



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação

Jeanette Quiñones Ccorimanya

ALGORITMO DE ESCALONAMENTO DE PACOTE USANDO POLICIAMENTO DE TRÁFEGO EM REDES LTE DOWNLINK

CAMPINAS
2018

Jeanette Quiñones Ccorimanya

ALGORITMO DE ESCALONAMENTO DE PACOTE USANDO
POLICIAMENTO DE TRÁFEGO EM REDES LTE DOWNLINK

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, na Área de Telecomunicações e Telemática.

Orientador: Prof. Dr. Lee Luan Ling

Este exemplar corresponde à versão final da dissertação defendida pela aluna Jeanette Quiñones Ccorimanya, e orientada pelo Prof. Dr. Lee Luan Ling

CAMPINAS
2018

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): PEC-PG, 190739/2013-4

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8398-2086>

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Elizangela Aparecida dos Santos Souza - CRB 8/8098

Q46a Quiñones Ccorimanya, Jeanette, 1980-
Algoritmo de escalonamento de pacote usando policiamento de tráfego em redes LTE downlink / Jeanette Quiñones Ccorimanya. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Lee Luan Ling.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Telecomunicações - Tráfego. 2. Fractais. 3. Sistemas de comunicação móvel. 4. Escalonamento. 5. Qualidade de serviço (Redes de computadores). I. Lee, Luan Ling, 1956-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: A packet scheduling algorithm using traffic policing in LTE downlink networks

Palavras-chave em inglês:

Telecommunications - Traffic

Fractais

Mobile Communications Systems

Scheduling

Quality of service (Computer networks)

Área de concentração: Telecomunicações e Telemática

Titulação: Mestra em Engenharia Elétrica

Banca examinadora:

Lee Luan Ling [Orientador]

Carlos Eduardo Câmara

Celso de Almeida

Data de defesa: 26-11-2018

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Elétrica

COMISSÃO JULGADORA - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Candidato: Jeanette Quiñones Ccorimanya RA: 153034

Data da Defesa: 26 de Novembro de 2018

Título da Tese: “Algoritmo de Escalonamento de Pacote usando Policiamento de Tráfego em Redes LTE Downlink”

Prof. Dr. Lee Luan Ling (Presidente, FEEC/UNICAMP)
Prof. Dr. Carlos Eduardo Câmara (UniAnchieta)
Prof. Dr. Celso de Almeida (FEEC/UNICAMP)

A ata da defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no processo de vida acadêmica do aluno.

*Aos meus Pais, Saturnino e Pastora
À memória do meu irmão Éffren
Aos meus Irmãos, Elizabeth, Noemi,
Ruth e Walther.*

Agradecimentos

Agradeço, primeiramente a Deus, por ser a força da minha vida, pela perseverança, saúde e alegria presentes durante todo o dia de trabalho.

Ao Professor Dr. Lee Luan Ling, pela dedicação e paciente orientação e conselhos durante o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço ainda pela oportunidade para realizar meus estudos de mestrado no Brasil.

Meus agradecimentos também aos membros do meu comitê de dissertação, Prof. Dr. Celso de Almeida e Prof. Dr. Carlos Eduardo Câmara por ler o rascunho desta dissertação e fornecer muitos comentários valiosos que melhoraram a apresentação e o conteúdo deste documento.

Ao Jefferson pela dedicação, conselhos, aprendizado na iniciação (realizado) deste trabalho.

Aos meus pais e irmãos, por compreenderem a minha ausência em tantos momentos, pelo apoio durante esta jornada, pelos conselhos e pela confiança depositada em mim.

Aos meus amigos, Cristian, Leandro, Camila, Cheng Li, Alex, Gabriela, Marleny, Jorge, Jaime e Nella pela ajuda e companhia durante a minha estadia no Brasil.

A todas as pessoas que não citei explicitamente, de alguma forma contribuíram direta é indiretamente no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Programa Estudante Convênio (PEC-PG), pelo apoio financeiro.

Por fim, agradeço à Universidade Estadual de Campinas e ao Brasil.

A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro.

Albert Einstein

Resumo

Neste trabalho, melhoramos o desempenho dos tradicionais algoritmos de escalonamento de pacotes na rede LTE (*Long-Term Evolution*) para aplicações de serviços multimídia, usando mecanismos de policiamento de tráfego conhecidas como reguladores de balde furado (do inglês, *Leaky bucket*). Busca-se atingir a equidade entre classes de serviços, controlando as taxas de chegada de pacotes nas filas de transmissão do escalonador. O cenário de simulação considera múltiplos usuários movimentando-se aleatoriamente a duas velocidades diferentes envolvendo os fluxos de tráfego de vídeo e VoIP. A avaliação de desempenho foi realizada em termos de parâmetros de qualidade de serviço, como atraso de pacotes, taxa de perda de pacotes e vazão média para tráfego de vídeo e VoIP. Os resultados da simulação confirmam que os escalonadores com tráfego de entrada policiado fornecem melhor desempenho para serviços em tempo real, especialmente aqueles que envolvem tráfego de vídeo.

