência	4 <i>clusters</i>
Modelo de propagação	modelo urbano <i>macro-cell</i>
Célula	raio de 0,5 Km
<i>Layout</i> da célula	<i>Single-Cell</i> com antena omnidirecional
Mobilidade	<i>random way-point</i>
Velocidade máxima do UE	30 Km/h
Número de UEs na célula	80
Capacidade máxima de acessos simultâneos	200
Potência máxima de transmissão do UE	25 dBm
Tráfego de tempo real	Vídeo, VoIP
Tráfego de <i>background</i>	Web

Os tráfegos que foram utilizados nas simulações são:

- VoIP;
- Vídeo;
- Web (utilizado como tráfego de *background*).

Para a aplicação de voz sobre IP (VoIP), o simulador gera fluxos baseados no padrão G.729. Diante disso, os fluxos VoIP foram modelados através da Cadeia de Markov em períodos *ON/OFF*. O período *ON* tem duração distribuída exponencialmente com valor médio de 3 s e envia pacotes de 20 bytes a cada 20 ms. Já para o período *OFF* segue

uma distribuição exponencial truncada com um limite superior de 6,9 s e o mesmo valor médio do período  $ON$ , porém não é enviado nenhum pacote [55].

Para a aplicação de vídeo, o simulador transmite um *streaming* de vídeo a uma taxa variável de no máximo 1 Mbps. É utilizado o UDP como protocolo na camada de transporte.

A modelagem de aplicação Web segue a distribuição de Pareto [57] com taxa máxima de até 1 Mbps e protocolo TCP para camada de transporte.

A Tabela 5.2 traz um resumo dos principais parâmetros utilizados na modelagem das aplicações.

Tabela 5.2: Parâmetros das aplicações baseado em [4]

Tráfego	Tipo do Tráfego	QCI	Prioridade	Tipo	GBR (kbps)	MBR (kbps)
VoIP	Conversacional	1	2	GBR	12,2	64
Vídeo	<i>Streaming</i>	2	4	GBR	64	512
Web	<i>Background</i>	9	9	non-GBR	10	1024

### 5.3 Resultados Experimentais

Os resultados apresentados a seguir referem-se a cinco execuções para cada cenário individual, com o objetivo de produzir um intervalo de confiança de 95%.

Em todos os cenários considerou-se a entrada periódica de UEs, com uma adição de 10 usuários a cada rodada de escalonamento até um limite máximo de 80, em um ambiente com diferentes tráfegos. Os usuários são distribuídos de forma aleatória na área de cobertura da célula.

Os parâmetros avaliados em cada cenário foram:

- Vazão média;
- Índice de justiça;
- Atraso médio.

Para a avaliação dos resultados obtidos, a proposta apresentada neste trabalho foi comparada aos algoritmos disponíveis no simulador LTE-Sim, as técnicas RR e FME. Além destes, como já mencionado, foram implementados os algoritmos RME e o algoritmo proposto (este baseado no algoritmo *Riding Peaks*). Os demais algoritmos apresentados no Capítulo 3 não foram implementados devido ao fato da complexidade de suas heurísticas.

### 5.3.1 Avaliação do Escalonador Proposto para o Tráfego VoIP

Nesta seção, analisa-se o desempenho do algoritmo de escalonamento proposto considerando o tráfego VoIP em um ambiente com múltiplos serviços.

Neste experimento, os UEs com conexões VoIP, Vídeo e Web se registram na rede durante a simulação. O tráfego de *background* Web gera fluxos em torno de 1 Mbps. A carga de tráfego foi dividida na proporção apresentada na Tabela 5.3, seguindo o modelo sugerido em [5], por este forçar o sistema a ter uma quantidade de disputas por recursos maior entre aplicações de tempo real e não tempo real.

Tabela 5.3: Distribuição do tráfego baseado em [5]

Serviços	Distribuição
VoIP	50%
Vídeo	10%
Tráfego de <i>background</i>	40%

Os resultados apresentados na Figura 5.2 mostram a vazão média alcançada com os algoritmos de escalonamento de acordo com a distribuição de tráfego sugerida na Tabela 5.3 para o VoIP.

Como mencionado no Capítulo 3, os algoritmos de escalonamento apresentados buscam maximizar a eficiência da alocação de recursos no domínio da frequência ao distribuir os melhores RBs aos UEs com melhores condições de canal, respeitando a contiguidade do canal SC-FDMA. A utilização da função de utilidade visando esse objetivo apresenta um resultado superior e significativo ao ser comparado com o algoritmo proposto.

O algoritmo FME atinge um alto desempenho com essa função de utilidade voltada para as condições de canal dos UEs, devido a sua complexidade reduzida e capacidade de

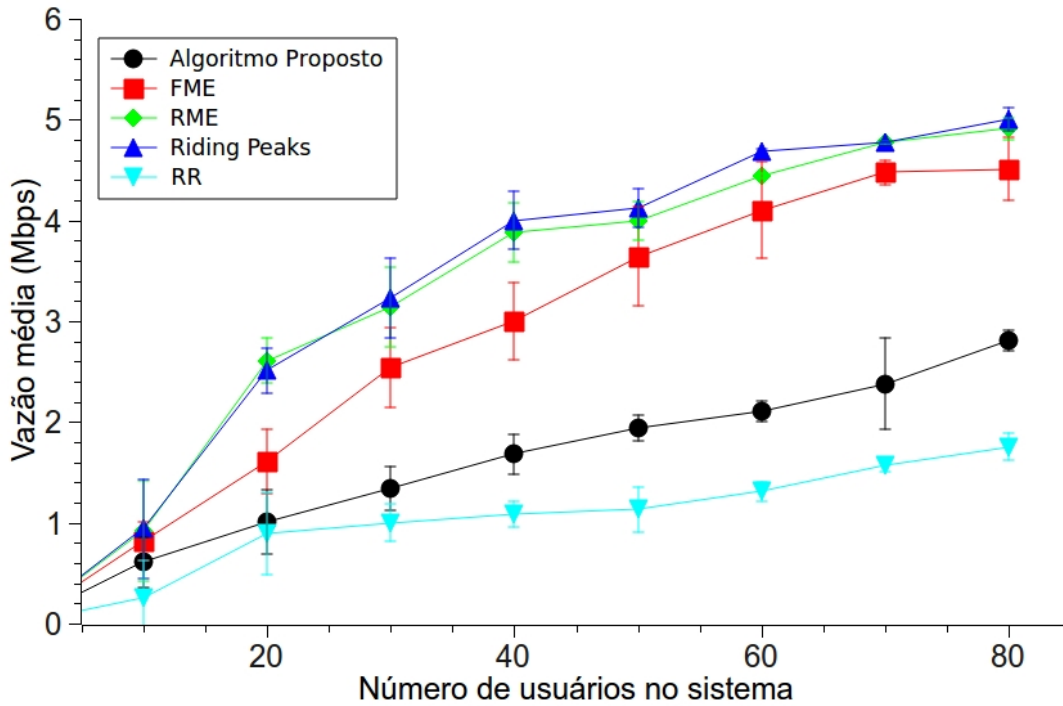


Figura 5.2: Vazão média em função da quantidade de usuários para o tráfego VoIP utilizando uma distribuição 50/10/40.

distribuir os recursos de forma contígua.

O algoritmo RME atinge um desempenho ainda maior que o FME, pelo fato de sua alocação ser dinâmica ao utilizar a recursividade. O esquema de alocação do RME não possui limites no quesito quantidade máxima de RBs que serão alocados para cada UE. Dessa forma, ao encontrar uma métrica alta, o RME irá maximizar o UE que possuir os vizinhos com melhores valores, o que pode diminuir a diversidade de usuários que receberão RBs em um mesmo TTI.

O algoritmo *Riding Peaks* apresenta um desempenho pouco maior que o algoritmo RME. Este resultado era esperado pelo fato deste mecanismo buscar sempre os valores mais altos (picos) de métricas de cada UE/RB.

O algoritmo RR atinge um desempenho inferior. Isto ocorre, pois o RR aloca recursos para cada tipo de serviço mesmo sem prover QoS por padrão.

Conforme mostrado na Figura 5.2, o algoritmo proposto atinge um desempenho inferior aos algoritmos FME, RME e *Riding Peaks*, apresentando uma superioridade em relação ao RR. Esse comportamento ocorre pelo fato do mecanismo proposto não priorizar os UEs com melhores condições de canal, mas sim os UEs com serviços de prioridade alta

disputando recursos em um mesmo TTI. Com isso, um usuário que possui um MCS menor pode ter mais recursos alocados do que um usuário que está próximo à eNB, mas os dados a serem enviados possuem prioridades baixas. Portanto, o algoritmo proposto mantém uma vazão mínima por usuário para o VoIP e, dessa forma, garante tal requisito de QoS para esse tipo de aplicação.

Os resultados apresentados na Figura 5.3 apresentam os índices de justiça alcançados pelos algoritmos de escalonamento no tráfego VoIP.

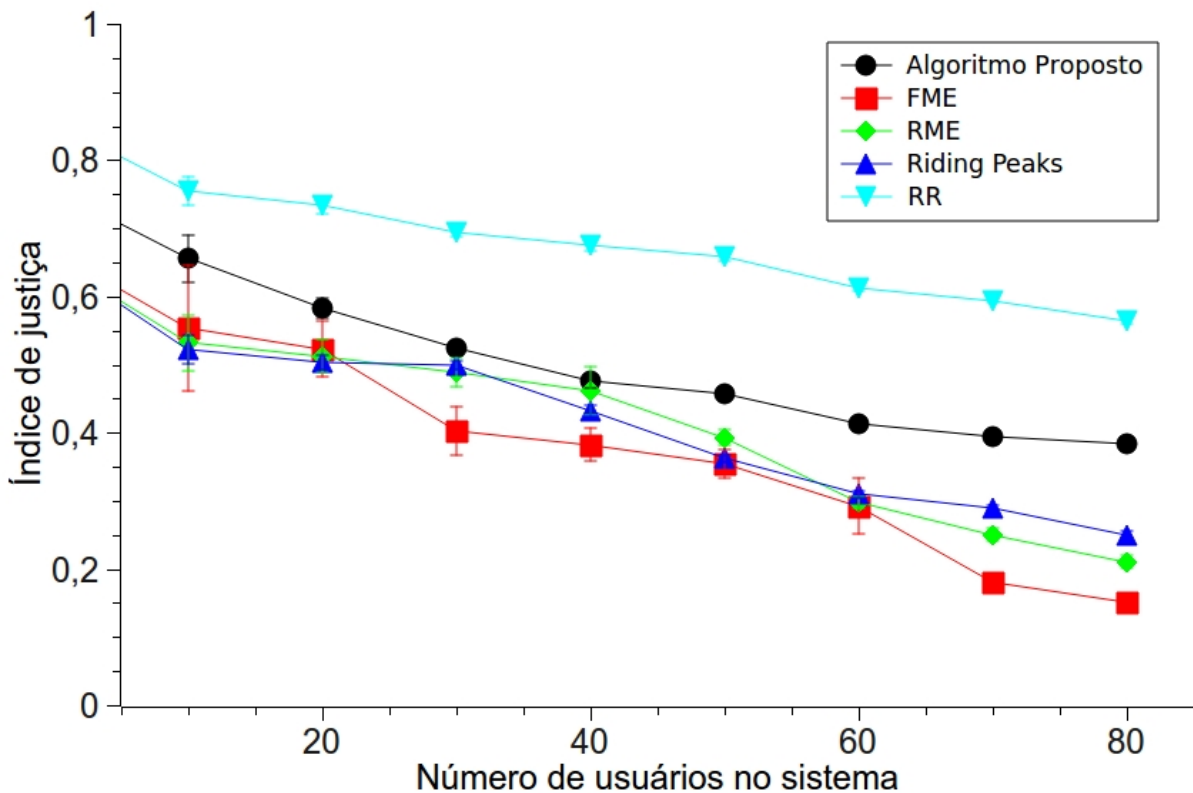


Figura 5.3: Índice de justiça em função da quantidade de usuários para o tráfego VoIP utilizando uma distribuição 50/10/40.