Palavras-chave: LTE, Escalonador de pacotes, Policiamento de tráfego, Qualidade de serviço (QoS).

Abstract

In this work, we improve the performance of traditional packet-scheduling algorithms in Long-Term Evolution (LTE) for multimedia service applications, using traffic policing mechanisms known as leaky bucket regulation. It seeks to achieve fairness between classes of services, controlling the arrival rates of packets in the transmission queues of the scheduler. The simulation scenario considers multiple users randomly moving at two different speeds using video and VoIP traffic flows. The performance evaluation was performed in terms of quality of service parameters, such as packet delay, packet loss rate and average throughput for video and VoIP traffic. Simulation results confirm that schedulers with polled input traffic provide better performance for real-time services, especially those involving video traffic.

Key-words: Long-term evolution (LTE), Traffic policing, Packet scheduler, Quality of service (QoS).

Lista de Figuras

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Evolução dos padrões de 3GPP. | 27 |
| 2.2 | Arquitetura geral do sistema LTE [35] | 28 |
| 2.3 | Arquitetura EPC [35] | 29 |
| 2.4 | Arquitetura de E-UTRAN [12] | 30 |
| 2.5 | Arquitetura interna de UE [5] | 31 |
| 2.6 | Protocolo de interface rádio [12] | 32 |
| 2.7 | Arquitetura de protocolo da interface rádio do LTE (<i>Downlink</i>) [36] | 33 |
| 2.8 | Protocolo de plano de usuário | 35 |
| 2.9 | Protocolo de plano de controle | 36 |
| 2.10 | Comparação das técnicas de acesso múltiplo, OFDMA para <i>downlink</i> e SC-FDMA para <i>uplink</i> [54] | 36 |
| 2.11 | Alocação de subportadoras OFDM e OFDMA | 37 |
| 2.12 | Grade de recursos em redes LTE | 37 |
| 2.13 | Conceito de bearer | 39 |
| 2.14 | Tipo de bearer | 39 |
| 2.15 | Estrutura de quadros em redes LTE | 41 |
| 2.16 | Modelo geral de alocação de recursos em redes LTE <i>downlink</i> | 41 |
| 2.17 | Operação genérica do escalonador de pacotes na rede LTE <i>downlink</i> | 44 |
| 2.18 | Algoritmo de escalonamento | 45 |
| 3.1 | Amostras da séries de tráfego de vídeos (a) <i>Lord-III</i> , (b) <i>Foreman</i> . Função densidade de probabilidade dos tráfegos (c) <i>Lord-III</i> , (d) <i>Foreman</i> | 50 |
| 3.2 | (a) Amostra da série de tráfego e (b) Função densidade de probabilidade do tráfego <i>lbt-pkt-5</i> | 50 |
| 3.3 | (a) Balde furado com líquido (b) Balde furado com pacotes [71] | 53 |
| 3.4 | (a) Processo envelope do algoritmo LB para a série de tráfego <i>Lord-III</i> , (b) Pacotes descartados ou marcados de baixa prioridade para a série de tráfego <i>Lord-III</i> utilizando o algoritmo LB | 54 |
| 3.5 | (a) Processo envelope do algoritmo LB para a série de tráfego <i>Foreman</i> , (b) Pacotes descartados ou marcados como baixa prioridade para a série de tráfego <i>Foreman</i> utilizando o algoritmo LB | 55 |