Como é possível notar, os algoritmos alcançam resultados ruins pelo fato de tais mecanismos não priorizarem a justiça entre os UEs.

O número de UEs cresce durante o tempo de simulação e, assim, mais usuários poderão estar posicionados próximos à eNB. Dessa forma, as chances de tais UEs possuírem um MCS maior aumentam a probabilidade de terem mais recursos alocados. Entretanto, devido ao aumento da quantidade de usuários distribuídos aleatoriamente sob a cobertura da célula, aumentam-se também os riscos de terem UEs próximos à borda da rede, o que

fará com que eles possuam menos probabilidade de serem atendidos e terão que disputar recursos por mais TTIs.

O algoritmo RR apresenta resultados um pouco melhores em relação aos demais, mas este não inclui um método para prover contiguidade o que impõe um desempenho inferior em outros requisitos ao compará-lo com os outros algoritmos.

Os algoritmos FME, RME e *Riding Peaks* atendem com prioridade os UEs que estão mais próximos a eNB e, dessa forma, apresentam baixos índices de justiça.

O algoritmo proposto atinge valores medianos por utilizar o MCS do usuário em conjunto com a vazão do serviço em sua função de utilidade. Dessa forma, impõe a usuários que tenham prioridade de escalonamento por desejarem transmitir dados com QoS rígidos, mas que estão na borda da rede, a terem uma probabilidade aproximada de escalonamento com usuários que estão próximos à eNB e que possuem dados para transmitir com prioridade menor.

Entretanto, o mecanismo proposto não alcança melhores resultados por atender a contiguidade necessária no SC-FDMA e, também, por não utilizar nenhum histórico de utilização do enlace dos UEs. Assim, todas as decisões levam em conta apenas os parâmetros reportados em cada TTI.

O gráfico da Figura 5.4 apresentam o atraso médio atingido pelos algoritmos de escalonamento nesse cenário.

Pode-se notar que o algoritmo proposto apresenta um atraso médio baixo para o tráfego VoIP, garantindo assim um atraso máximo limitado, atendendo, portanto, ao requisito de QoS exigido. O mecanismo proposto alcança tal resultado devido à sua atuação ao priorizar aplicações de tempo real durante o escalonamento. Essa priorização segue as classes definidas pelo 3GPP apresentadas na Tabela 2.3 do Capítulo 2.

Os algoritmos restantes alcançam um atraso maior por não apresentarem tal priorização de classes de aplicações.

### 5.3.2 Avaliação do Escalonador Proposto para o Tráfego de Vídeo

Neste experimento de simulação, procurou-se comparar o algoritmo proposto com outros algoritmos em relação ao tráfego de vídeo.

Para isso, utilizou-se os mesmos parâmetros apresentados durante as simulações do tráfego VoIP, ou seja, UEs com conexões VoIP e Vídeo se registram na rede durante o

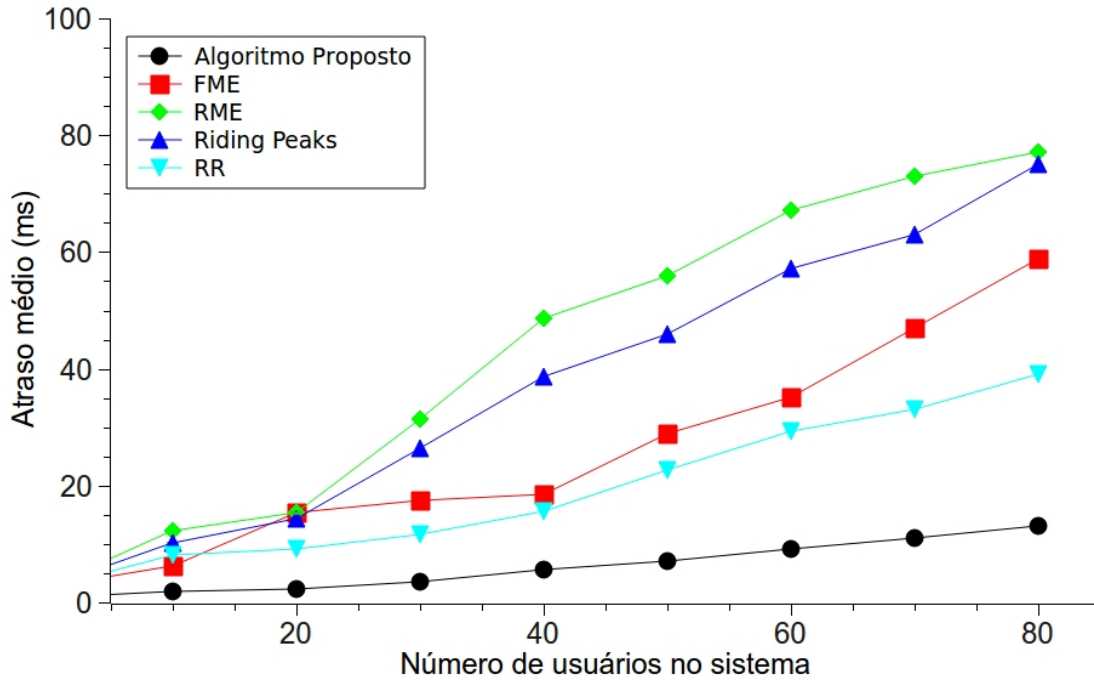


Figura 5.4: Atraso médio em função da quantidade de usuários para o tráfego VoIP utilizando uma distribuição 50/10/40.

tempo de simulação. O tráfego médio de *background* Web é de 1 Mbps. Neste caso, a carga de tráfego foi dividida também na proporção apresentada na Tabela 5.3.

Conforme identificado no gráfico da Figura 5.5, percebe-se que os desempenhos dos algoritmos FME, RME e *Riding Peaks* são próximos por possuírem heurísticas parecidas. É possível notar um desempenho razoável para o algoritmo RR. Este fato ocorre pois o algoritmo RR tem uma grande capacidade de atender a vários tipos de tráfegos, visto que realiza o escalonamento segundo o esquema “mesa redonda”.

O algoritmo proposto alcança bons resultados, visto que o principal objetivo do mecanismo proposto é garantir uma vazão mínima apropriada para as aplicações de tempo real.

Os resultados apresentados na Figura 5.6 apresentam os índices de justiça alcançados pelos algoritmos de escalonamento no tráfego de vídeo.

Como pode-se notar, os algoritmos alcançam resultados não satisfatórios pelo fato de tais mecanismos não priorizarem a justiça entre os UEs. Nota-se também, resultados ainda menores que os alcançados no tráfego VoIP. Isto ocorre pelo fato de que no tráfego VoIP os UEs requisitam poucos recursos, pois os dados a serem enviados são porções bem

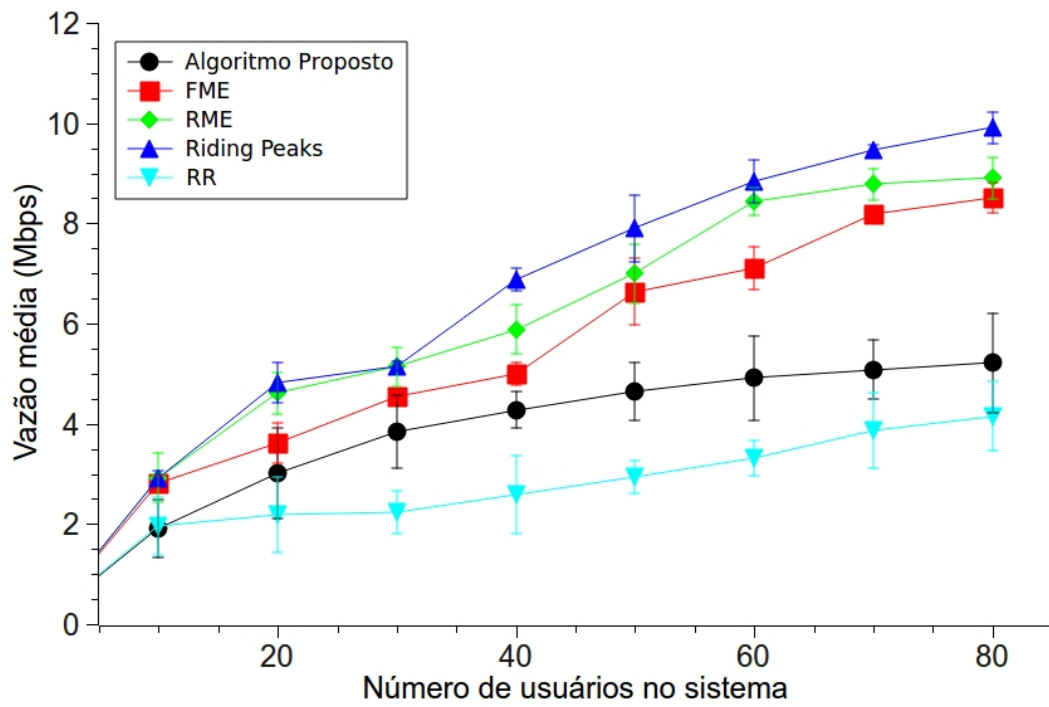


Figura 5.5: Vazão média em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo utilizando uma distribuição 50/10/40.