| | | |
|------|--|----|
| 3.6 | (a) Processo envelope do algoritmo LB para a série de tráfego <i>lbl-pkt-5</i> , (b) Pacotes descartados ou marcados de baixa prioridade para a série de tráfego <i>lbl-pkt-5</i> utilizando o algoritmo LB | 55 |
| 3.7 | P_b versus tamanho do <i>buffer</i> com o algoritmo LB para as séries de tráfego (a) <i>Lord-III</i> , (b) <i>Foreman</i> e (c) <i>lbl-pkt-5</i> | 56 |
| 3.8 | (a) Processo envelope do algoritmo FLB para a série de tráfego <i>Lord-III</i> , (b) Pacotes descartados ou marcados como baixa prioridade para a série de tráfego <i>Lord-III</i> utilizando o algoritmo FLB | 57 |
| 3.9 | (a) Processo envelope do algoritmo FLB para a série de tráfego <i>Foreman</i> , (b) Pacotes descartados ou marcados como baixa prioridade para a série de tráfego <i>Foreman</i> utilizando o algoritmo FLB | 58 |
| 3.10 | (a) Processo envelope do algoritmo FLB para a série de tráfego <i>lbl-pkt-5</i> , (b) Pacotes descartados ou marcados como baixa prioridade para a série de tráfego <i>lbl-pkt-5</i> utilizando o algoritmo FLB | 58 |
| 3.11 | P_b versus tamanho do <i>buffer</i> com o algoritmo FLB para as séries de tráfego (a) <i>Lord-III</i> , (b) <i>Foreman</i> e (c) <i>lbl-pkt-5</i> | 60 |
| 3.12 | (a) Processo envelope do algoritmo MLB para a série de tráfego <i>Lord-III</i> , (b) Pacotes descartados ou marcados como baixa prioridade para a série de tráfego <i>Lord-III</i> utilizando o algoritmo MLB | 61 |
| 3.13 | (a) Processo envelope do algoritmo MLB para a série de tráfego <i>Foreman</i> , (b) Pacotes descartados ou marcados como baixa prioridade para a série de tráfego <i>Foreman</i> utilizando o algoritmo MLB | 61 |
| 3.14 | (a) Processo envelope do algoritmo MLB para a série de tráfego <i>lbl-pkt-5</i> , (b) Pacotes descartados ou marcados como baixa prioridade para a série de tráfego <i>lbl-pkt-5</i> utilizando o algoritmo MLB | 62 |
| 3.15 | P_b versus tamanho do <i>buffer</i> com o algoritmo MLB para as séries de tráfego (a) <i>Lord-III</i> , (b) <i>Foreman</i> e (c) <i>lbl-pkt-5</i> | 63 |
| 3.16 | Processos envelopes LB, FLB e MLB para série de tráfego (a) <i>Lord-III</i> , (b) <i>Foreman</i> e (c) <i>lbl-pkt-5</i> | 64 |
| 4.1 | Esquema proposto de escalonamento de pacote com policiamento de tráfego na direção <i>downlink</i> | 67 |
| 4.2 | Modelo da fila de transmissão no eNodeB | 69 |
| 4.3 | Funcionamento do modelo de balde furado | 70 |
| 4.4 | Modelo da fila de transmissão com policiamento na eNodeB | 70 |
| 4.5 | Ambiente de simulação de uma única célula com múltiplos usuários | 72 |
| 4.6 | Atraso para fluxos de vídeo com o escalonador M-LWDF | 77 |
| 4.7 | Atraso para fluxos de vídeo com o escalonador EXP/PF | 77 |
| 4.8 | Atraso versus número de usuários para fluxos de vídeo com velocidade de 3km/h | 77 |
| 4.9 | Perda de pacotes para fluxos de vídeo com o escalonador M-LWDF | 78 |
| 4.10 | Perda de pacotes para fluxos de vídeo com o escalonador EXP/PF | 78 |
| 4.11 | Perda de pacotes versus número de usuários para fluxos de vídeo com velocidade de 3km/h | 78 |

| | | |
|------|--|----|
| 4.12 | Vazão para fluxos de vídeo com o escalonador M-LWDF | 79 |
| 4.13 | Vazão para fluxos de vídeo com o escalonador EXP/PF | 79 |
| 4.14 | Vazão versus número de usuários para fluxos de vídeo com velocidade de 3km/h | 79 |
| 4.15 | Atraso para fluxos de vídeo com o escalonador M-LWDF | 80 |
| 4.16 | Atraso para fluxos de vídeo com o escalonador EXP/PF | 80 |
| 4.17 | Atraso versus número de usuários para fluxos de vídeo com velocidade de 120km/h | 80 |
| 4.18 | Perda de pacotes para fluxos de vídeo com o escalonador M-LWDF | 81 |
| 4.19 | Perda de pacotes para fluxos de vídeo com o escalonador EXP/PF | 81 |
| 4.20 | Perda de pacotes versus número de usuários para fluxos de vídeo com ve- locidade de 120km/h | 81 |
| 4.21 | Vazão para fluxos de vídeo com o escalonador M-LWDF | 82 |
| 4.22 | Vazão para fluxos de vídeo com o escalonador EXP/PF | 82 |
| 4.23 | Vazão versus número de usuários para fluxos de vídeo com velocidade de 120km/h | 82 |
| 4.24 | Atraso de pacotes para fluxos de VoIP com o escalonador M-LWDF | 83 |
| 4.25 | Atraso de pacotes para fluxos de VoIP com o escalonador EXP/PF | 83 |
| 4.26 | Atraso versus número de usuários para fluxos de VoIP com velocidade de 3km/h | 83 |
| 4.27 | Perda de pacotes para fluxos de VoIP com o escalonador M-LWDF | 84 |
| 4.28 | Perda de pacotes para fluxos de VoIP com o escalonador EXP/PF | 84 |
| 4.29 | Perda de pacotes versus número de usuário para fluxos de VoIP com velo- cidade de 3km/h | 84 |
| 4.30 | Vazão para fluxos de VoIP com o escalonador M-LWDF | 85 |
| 4.31 | Vazão para fluxos de VoIP com o escalonador EXP/PF | 85 |
| 4.32 | Vazão versus número de usuários para fluxos de VoIP com velocidade de 3km/h | 85 |
| 4.33 | Atraso de pacotes para fluxos de VoIP com o escalonador M-LWDF | 86 |
| 4.34 | Atraso de pacotes para fluxos de VoIP com o escalonador EXP/PF | 86 |
| 4.35 | Atraso versus número de pacotes para fluxos de VoIP com velocidade de 120km/h | 86 |
| 4.36 | Perda de pacotes para fluxos de VoIP com o escalonador M-LWDF | 87 |
| 4.37 | Perda de pacotes para fluxos de VoIP com o escalonador EXP/PF | 87 |
| 4.38 | Perda de Pacotes versus número de usuários para fluxos de VoIP com ve- locidade de 120km/h | 87 |
| 4.39 | Vazão para fluxos de VoIP com o escalonador M-LWDF | 87 |
| 4.40 | Vazão para fluxos de VoIP com o escalonador EXP/PF | 87 |
| 4.41 | Vazão versus número de usuários para fluxos de VoIP com velocidade de 120km/h | 88 |