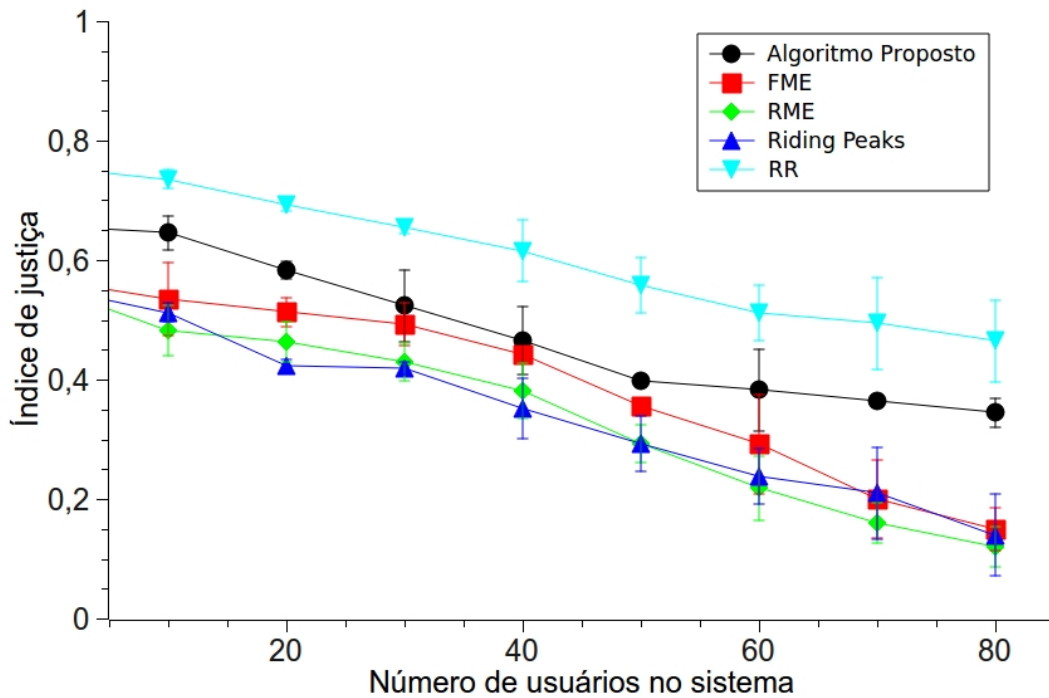


Figura 5.6: Índice de justiça em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo utilizando uma distribuição 50/10/40.

menores se comparados a quantidade de dados que normalmente são enviados durante uma transmissão de vídeo. Dessa forma, a probabilidade de UEs com tráfego VoIP serem atendidos é maior, o que acarreta em um índice de justiça um pouco maior para esse tipo de aplicação.

Os resultados apresentados na Figura 5.7 apresentam os atrasos médios alcançados pelos algoritmos simulados. As curvas do gráfico acima apresentam um atraso médio baixo ao utilizar o algoritmo proposto, visto que ele prioriza os fluxos de tempo real durante seu processo de alocação, de forma contrária aos outros algoritmos simulados.

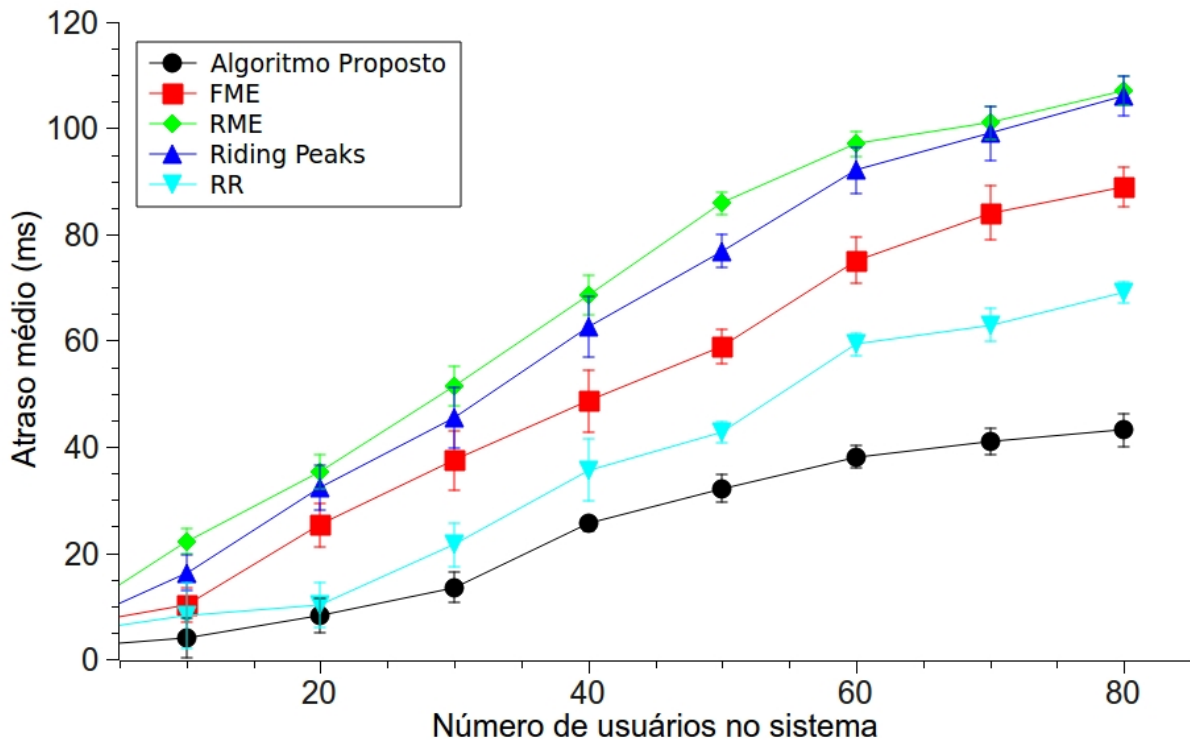


Figura 5.7: Atraso médio em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo utilizando uma distribuição 50/10/40.

### 5.3.3 Avaliação do Escalonador Proposto para o Tráfego Web

Nesta seção apresenta-se e analisa-se os resultados de simulação alcançados pelo algoritmo proposto e os outros algoritmos em relação ao tráfego Web.

A classe Web adotada segue a distribuição de Pareto já definida na Seção 5.2.2.

Durante as simulações, para esse tipo de aplicação, utilizou-se os mesmos parâmetros apresentados durante as simulações dos tráfegos VoIP e Vídeo. A carga inicial de tráfego

foi dividida na proporção apresentada na Tabela 5.3.

Os resultados apresentados na Figura 5.8 mostram a vazão média em função da quantidade de usuários no sistema alcançada com os algoritmos de escalonamento.

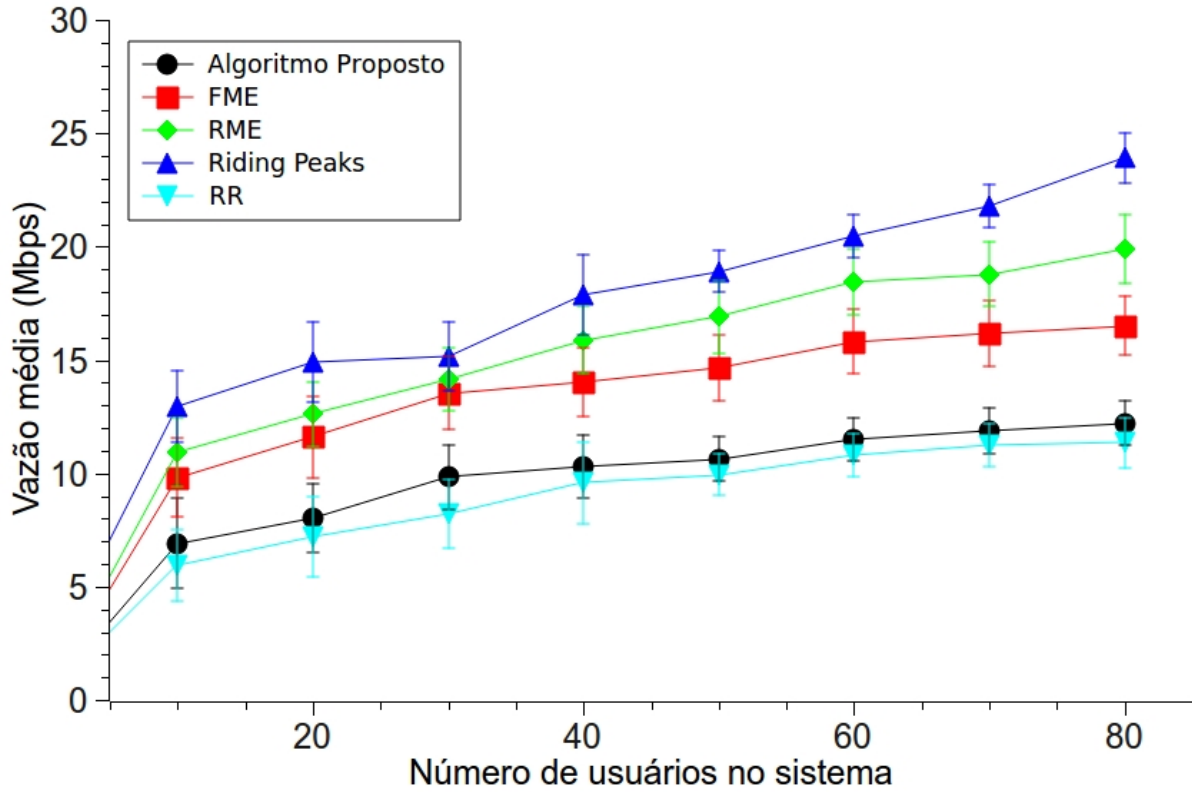


Figura 5.8: Vazão média em função da quantidade de usuários para o tráfego Web utilizando uma distribuição 50/10/40.

Os algoritmos FME, RME e *Riding Peaks* alcançam valores altos de vazão para esse tipo de aplicação, visto a quantidade de usuários transmitindo esse tipo de dado, o que pode proporcionar que usuários próximos a eNB tenham uma grande probabilidade de estarem transmitindo com taxas superiores.

O algoritmo proposto não alcança taxas altas para esse tipo de tráfego em relação aos outros algoritmos, pois não há prioridade de escalonamento para o tráfego Web. Dessa forma, o tráfego Web é atendido apenas se houver recursos extras em relação aos requeridos pelas outras classes de serviços.

As curvas do gráfico para o tráfego Web apresentadas na Figura 5.9 apresentam os índices de justiça alcançados pelos escalonadores. Nota-se novamente um índice maior para o algoritmo RR. O algoritmo proposto alcança um resultado próximo aos algoritmos

FME, RME e *Riding Peaks*, pois os tráfegos VoIP e vídeo gerados podem às vezes não ocupar todos os recursos, fazendo com que o tráfego Web quase sempre seja transmitido mesmo que, em pequenas porções, dentro de um mesmo TTI.

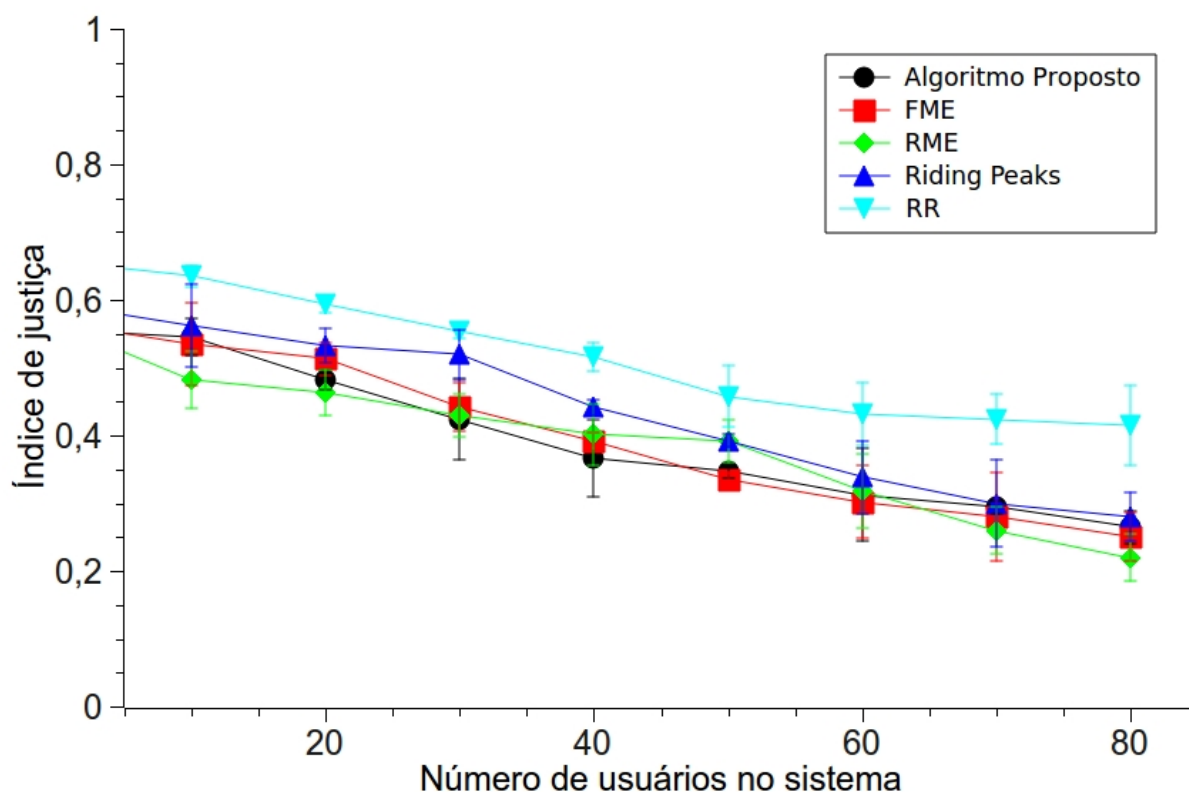


Figura 5.9: Índice de justiça em função da quantidade de usuários para o tráfego Web utilizando uma distribuição 50/10/40.

Já as curvas mostradas na Figura 5.10 demonstram que o algoritmo proposto consegue manter um atraso médio menor que os outros algoritmos. Isso é justificável pela verificação feita em cada TTI em relação aos parâmetros mínimos de cada classe de serviço. Além disso, o sistema se encarrega do tráfego com prioridade baixa garantindo requisitos mínimos.

Pode-se notar que o algoritmo proposto também atende de forma efetiva esse tipo de aplicação.

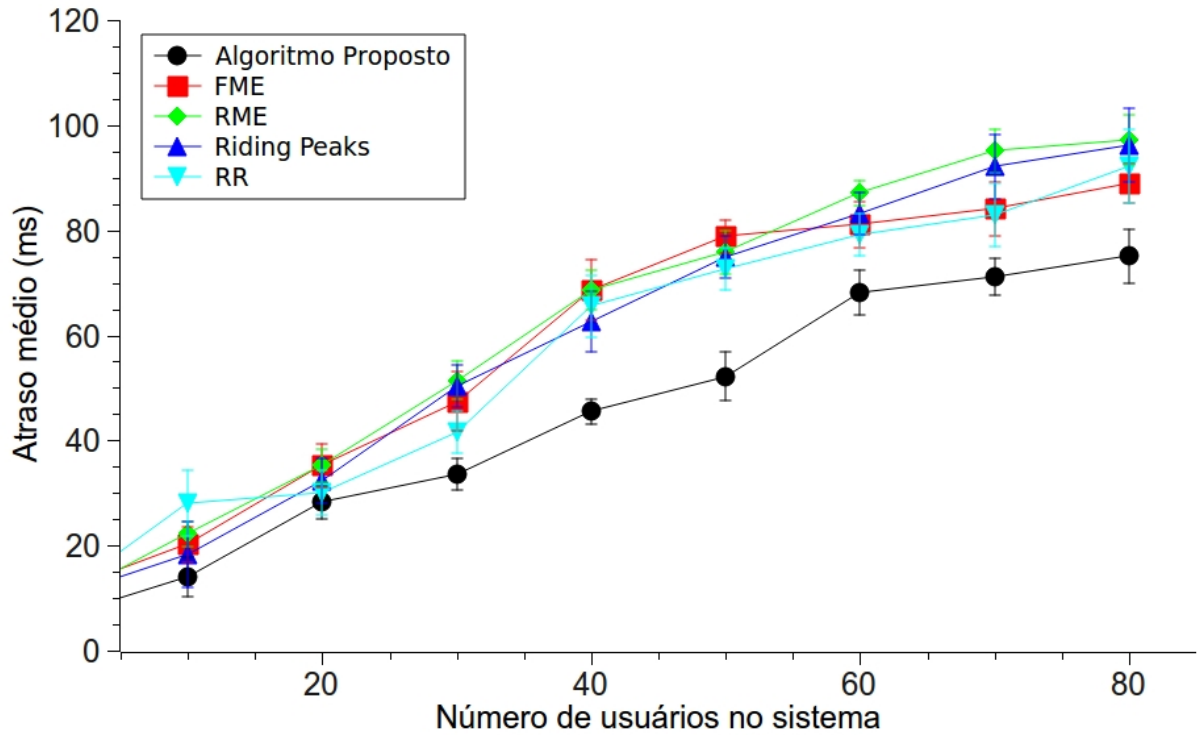


Figura 5.10: Atraso médio em função da quantidade de usuários para o tráfego Web utilizando uma distribuição 50/10/40.

### 5.3.4 Avaliação do Escalonador Proposto para os Tráfegos de Tempo Real em Outros Cenários

Nesta seção, analisa-se o desempenho do algoritmo de escalonamento proposto considerando os tráfegos de tempo real, VoIP e vídeo, utilizando distribuições diferentes dos serviços para os vários usuários nas simulações. Assim, pode-se analisar a influência de diferentes cargas de tráfego na rede durante a execução do mecanismo proposto.

Neste experimento, usuários com conexões VoIP e Vídeo registram-se na rede durante a simulação. O tráfego de *background* é em média de 1 Mbps.

Para a primeira avaliação, a carga de tráfego foi dividida na proporção apresentada na Tabela 5.4. Assim, avalia-se o mecanismo proposto em um cenário com uma distribuição de serviços em que há mais usuários utilizando tráfego de *background* do que serviços de tempo real.

O mecanismo proposto foi avaliado juntamente com os outros algoritmos em relação a vazão mínima e atraso máximo.

Tabela 5.4: Distribuição do tráfego visando tráfego de *background*

Serviços	Distribuição
VoIP	15%
Vídeo	15%
Tráfego de <i>background</i>	70%

As Figuras 5.11 e 5.12 mostram a vazão média para os tráfegos VoIP e vídeo, respectivamente, alcançada pelos algoritmos simulados.

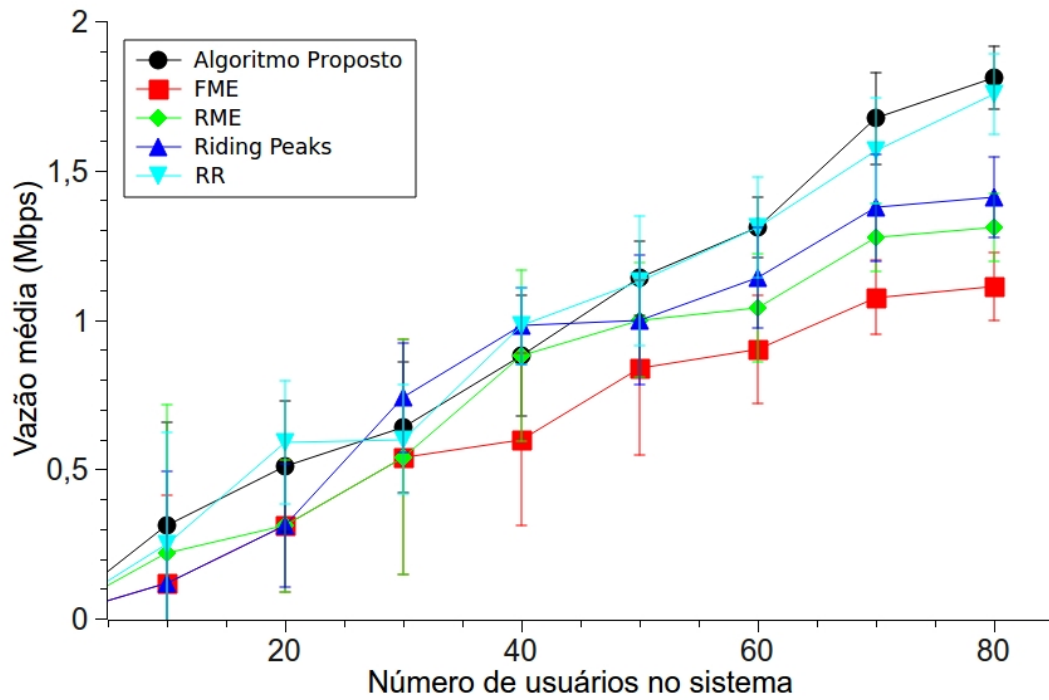


Figura 5.11: Vazão média em função da quantidade de usuários para o tráfego VoIP utilizando uma distribuição 15/15/70.

De acordo com os resultados apresentados, nota-se um bom desempenho do algoritmo de escalonamento proposto em relação aos outros algoritmos. O mecanismo proposto consegue manter uma vazão mínima garantida para o tráfego VoIP mesmo em um cenário onde há uma carga de tráfego maior entre os outros serviços.

As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam os atrasos médios alcançados pelos algoritmos nos tráfegos de VoIP e vídeo.