Lista de Tabelas

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Larguras de banda suportada no LTE [35] | 38 |
| 2.2 | QCIs padronizados pelo 3GPP [13] | 40 |
| 3.1 | Características estatísticas básicas das séries de tráfego | 49 |
| 3.2 | Comportamento da perda de pacote para séries de tráfego sem policiamento e policiado com o algoritmo LB | 56 |
| 3.3 | Comportamento da perda de pacote para séries de tráfego sem policiamento e policiado com o algoritmo FLB | 59 |
| 3.4 | Comportamento da perda de pacote para séries de tráfego sem policiamento e policiado com o algoritmo MLB | 62 |
| 4.1 | Parâmetros de simulação para rede LTE <i>Downlink</i> | 73 |
| 4.2 | Tráfegos de simulação e requisito de QoS dos UEs | 74 |
| 4.3 | Distribuição do tipo de tráfego usado em [42], [48], [53] | 75 |
| 4.4 | Notações e descrições dos algoritmos usadas pelas simulações | 76 |

Lista de Acrônimos

| | |
|---------|---|
| 3GPP | <i>3rd Generation Partnership Project</i> |
| AM | <i>Acknowledged Mode</i> |
| AMC | <i>Adaptative Modulation and Coding</i> |
| ARP | <i>Allocation and Retention Priority</i> |
| ARQ | <i>Automatic Repeat reQuest</i> |
| BE | <i>Best Effort</i> |
| BSR | <i>Buffer Status Reporter</i> |
| CBR | <i>Constant Bit Rate</i> |
| CQI | <i>Channel Quality Indicator</i> |
| DCI | <i>Downlink Control Information</i> |
| EMM | <i>EPS Mobility Management</i> |
| eNodeB | <i>Evolved Node B</i> |
| E-UTRAN | <i>Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network</i> |
| EPC | <i>Evolved Packet Core</i> |
| EPS | <i>Evolved Packet System</i> |
| ESM | <i>ESS Session Management</i> |
| EXP/PF | <i>Exponential Proportional Fair</i> |
| fBm | <i>Fractional Brownian Motion</i> |
| FDD | <i>Frequency Division Duplex</i> |
| FDM | <i>Frequency division multiplexing</i> |
| FIFO | <i>First In First Out</i> |
| FLB | <i>Fractal Leaky Bucket</i> |
| GBR | <i>Guaranteed Bit Rate Bearer</i> |
| GSM | <i>Global System for Mobile Communications</i> |
| HARQ | <i>Hybrid Automatic Repeat reQuest</i> |
| HOL | <i>Head Of Line</i> |
| HSPA | <i>High-Speed Packet Access</i> |
| HSS | <i>Home Subscriber Server</i> |
| HTTP | <i>Hypertext Transfer Protoco</i> |
| IMS | <i>IP Multimedia Subsystem</i> |
| IP | <i>Internet Protocol</i> |
| LB | <i>Leaky Bucket</i> |
| LTE | <i>Long-Term Evolution</i> |
| LTE-Sim | <i>Long Term Evolution-Simulator</i> |

LISTA DE ACRÔNIMOS (cont.)

| | |
|---------|--|
| MAC | <i>Medium Access Control</i> |
| MAPM | <i>Multifractal Arrival Policing Mechanism</i> |
| MBR | <i>Maximun Bit Rate</i> |
| MCS | <i>Modulation and Coding Scheme</i> |
| ME | <i>Mobile Equipment</i> |
| MFBAP | <i>Multifractal Bounded Arrival Process</i> |
| MIMO | <i>Multiple-Input Multiple-Output</i> |
| M-LWDF | <i>Modified-Largest Weighted Delay First</i> |
| MLB | <i>Multifractal Leaky Bucket</i> |
| MME | <i>Mobility Management Entity</i> |
| non-GBR | <i>non-Guaranteed Bit Rate Bearer</i> |
| non-RT | <i>non-Real Time</i> |
| MT | <i>Mobily Termination</i> |
| NAS | <i>Non-Access-Stratum</i> |
| OFDM | <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i> |
| OFDMA | <i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i> |
| PCRF | <i>Policy Control and Charging Rules Function</i> |
| PDCP | <i>Packet Data Convergence Protocol</i> |
| PDCCH | <i>Physical Downlink Control Channel</i> |
| PDN | <i>Packet Data Network</i> |
| PDSCH | <i>Physical Downlink Shared Channel</i> |
| PF | <i>Proportional Fair</i> |
| P-GW | <i>Packet Data Network Gateway</i> |
| PHY | <i>Physical Layer</i> |
| QCI | <i>QoS Class Identifier</i> |
| QoS | <i>Quality of Service</i> |
| RB | <i>Resource Block</i> |
| RE | <i>Resource Element</i> |
| RLC | <i>Radio Link Control</i> |
| RR | <i>Round-Robin</i> |
| RRC | <i>Radio Resource Control</i> |
| RRM | <i>Radio Resource Management</i> |
| RT | <i>Real Time</i> |
| SC-FDMA | <i>Single Carrier Frequency Division Multiple Access</i> |
| SDF | <i>Service Data Flow</i> |
| S-GW | <i>Serving Gateway</i> |
| SIM | <i>Subscriber Identity Module</i> |
| SINR | <i>Signal-to-interference-plus-noise ratio</i> |
| SMS | <i>Short Message Service</i> |
| TE | <i>Terminal Equipment</i> |
| TDD | <i>Time Division Duplex</i> |
| TFT | <i>Traffic Flow Template</i> |
| TM | <i>Transparent Mode</i> |
| TTI | <i>Transmission Time Interval</i> |