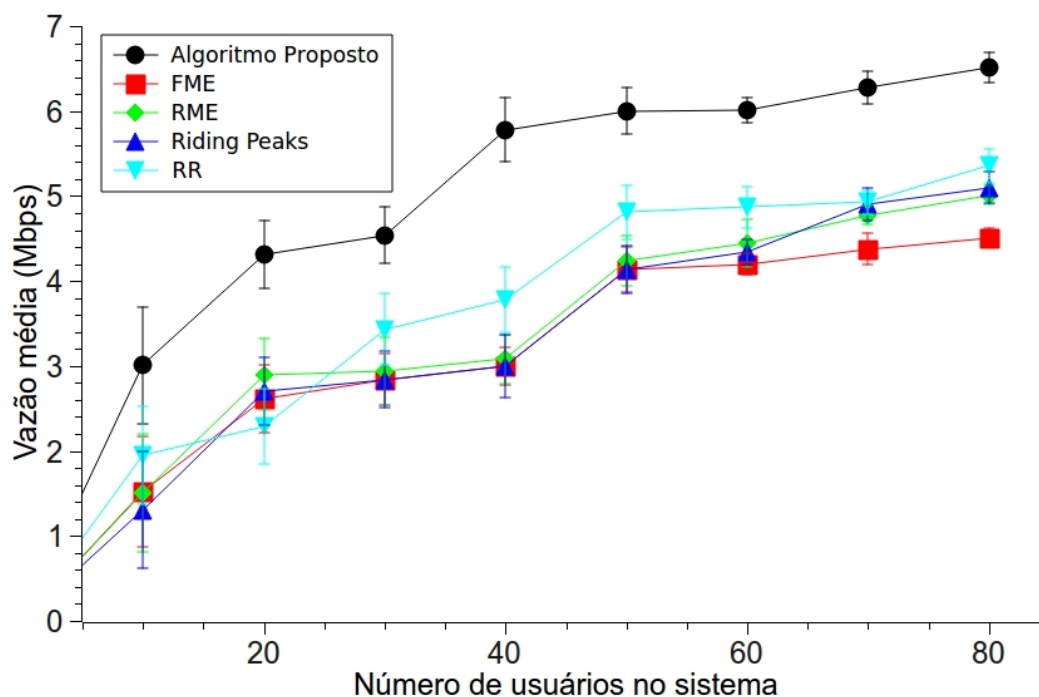


Figura 5.12: Vazão média em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo utilizando uma distribuição 15/15/70.

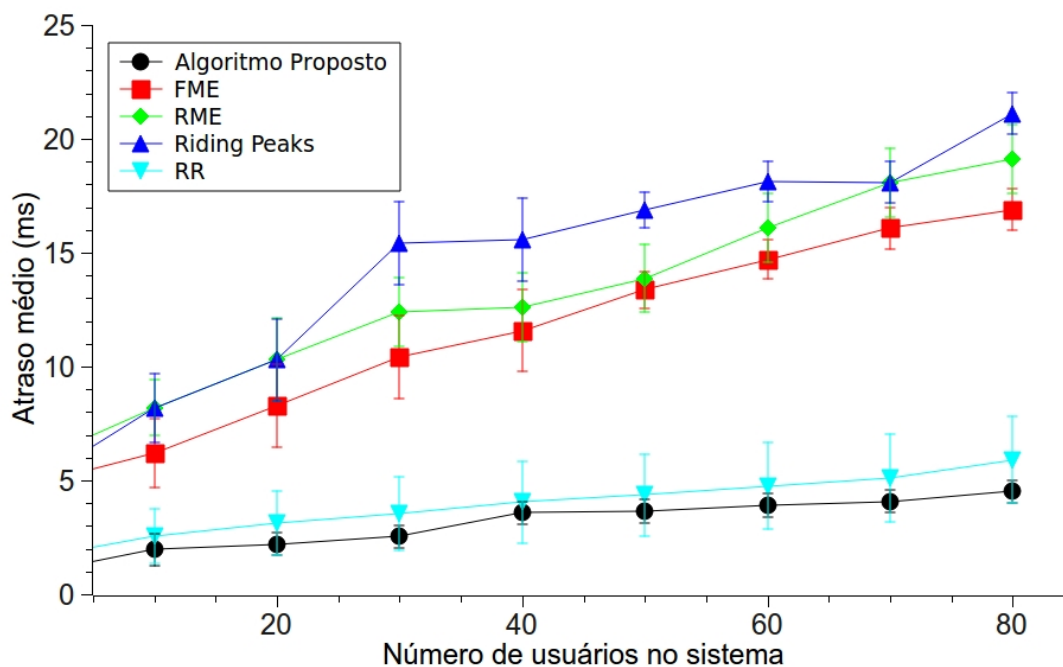


Figura 5.13: Atraso médio em função da quantidade de usuários para o tráfego VoIP utilizando uma distribuição 15/15/70.

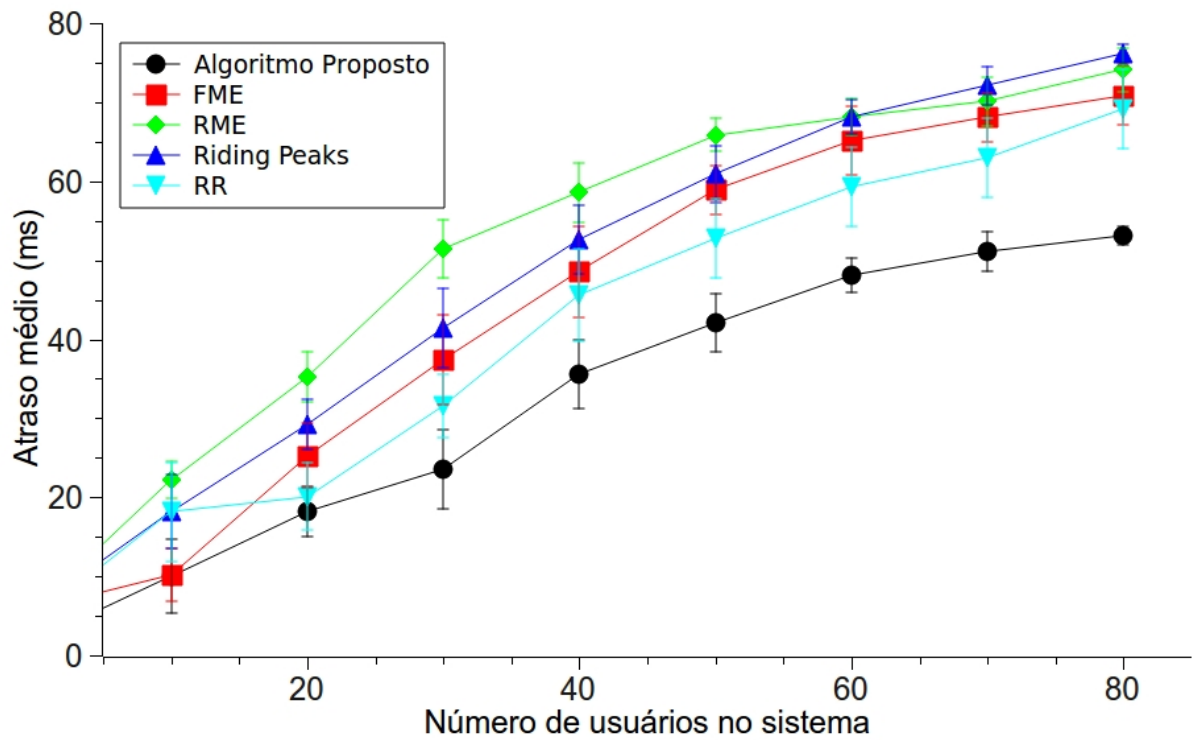


Figura 5.14: Atraso médio em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo utilizando uma distribuição 15/15/70.

Novamente, pode-se notar que o algoritmo desenvolvido consegue manter um atraso médio baixo em relação aos outros algoritmos. Devido à sua capacidade de priorização dos serviços de tempo real, o mecanismo proposto apresenta bons resultados para o tráfego de vídeo mesmo em um cenário em que o tráfego de *background* gera grandes quantidades de dados. Em conjunto com essa capacidade, pode-se destacar o limitador imposto ao algoritmo proposto, fazendo com que aumente a diversidade de usuários (e serviços) em uma mesma rodada de escalonamento.

Para a próxima avaliação, a carga de tráfego foi dividida na proporção apresentada na Tabela 5.5. Essa nova distribuição impõe uma competição maior entre os serviços de tempo real por recursos na rede.

Tabela 5.5: Distribuição do tráfego visando aplicações de tempo real

Serviços	Distribuição
VoIP	40%
Vídeo	40%
Tráfego de <i>background</i>	20%

As curvas dos gráficos apresentadas nas Figuras 5.15 e 5.16 mostram os resultados obtidos para os tráfegos VoIP e vídeo, respectivamente, em relação a vazão média.

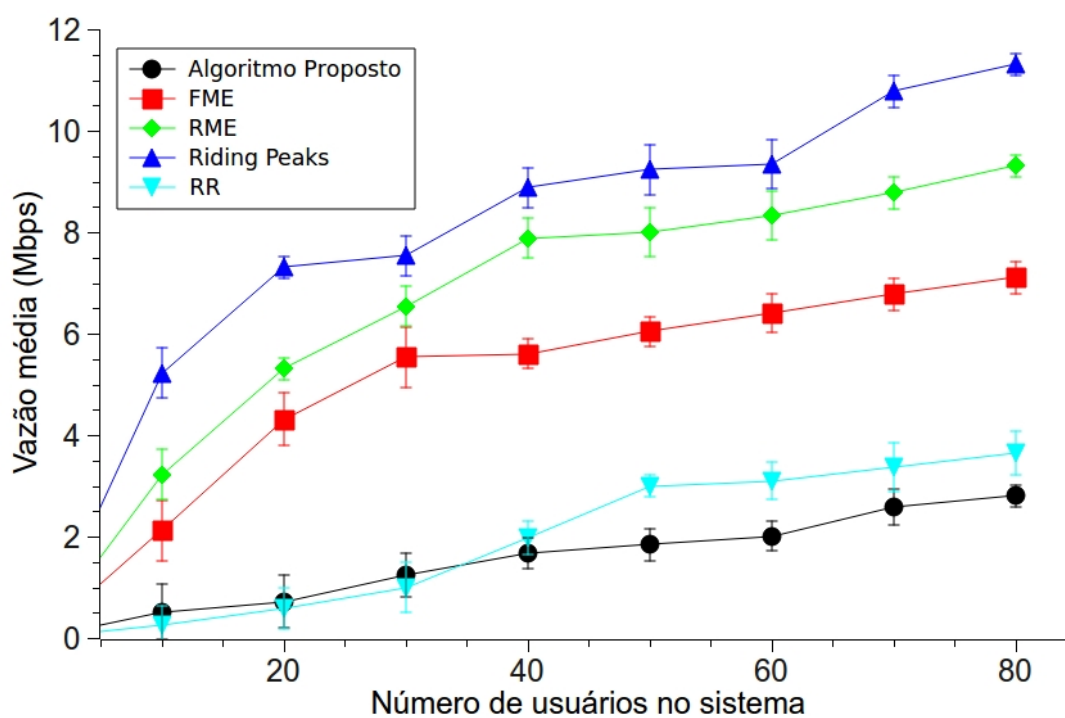


Figura 5.15: Vazão média em função da quantidade de usuários para o tráfego VoIP utilizando uma distribuição 40/40/20.

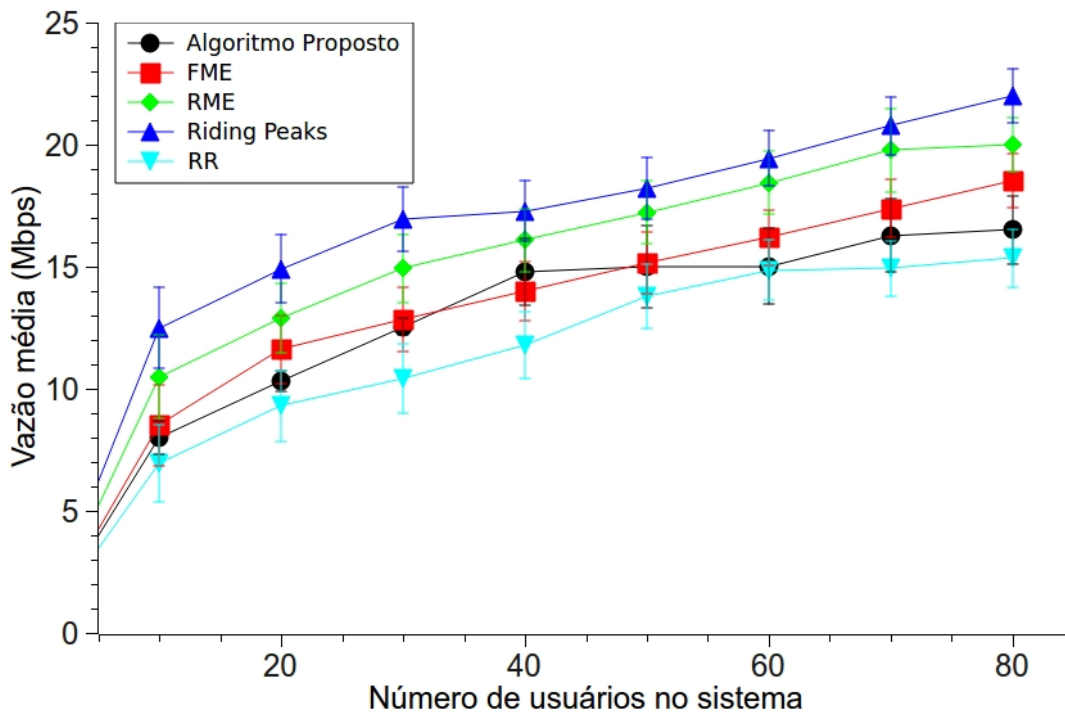


Figura 5.16: Vazão média em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo utilizando uma distribuição 40/40/20.

Ao comparar os resultados obtidos e apresentados nas Figuras 5.11 e 5.15, nota-se que o serviço VoIP não alcança uma proporção condizente, em relação a vazão média, com o aumento da carga de tráfego utilizada no cenário 40/40/20. Esse fato ocorreu principalmente pela alta disputa entre os serviços de tempo real, o que ocasionou em uma taxa maior de perda de pacotes para o tráfego VoIP neste cenário, como pode-se visualizar na comparação entre as taxas média de perda de pacotes em ambos os cenários, apresentadas nas Figuras 5.17 e 5.18.

De forma contrária, ao comparar os resultados apresentados nas Figuras 5.12 e 5.16, pode-se visualizar que a vazão média alcançada durante a transmissão de tráfego de vídeo no cenário 40/40/20 é maior proporcionalmente que no outro cenário. Isso se deve ao fato de ter mais usuários utilizando esse tipo de serviço e, assim, alcançando um resultado esperado.

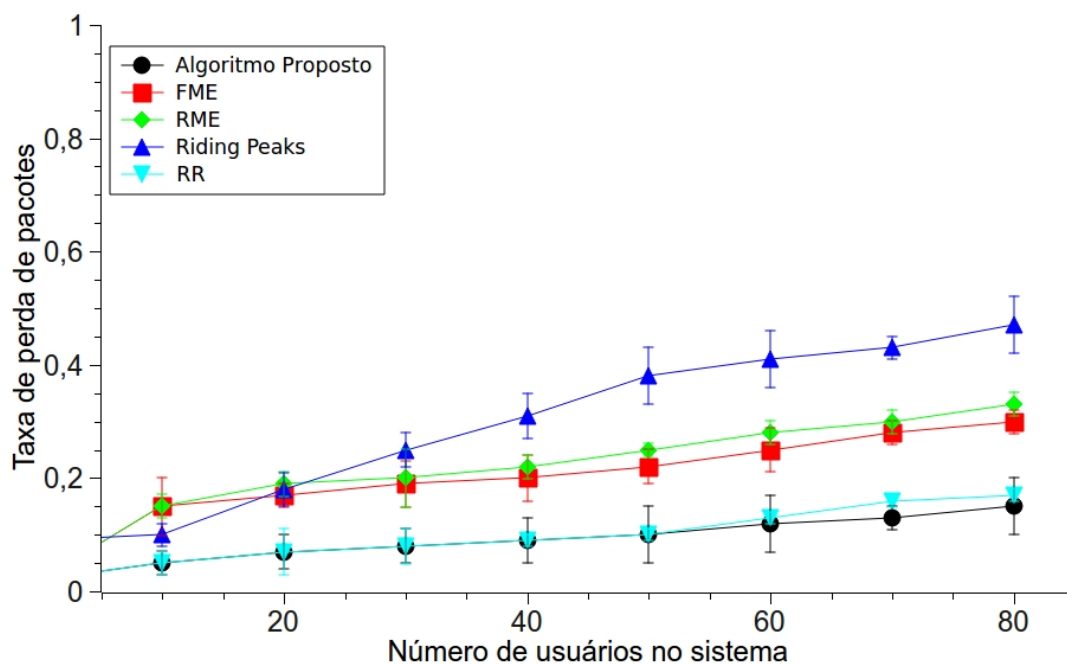


Figura 5.17: Taxa média de perda de pacotes em função da quantidade de usuários para o tráfego VoIP utilizando uma distribuição 15/15/70.

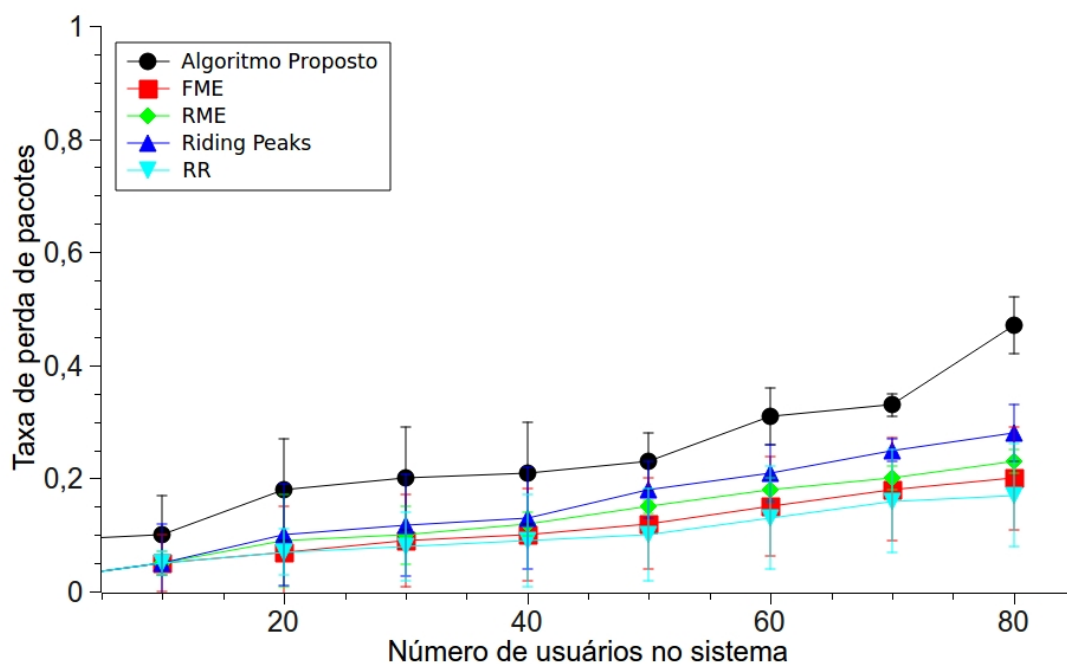


Figura 5.18: Taxa média de perda de pacotes em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo utilizando uma distribuição 40/40/20.

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.19 e 5.20 mostram os resultados obtidos para os tráfegos VoIP e vídeo, respectivamente, em relação ao atraso médio.

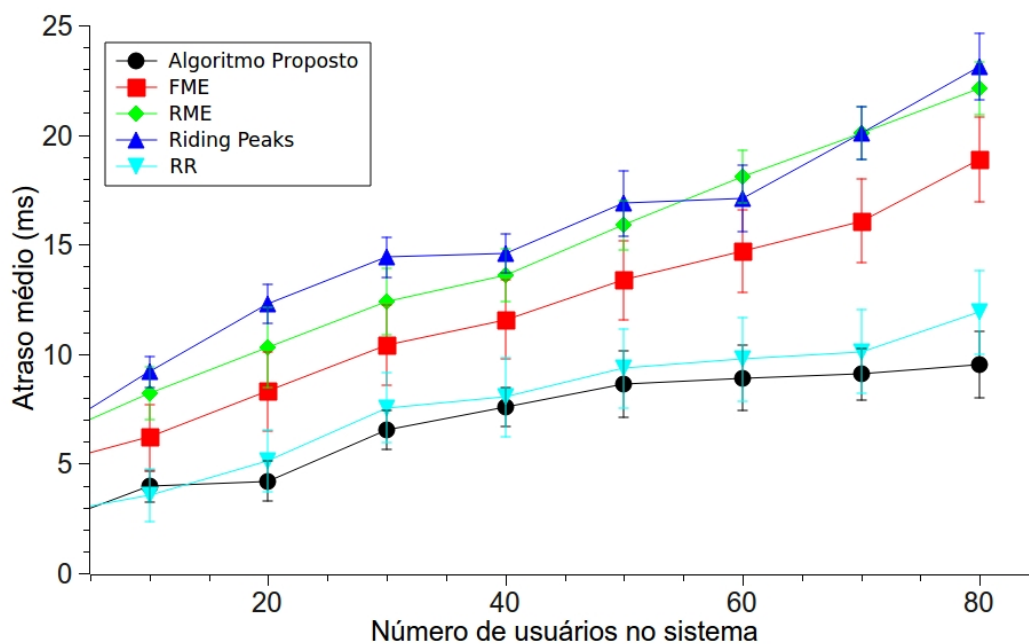


Figura 5.19: Atraso médio em função da quantidade de usuários para o tráfego VoIP utilizando uma distribuição 40/40/20.