LISTA DE ACRÔNIMOS (cont.)

| | |
|------|--|
| UE | <i>User Equipment</i> |
| UICC | <i>Universal Integrated Circuit Card</i> |
| UM | <i>Unacknowledged Mode</i> |
| UMTS | <i>Universal Mobile Telecommunication System</i> |
| VoIP | <i>Voice Over IP</i> |

Lista de Símbolos

| | |
|------------------|--|
| \bar{a}, ρ | Taxa média do tráfego de entrada. |
| \bar{a}_H | Média do expoente de <i>Hölder</i> . |
| $A(t)$ | Tráfego browniano fracionário. |
| $\hat{A}(t)$ | Processo envelope de tráfego browniano fracionário. |
| δ_i | Probabilidade máxima que o atraso $D_{HOL,i}$ exceda o tempo limite. |
| Δ | Intervalo de tempo. |
| D_i | Tamanho de bytes do pacote i . |
| $D_{HOL,i}$ | Atraso de pacotes HOL (Head of Line), isto é, o atraso do primeiro pacote a ser transmitido na fila de transmissão pelo fluxo i). |
| E_n | Sequência de teste. |
| H | Parâmetro de Hurst. |
| $H(t)$ | Expoente de Hölder. |
| J_n | Controle que o algoritmo exerce na sequência aleatória de entrada do sinal. |
| k | Constante relacionada a probabilidade ϵ do processo acumulativo real excede o processo envelope. |
| K_n | Límiar de decisão para E_n . |
| P_b | Taxa de <i>bytes</i> descartados. |
| $P(i)$ | Perda de <i>bytes</i> no sistema de transmissão. |
| $\sum Prx$ | Número total de pacotes recebidos. |
| $\sum Ptx$ | Número total de pacotes enviados. |
| $P_{HOL,i}$ | Atraso de token HOL (Head of Line) do balde furado no fluxo i . |
| $Q_{Dado,i}(t)$ | Número de pacotes acumulados na fila de transmissão do fluxo i no tempo t . |
| $Q_{P,i}(t)$ | Número de token acumulados no balde no fluxo i no tempo t . |
| r_i | Taxa de transmissão calculada em base no estado do canal. |
| $r_{i,j}$ | Taxa de dados instantânea disponível para o fluxo i no sub-canal j . |
| \bar{R}_i | Taxa média de dados no fluxo i . |
| $R_i(k)$ | Taxa de dados alcançada pelo fluxo i durante k TTI. |
| $\bar{R}_i(k-1)$ | Estimativa do anterior TTI. |
| S | Tamanho do balde. |
| σ | Desvio padrão do tráfego de entrada. |
| σ_H | Desvio padrão do expoente de <i>Hölder</i> . |
| T_f | Tempo da duração de fluxo. |
| T_{gi} | Tempo de geração do pacote i . |
| T_{chi} | Tempo de chegada do pacote i . |

LISTA DE SÍMBOLOS (cont.)

| | |
|-----------------|---|
| N_{rt} | Número de fluxos em tempo real ativo na direção <i>downlink</i> . |
| τ_i | Valor limite de atraso de pacote suportado pelo fluxo i . |
| $w_{i,j}$ | Métrica atribuída ao fluxo i no sub-canal j . |
| $w_{i,j}^{(p)}$ | Métrica atribuída ao fluxo i no sub-canal j com policiamento. |
| X_n | Tráfego de entrada. |
| $Z(t)$ | Movimento browniano fracionário. |

Trabalhos Aceitos e Publicados

- CCORIMANYA, Jeanette Quiñones; LING, Lee Luan. A Packet Scheduling Algorithm with Traffic Policing in LTE Networks. In: Brazilian Technology Symposium. Springer, Cham, 2017. p. 157-167.
- Ccorimanya, Jeanette Quiñones, and Lee Luan Ling. "Traffic control in the transmission queue of LTE system downlink based on policing algorithms."Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), 2017 IEEE XXIV International Conference on. IEEE, 2017.
- Ccorimanya, Jeanette Quinones, and Lee Luan Ling. "Algoritmo de Escalonamento de Pacote com Policiamento de Tráfego para Alocação de Recurso em Redes LTE Downlink."XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais-SBrT (2017): 3-6.
- CCORIMANYA, J. Q.; STENICO, J. W. G.; LUAN LING, Lee; Aplicação de Algoritmos de Policiamento de Tráfego na Análise de Desempenho em Downlink de Redes 4G, 10/2015, Científico Nacional, VI Simpósio de Processamento de Sinais da UNICAMP, pp.21-24, Campinas, SP, BRASIL, 2015.