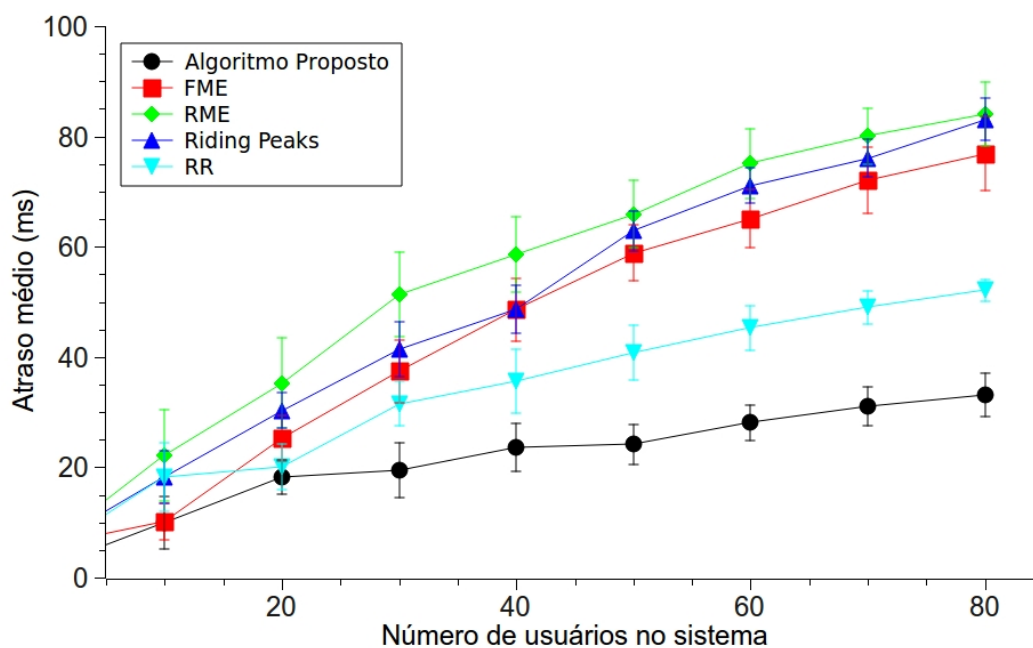


Figura 5.20: Atraso médio em função da quantidade de usuários para o tráfego de vídeo utilizando uma distribuição 40/40/20.

Para todos esses cenários o algoritmo proposto conseguiu manter uma vazão média mínima e um atraso médio limitado para os serviços de tempo real que possuem requisitos de QoS rígidos e precisam de uma maior atenção durante o processo de escalonamento.

## **5.4 Considerações Finais**

Neste capítulo, avaliou-se o desempenho do algoritmo de escalonamento proposto por meio de modelagem e simulação computacional. Os cenários de redes e de simulação foram apresentados bem como as características de tráfego e parâmetros de simulação. Os resultados obtidos foram analisados de acordo com as métricas de vazão média, índice de justiça e de atraso médio. Nos cenários analisados, avaliou-se a eficiência do algoritmo proposto em relação a outros algoritmos apresentados e que são frequentemente estudados na literatura. Posteriormente, foram feitas as devidas considerações sobre cada resultado.

# Capítulo 6

## Conclusões Gerais

A tecnologia LTE é uma evolução das redes móveis celulares atuais. O 3GPP propôs essa nova rede para garantir um mercado competitivo para a rede de banda larga móvel, oferecendo maiores taxas de dados a um custo considerável.

As redes LTE prometem níveis superiores de desempenho, tais como, uma baixa latência e vazão elevada. Além disso, a sua nova arquitetura permite uma implantação mais simplificada.

O padrão define, em termos de equivalência com o modelo OSI, principalmente as camadas 1 (PHY) e 2 (MAC/RLC/PDCP) das redes LTE. A camada física é baseada na modulação OFDM, fazendo com que suporte taxas de dados superiores ao WCDMA, ao mesmo tempo em que diminui a *Inter-Symbol-Interference* (Interferência ISI) durante o processo de transmissão de sucessivos símbolos OFDM.

Ainda na camada física, o padrão define o OFDMA para o tráfego *downlink* e o SC-FDMA para o tráfego *uplink*. Ambas as tecnologias são variantes do OFDM. O *uplink* utiliza o SC-FDMA principalmente pelo fato de apresentar uma PAPR baixa. Dessa forma, tem-se menor consumo de energia durante as transmissões dos UEs.

Para as redes LTE, o padrão definiu também o *Resource Block* (RB) como a menor unidade de transmissão no tempo/frequência que se estende por 0,5 ms e 180 kHz, respectivamente. Juntamente a isso, o LTE se define como uma rede totalmente baseada em pacotes e, dessa forma, torna-se necessário um apoio reforçado para atender as necessidades de QoS de uma variedade de serviços usuais atualmente.

A provisão de QoS às aplicações é suportada no nível de acesso ao sistema através de uma entidade de gerenciamento de recursos de rádio como o escalonador de pacotes.

O escalonador decide quais usuários poderão transmitir no próximo TTI. Essa decisão ocorre periodicamente, a cada 1 ms.

Um escalonador de pacotes eficiente deve considerar as necessidades das aplicações dos usuários que desejam transmitir, de modo que consiga garantir QoS referente aos requisitos de cada serviço ao mesmo tempo que garante uma distribuição de recursos otimizada para a diversidade de usuários nas redes LTE.

Embora exista essa atenção em relação à distribuição de recursos, o 3GPP não define o tipo de escalonamento a ser adotado, deixando a cargo das empresas tomarem suas próprias decisões. Dessa forma, há uma diversidade de propostas para atender esse desafio. Para o tráfego *uplink*, encontrou-se poucos trabalhos voltados para a QoS nesse sentido, visto que alocar recursos utilizando o SC-FDMA ainda é um obstáculo, principalmente para não ocorrer problemas de NP-*hard* durante o desenvolvimento da heurística que será adotada no algoritmo de escalonamento proposto.

Assim, foi realizado um levantamento bibliográfico sobre o assunto, com o objetivo de compreender as redes LTE de uma maneira abrangente e propor um novo mecanismo de escalonamento que pudesse garantir uma vazão mínima e um atraso máximo limitado para as aplicações que possuem requisitos de QoS rígidos e, ao mesmo tempo, procurou-se alcançar uma diversidade maior de usuários escalonados em um mesmo TTI.

A proposta de escalonamento para o tráfego *uplink* apresentada neste trabalho baseia-se no algoritmo *Riding Peaks* pelo fato deste apresentar melhores resultados durante o processo de alocação de recursos, como apresentado em [13]. Além disso, como já mencionado, o algoritmo proposto busca prover uma vazão mínima garantida e um atraso máximo limitado para aplicações de tempo real, pois essas possuem prioridades maiores em relação a outras aplicações. Para isso, o mecanismo proposto utiliza informações apresentadas na Tabela 2.3, para atender os serviços de forma eficiente. Posteriormente, durante o processo de alocação de recursos, o algoritmo proposto também busca atender uma diversidade maior de usuários, ao utilizar um limitador de RBs distribuídos para um mesmo UE em um TTI. Essa limitação ocorre pelo fato de que usuários bem próximos à eNB (principalmente aqueles com prioridades superiores aos outros) possuem uma probabilidade maior de conseguir todos os RBs em uma mesma rodada mesmo que não precise de todos, visto que seus MCSs são maiores e poderão afetar os valores durante a aplicação da função de utilidade. Assim sendo, com o limitador proposto, mesmo que um

UE tenha a possibilidade de alocar todos os recursos disponíveis para si, ele irá utilizar apenas a quantidade de RBs necessários para enviar a quantidade de dados desejável no TTI atual.

Por meio de modelagem e simulação, avaliou-se, no Capítulo 5, a eficiência do algoritmo proposto para o tráfego *uplink* nas redes LTE. Para isso, utilizou-se o simulador LTE-Sim [55] e foi necessário adicionar algumas funcionalidades para a aplicação do mecanismo proposto e, posteriormente, obter os resultados como foi apresentado na Seção 5.2.1. Todos os experimentos de simulação realizados consideraram a entrada de conexões VoIP, Vídeo e tráfego de *background* durante o tempo de simulação. A análise dos resultados foi realizada em função da quantidade de usuários na rede, tendo como métricas de avaliação a vazão média, índice de equidade e o atraso médio em diferentes cenários.

Por meio dos resultados de simulação obtidos, verificou-se que o algoritmo desenvolvido consegue atender a proposta sugerida neste trabalho para o tráfego de tempo real em relação aos outros algoritmos encontrados na literatura utilizados para comparação. Com isso, por meio desta análise comparativa, pode-se verificar que pelo fato do algoritmo proposto priorizar os fluxos de tempo real, tal mecanismo mostrou-se eficiente para atender aos requisitos de QoS desses serviços, ao mesmo tempo em que alcança uma maior diversidade de usuários.

Os resultados apresentados permitem ainda concluir que o algoritmo proposto apresenta um desempenho menor em relação à vazão média apresentada pelos outros algoritmos. Esse fato ocorreu, pois os outros algoritmos priorizam apenas os usuários com melhores condições de sinal e, assim, não garantem que irão atender eficientemente os serviços de tais usuários. Com isso, mesmo com o desempenho menor, o algoritmo proposto consegue garantir uma vazão média mínima necessária para prover esse requisito de QoS para os serviços simulados, além de manter um atraso médio baixo também necessário para escalonar eficientemente as aplicações de tempo real.

Por fim, o algoritmo de escalonamento proposto neste trabalho para a provisão de QoS otimizou o desempenho dos serviços de tempo real para o tráfego *uplink* das redes LTE, ao mostrar que é necessário ter um cuidado especial durante a alocação de recursos entre os usuários para obter um escalonamento eficiente para os variados tipos de serviços.

Observou-se ainda que o algoritmo proposto não apresenta um bom índice de justiça durante as simulações. Dessa forma, fica em aberto a possibilidade de acrescentar métricas

ou mecanismos para atender essa necessidade e garantir que todos os usuários tenham as mesmas probabilidades de serem atendidos. Portanto, tais arranjos podem ser tratados como sugestões para continuidade deste trabalho e elaboração de novas propostas.