Sumário

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Introdução | 22 |
| 2 | Conceitos Básicos | 26 |
| 2.1 | Introdução | 26 |
| 2.2 | Long Term Evolution - LTE | 26 |
| 2.3 | Arquitetura da Rede LTE | 28 |
| 2.3.1 | EPC | 28 |
| 2.3.2 | E-UTRAN | 30 |
| 2.3.3 | Equipamento do Usuário - UE | 31 |
| 2.4 | Protocolo de E-UTRAN | 32 |
| 2.4.1 | Protocolo de Interface Rádio | 32 |
| 2.4.1.1 | Subcamada PDCP | 33 |
| 2.4.1.2 | Subcamada RLC | 33 |
| 2.4.1.3 | Subcamada MAC | 34 |
| 2.4.1.4 | Controle de Recurso Rádio (RRC) | 34 |
| 2.4.1.5 | Sinalização dos protocolos (NAS) | 34 |
| 2.4.2 | Plano de Usuário entre UE e EPC | 35 |
| 2.4.3 | Plano de Controle entre UE e EPC | 35 |
| 2.5 | Camada Física (PHY) | 35 |
| 2.6 | Qualidade de Serviço (QoS) | 38 |
| 2.6.1 | Parâmetros de QoS | 39 |
| 2.7 | Alocação de Recursos na Transmissão Downlink | 40 |
| 2.7.1 | Principais Parâmetros de um Mecanismo de Alocação de Recursos | 42 |
| 2.7.2 | Escalonadores de Pacotes | 42 |
| 2.7.3 | Estratégias de Escalonadores de Pacotes | 44 |
| 2.7.3.1 | Algoritmo PF | 45 |
| 2.7.3.2 | Algoritmo M-LWDF | 46 |
| 2.7.3.3 | Algoritmo EXP/PF | 46 |
| 3 | Mecanismo de Policiamento de Tráfego | 48 |
| 3.1 | Introdução | 48 |
| 3.2 | Séries de Tráfego | 49 |
| 3.2 | Processo Envelope | 51 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.4 | Policramento de Tráfego | 52 |
| 3.4.1 | Balde Furado (LB) | 52 |
| 3.4.2 | Balde Furado Fractal (FLB) | 56 |
| 3.4.3 | Balde Furado Multifractal (MLB) | 59 |
| 3.5 | Comparação entre Processos Envelopes dos Algoritmos de Policramento . . . | 63 |
| 4 | Estratégia de Escalonamento de Pacote com Policramento de Tráfego em Rede LTE Downlink | 65 |
| 4.1 | Introdução | 65 |
| 4.2 | Trabalhos Relacionados | 66 |
| 4.2 | Esquema Proposto de Escalonamento de Pacotes Downlink | 67 |
| 4.3 | Algoritmo de Escalonamento Proposto | 68 |
| 4.5 | Cenários de Simulação | 71 |
| 4.5.1 | Ferramenta de Simulação | 72 |
| 4.5.2 | Ambiente de Simulação | 72 |
| 4.5.3 | Parâmetros de Simulação | 73 |
| 4.5.4 | Tráfego de Simulação | 74 |
| 4.5.5 | Métricas de Desempenho de Simulação | 74 |
| 4.5 | Resultados Experimentais | 75 |
| 4.6.1 | Cenário com Tráfego de Vídeo | 76 |
| 4.6.1.1 | Caso A - Usuários com velocidade pedestre de $3km/h$ | 76 |
| 4.6.1.2 | Caso B - Usuários com velocidade veicular de $120km/h$ | 78 |
| 4.6.2 | Cenários com Tráfego de VoIP | 82 |
| 4.6.2.1 | Caso A - Usuários com velocidade pedestre de $3km/h$ | 82 |
| 4.6.2.2 | Caso B - Usuários com velocidade veicular de $120km/h$ | 84 |
| 5 | Conclusões e Perspectivas | 89 |
| | Bibliografia | 91 |

Capítulo

1

Introdução

Nos últimos anos, a crescente demanda de dispositivos móveis que oferecem acesso à Internet provocou um aumento no volume de tráfego de dados em tempo real, assim como novos serviços incluindo vídeo *streaming*, televisão móvel e jogos interativos. Esta mudança exige uma resposta rápida do sistema de comunicação e chamou atenção para possíveis limitações da capacidade e qualidade de serviço (do inglês, *Quality of Service - QoS*), tornando-se necessário uma evolução avançada das redes sem fio. Nesse contexto, o setor de telecomunicações sem fio definiu uma nova interface aérea de comunicações móveis que fornece uma estrutura para serviços de banda larga de alta mobilidade e aumento na capacidade geral do sistema. Essa nova abordagem resultou no sistema LTE (do inglês, *Long-Term Evolution*) promovido pelo padrão de comunicação 3GPP (do inglês, *3rd Generation Partnership Project*). O LTE é uma tecnologia cuidadosamente projetada para oferecer altas taxas de dados, baixa latência e acesso de rádio otimizado por pacotes [4].