Sugere-se também, como continuidade deste trabalho, a implementação e um estudo acerca de um mecanismo que assegure um consumo menor de energia durante todo o processo de escalonamento e alocação de recursos, visto que é de suma importância para o SC-FDMA utilizado no tráfego *uplink*. Além do desenvolvimento e implantação, também, de mecanismos para controle de admissão de conexões e policiamento na eNB.

# Referências Bibliográficas

- [1] A. Ghosh and R. Ratasuk, *Essentials of LTE and LTE-A*. Essentials of LTE and LTE-A, Cambridge University Press, 2011.
- [2] 3GPP, “Policy and Charging Control Architecture.” TS 23.203, 2010.
- [3] 3GPP, “LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical layer procedures.” TS 36.213, 2011.
- [4] M. Salah, “Comparative Performance Study of LTE Uplink Schedulers,” Master’s thesis, Queen’s University, Ontario - Canada, 2011.
- [5] O. Delgado and B. Jaumard, “Scheduling and Resource Allocation in LTE Uplink with a Delay Requirement,” in *Communication Networks and Services Research Conference (CNSR), 2010 Eighth Annual*, pp. 268–275, 2010.
- [6] O. Arslan, “Performance Evaluation of Packet Scheduling Algorithms for LTE Downlink,” Master’s thesis, School of Engineering - Blekinge Institute of Technology, Karlskrona - Sweden, 2011.
- [7] Anritsu, “Guide - Understanding LTE,” tech. rep., 2013.
- [8] 3GPP, “Technical Specification Group Radio Access Networks; Deployment aspects (Release 8).” TR 25.943, 2008.
- [9] Y. Tan, “Active Queue Management for LTE uplink in eNodeB,” Master’s thesis, Helsinki University of Technology, Helsinki - Finland, 2009.
- [10] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2.” TS 36.300, 2010.

- [11] M. Carvalho, “Planeamento e Optimização em Redes Celulares Móveis Auto-geridas Assentes em LTE,” Master’s thesis, Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Lisboa - Portugal, 2011.
- [12] S. Lee, I. Pefkianakis, A. Meyerson, S. Xu, and S. Lu, “Proportional Fair Frequency-Domain Packet Scheduling for 3GPP LTE Uplink,” in *INFOCOM 2009, IEEE*, pp. 2611–2615, 2009.
- [13] H. Safa and K. Tohme, “LTE Uplink Scheduling Algorithms: Performance and Challenges,” in *19th International Conference Telecommunications (ICT)*, pp. 1–6, 2012.
- [14] M. Salah, N. Ali, A. Taha, and H. Hassanein, “Evaluating Uplink Schedulers in LTE in Mixed Traffic Environments,” in *Communications (ICC), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 1–5, 2011.
- [15] K. Elgazzar, M. Salah, A. Taha, and H. Hassanein, “Comparing Uplink Schedulers for LTE,” in *Proceedings of the 6th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, pp. 189–193, 2010.
- [16] K. Tahboub, “Comparison of Channel Dependent Scheduling Policies in LTE Uplink.”
- [17] K. Tohme, “QoS-Aware Uplink Frequency Scheduling Scheme for LTE Networks,” Master’s thesis, American University of Beirut, Beirut - Lebanon, 2011.
- [18] M. Wang, Z. Zhong, and Q. Liu, “Resource allocation for SC-FDMA in LTE uplink,” in *Service Operations, Logistics, and Informatics (SOLI), 2011 IEEE International Conference on*, pp. 601–604, 2011.
- [19] D. Kim, J. Kim, H. Kim, K. Kim, and Y. Han, “An efficient scheduler for uplink single carrier FDMA system,” in *Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC), 2010 IEEE 21st International Symposium on*, pp. 1348–1353, 2010.
- [20] F. Calabrese, C. Rosa, K. Pedersen, and P. Mogensen, “Performance of proportional fair frequency and time domain scheduling in LTE uplink,” in *Wireless Conference, 2009. EW 2009. European*, pp. 271–275, 2009.
- [21] E. Yaacoub, H. Al-Asadi, and Z. Dawy, “Low complexity scheduling algorithms for the LTE uplink,” in *Computers and Communications, 2009. ISCC 2009. IEEE Symposium on*, pp. 266–270, 2009.

- [22] M. Mehta, S. Khakurel, and A. Karandikar, “Buffer-based channel dependent UpLink scheduling in relay-assisted LTE networks,” in *Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), 2012 IEEE*, pp. 1777–1781, 2012.
- [23] A. Baid, R. Madan, and A. Sampath, “Delay estimation and fast iterative scheduling policies for LTE uplink,” in *Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt), 2012 10th International Symposium on*, pp. 89–96, 2012.
- [24] S. Kwon and N. Lee, “Uplink QoS Scheduling for LTE System,” in *Vehicular Technology Conference (VTC Spring), 2011 IEEE 73rd*, pp. 1–5, 2011.
- [25] 3GPP, “Technical Specification Group Radio Access Network; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN).” TR 25.913, 2009.
- [26] 3GPP, “Feasibility study for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA) and Universal Terrestrial Radio Access Network (UTRAN).” TR 25.912, 2009.
- [27] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Architecture description.” TR 36.401, 2010.
- [28] 3GPP, “3GPP System Architecture Evolution: Report on Technical Options and Conclusions (Release 7).” TS 23.882, 2009.
- [29] 3GPP, “Network architecture (Release 8).” TS 23.002-820, 2009.
- [30] J. Coon, J. Siew, M. Beach, A. Nix, S. Armour, and J. McGeehan, “A comparison of MIMO-OFDM and MIMO-SCFDE in WLAN environments,” in *Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE*, pp. 3296–3301, 2003.
- [31] L. Song and J. Shen, *Envolved Cellular Network Planning and Optimization for UMTS and LTE*. Taylor & Francis, 2010.
- [32] A. Larmo, M. Lindstrom, M. Meyer, G. Pelletier, J. Torsner, and H. Wiemann, “The LTE link-layer design,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, no. 4, pp. 52–59, 2009.
- [33] E. Dahlman, H. Ekstrom, A. Furuskar, Y. Jading, J. Karlsson, M. Lundevall, and S. Parkvall, “The 3G Long-Term Evolution - Radio Interface Concepts and Perfor-

- mance Evaluation,” in *Vehicular Technology Conference, 2006. VTC 2006-Spring. IEEE 63rd*, pp. 137–141, 2006.
- [34] H. Ekstrom, “QoS control in the 3GPP evolved packet system,” *Communications Magazine, IEEE*, vol. 47, no. 2, pp. 76–83, 2009.
- [35] L. Bajzik, P. Horvath, L. Korossy, and C. Vulkan, “Impact of Intra-LTE Handover with Forwarding on the User Connections,” in *Mobile and Wireless Communications Summit, 2007. 16th IST*, pp. 1–5, 2007.
- [36] H. Holma and A. Toskala, *LTE for UMTS: Evolution to LTE-Advanced*. Wiley, 2011.
- [37] 3GPP, “User equipment (UE) radio access capabilities.” TS 36.306, 2010.
- [38] C. Cox, *An Introduction to LTE: LTE, LTE-Advanced, SAE and 4G Mobile Communications*. Wiley, 2012.
- [39] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, *LTE - The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice*. Wiley, 2011.
- [40] F. Khan, *LTE for 4G Mobile Broadband: Air Interface Technologies and Performance*. Cambridge University Press, 2009.
- [41] G. Berardinelli, L. R. de Temino, S. Frattasi, M. Rahman, and P. Mogensen, “Ofdma vs. sc-fdma: performance comparison in local area int-a scenarios,” in *Wireless Communications, IEEE, vol. 15*, pp. 64–72, 2008.
- [42] C. Ciochina and H. Sari, “A review of ofdma and single-carrier fdma,” in *Wireless Conference (EW), 2010 European*, pp. 706–710, 2010.
- [43] 3GPP, “Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) Protocol Specification.” TS 36.321, 2010.
- [44] 3GPP, “Services and service capabilities (Release 9).” TS 22.105, 2008.
- [45] 3GPP, “Quality of Service (QoS) concept and architecture (Release 9).” TS 23.107, 2010.

- [46] J. Li, Y. He, Y. Tie, and L. Guan, “Optimal resource allocation for LTE uplink scheduling in smart grid communications,” in *International Journal of Wireless Communications and Mobile Computing*, pp. 113–118, 2013.
- [47] N. Ali, A. Taha, and H. Hassanein, *LTE, LTE-Advanced and WiMAX: Towards IMT-Advanced Networks*. ITPro collection, Wiley, 2011.
- [48] A. Afifi, “A Radio Resource Management Framework for the 3GPP LTE Uplink,” Master’s thesis, Faculty of Engineering at Cairo University, Giza - Egypt, 2008.
- [49] J. Kurose and K. Ross, *Computer Networking: A Top-Down Approach*. Addison-Wesley, 5<sup>a</sup> ed., 2010.
- [50] L. R. de Temino, G. Berardinelli, S. Frattasi, and P. Mogensen, “Channel-aware scheduling algorithms for SC-FDMA in LTE uplink,” in *Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, 2008. PIMRC 2008. IEEE 19th International Symposium on*, pp. 1–6, 2008.
- [51] F. Liu and Y. Liu, “Improved Scheduling Algorithms for Uplink Single Carrier FDMA System,” in *Journal of Information and Computational Science*, pp. 9–11, 2012.
- [52] F. Calabrese, P. Michaelson, C. Rosa, M. Anas, C. Castellanos, D. Villa, K. Pedersen, and P. Mogensen, “Search-tree based uplink channel aware packet scheduling for UTRAN LTE,” in *IEEE Vehicular Technology Conference, 2008, VTC Spring 2008*, pp. 1949–1953, 2008.
- [53] P. Rehki, M. Luthra, S. Malik, and R. Atri, “Throughput Calculation for LTE TDD and FDD Systems,” tech. rep., 2012.
- [54] F. Kuo, H. Wang, C. Tseng, K. Ting, and P. Liu, “Robust LTE uplink scheduling based on call admission control,” in *15th International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC)*, pp. 554–558, 2012.
- [55] G. Piro, L. Grieco, G. Boggia, F. Capozzi, and P. Camarda, “Simulating LTE Cellular Systems: An Open-Source Framework,” *Vehicular Technology, IEEE Transactions on*, vol. 60, no. 2, pp. 498–513, 2011.

- 
- [56] G. Piro, “LTE-Sim - the LTE simulator.” Disponível em: <http://telematics.poliba.it/LTE-Sim>. Acessado em 01/2013.
- [57] B. Arnold, “Pareto Distribution.” Encyclopedia of Statistical Sciences.