O sistema LTE abrange rádios com diferentes capacidades de processamento para a transmissão de dados dos usuários, envolvendo três principais unidades: UE (*User Equipment*), EPC (*Evolved Packet Core*) e E-UTRAN (*Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) possuindo uma única entidade eNodeB (*Evolved Node B*). Cada UE é responsável por enviar e receber dados de uma eNodeB, e esta eNodeB encaminha os dados para a próxima etapa do sistema de transmissão EPC. Cada eNodeB pode receber os dados de diversos UEs, desde que não exceda o limite da capacidade de processamento de dados da unidade.

O sistema LTE emprega a tecnologia OFDM (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*), baseada no princípio da divisão de uma única banda larga em múltiplas subportadoras ortogonais, sendo as informações transmitidas de forma paralela, permitindo um gerenciamento flexível dos recursos de rádio. A troca de informações transmitidas entre um UE e uma eNodeB é realizada via dois canais conhecidos como enlace de descida (do inglês, *downlink*) e enlace de subida (do inglês, *uplink*). Os dados transmitidos no canal *downlink* no sistema LTE utiliza o esquema da multiplexação OFDMA (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), permitindo melhorias significativas na alocação de recursos de rádio, enquanto os dados transmitidos no canal *uplink* utiliza o esquema da única portadora SC-FDMA (do inglês, *Single Carrier Frequency Division*

Multiple Access) [2], [40].

O eNodeB é responsável pelas principais funcionalidades de gerenciamento de recursos rádio RRM (do inglês, *Radio Resource Management*). Assim, dentre todas as funcionalidades tem-se a alocação dinâmica de recursos de rádio, necessário para a transmissão de dados para os UEs e realizada a cada intervalo de tempo de transmissão TTI (do inglês, *Transmission Time Interval*) nos canais *downlink* e *uplink*. Esta função de alocação de rádio é executada pelo escalonador de pacotes (do inglês, *Packet Scheduler*) o qual tem sido amplamente explorado e aperfeiçoado para melhorar o desempenho do sistema LTE [36].

Um escalonador de pacote eficiente deve ser versátil e capaz de manter um alto nível de desempenho do sistema LTE. Em vista disso, é imprescindível que o escalonador tenha conhecimentos e capacidades de processar todos os tipos de serviços suportados pela rede [28], incluindo Vídeo *streaming*, VoIP, HTTP, etc., mantendo seus respectivos requisitos de QoS. Quando o procedimento de alocação de recursos não for executado na forma eficiente, vários serviços na rede podem ter suas QoS degradadas.

O LTE possui uma arquitetura de rede padronizada pelo 3GPP [4], que busca melhorar a utilização dos recursos de rádio disponível entre diferentes usuários em relação a seus antecessores UMTS (*Universal Mobile Telecommunications System*) e HSPA (*High-Speed Packet Access*). O 3GPP não especifica explicitamente uma técnica ou estratégias de escalonamento de pacotes para alocar recursos disponíveis na rede, deixando a tarefa para provedores tomarem suas próprias decisões em relação a isso. O escalonamento de pacotes tem sido amplamente estudado de forma geral em sistemas LTE, e tem sido um desafio para encontrar a melhor forma de realizar a alocação de recursos para os usuários do sistema LTE de maneira justa e simultaneamente garantir a QoS para transmissões *downlink*.

Nesse sentido, existem muitos trabalhos de pesquisa propostos e estudados pela comunidade acadêmica sobre o escalonamento de pacotes no sistema LTE na transmissão *downlink*, simulado com a ferramenta LTE-Sim. As abordagens consideradas nos trabalhos são diversas, entre elas temos os trabalhos orientados a maximizar a taxa de transferência obtida pelos usuários usando a condição do canal para cada usuário [50], [21], [38]. As técnicas orientadas a minimizar os atrasos de transmissão dos pacotes, tendo em conta os fatores de prioridade do determinado serviço e o estado da fila de cada usuário, são estudadas em [42], [48], [66]. Uma quantidade considerável de trabalhos avaliaram o desempenho dos principais escalonadores de pacotes na transmissão *downlink*, entre eles temos [22], [24], [31], [37], [45], [46], [55], [64], [65]. Todos os trabalhos tem como finalidade de fornecer resultados que ajudem os novos projetos de escalonamento de pacotes no sistema LTE, visando obter o melhor nível de desempenho dos usuários e garantir a qualidade de serviço requisitada (QoS).

Pode-se afirmar que a taxa de transferência e o atraso dos pacotes são dois requisitos essenciais para transmissões de recursos em redes sem fio que devem ser considerados no processo de escalonamento de recursos em redes móveis. Devido a uma possível correlação confrontante entre estes dois requisitos no seu procedimento de otimização, o principal desafio tem sido distribuir os recursos de transmissão entre os usuários visando uma melhor relação entre a taxa de transferência e o atraso de pacotes. Este desafio deve

ser adequadamente solucionado mesmo em cenários com uma sobrecarga de número de usuários.

Esta dissertação apresenta um esquema de alocação de recursos para o sistema LTE *downlink*, visando melhorar o desempenho de dois algoritmos de escalonamento M-LWDF (do inglês, *Modified-Largest Weighted Delay First*) e EXP/PF (do inglês, *Exponential Proportional Fair*) para aplicações de serviços multimídia. O esquema proposto implementa um conjunto de ferramentas de policiamento de tráfego, conhecidas como reguladores de balde furado (do inglês, *Leaky Bucket* - LB) e utilizada para regular fluxos de tráfego possivelmente em rajadas provenientes de aplicações de serviços de rede. Conjuntamente estes reguladores são implementados com os algoritmos de escalonadores de pacotes convencionais (M-LWDF e EXP/PF) que executam decisões de escalonamento com base nos atrasos atuais dos pacotes em cada fila de transmissão dentro do eNodeB, com o objetivo de minimizar o atraso do pacote do sistema LTE e manter uma performance desejável. Ainda comparamos o desempenho desses algoritmos de escalonamento com base nos parâmetros de qualidade de serviço para fluxos de tráfego de serviços em tempo real, como fluxos de tráfego de vídeo e VoIP (do inglês, *Voice Over IP*), em termos de atraso de pacotes, taxa de perda de pacotes e vazão média.

Organização da Dissertação

Além deste capítulo introdutório, a dissertação está organizada com os demais capítulos da seguinte forma.

O capítulo 2 apresenta os conceitos básicos do sistema LTE, começando com as principais características da rede LTE. Em seguida, são ilustrados os principais componentes da arquitetura da rede LTE. Além disso, descreve-se as pilhas de protocolos que envolvem primeiramente as subcamadas existentes na interface rádio e completando com a descrição da camada física. Em seguida, apresenta-se os principais conceitos de qualidade de serviço da rede LTE. Na seção de alocação de recursos na transmissão *downlink*, descreve-se os principais parâmetros de alocação de recursos. Ainda, aborda-se a funcionalidade do escalonador de pacote. No final do capítulo são descritas as principais estratégias de escalonamento na transmissão *downlink* presentes na literatura e utilizadas como referência neste trabalho.

O capítulo 3 descreve os mecanismos de policiamento de tráfego utilizados nesta dissertação. Inicialmente, apresenta-se as séries de tráfegos utilizados como referência nas análises. Além disso, define-se os processos envelopes. Em seguida, são descritos os principais mecanismos de policiamentos de tráfegos amplamente divulgados na literatura assim como o balde furado (*Leaky Bucket* - LB), balde furado fractal (*Fractal Leaky Bucket* - FLB) e balde furado multifractal (*Multifractal Leaky Bucket* - MLB). No final deste capítulo, compara-se o desempenho dos três mecanismos de policiamento de tráfego acima mencionados.

O capítulo 4 propõe a estratégia de escalonamento de pacotes em redes LTE na transmissão *downlink* que se concentram em serviços de tempo real baseado em policiamento de tráfego a fim de melhorar a qualidade de serviço na rede LTE. Inicialmente, são descritas as principais revisões bibliográficas relacionadas as técnicas de escalonamento de pacotes

e policiamento de tráfego. Em seguida, descreva-se o esquema de escalonamento de pacote proposto na transmissão *downlink*. Posteriormente, são detalhados os algoritmos de escalonamento proposto. Em seguida, apresenta-se os cenários de Simulação. Finalmente, ilustra-se os resultados experimentais.

Finalmente o capítulo 5 apresenta as conclusões finais desta dissertação, assim como as perspectivas para futuros trabalhos.

Capítulo 2

Conceitos Básicos

2.1 Introdução

Neste capítulo apresenta-se uma visão geral da tecnologia LTE (do inglês, *Long-Term Evolution*) que é considerado como a evolução das redes de terceira geração UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) e GSM (*Global System for Mobile Communications*). Inicialmente serão apresentadas as principais características da tecnologia LTE. Em seguida, descreveremos a arquitetura geral da rede LTE, detalhando os conceitos dos elementos principais tais como o núcleo da rede, rede de acesso a rádio e o equipamento de usuário. Na seção de protocolos de rede de acesso a rádio detalharemos as pilhas de protocolos que envolvem as subcamadas de enlace de dados: PDCP (*Packet Data Convergence Protocol*), RLC (*Radio Link Control*) e MAC (*Medium Access Control*), finalizando com a descrição da camada física (do inglês, *Physical* - PHY) que está intimamente relacionada com o desempenho da estratégia da alocação de recursos empregada. Ainda, aborda-se os principais conceitos de qualidade de serviço (do inglês, *Quality of Service* - QoS) em LTE. Na seção de alocação de recursos na transmissão *downlink*, descreve-se os principais parâmetros de alocação de recursos. Posteriormente aborda-se os escalonadores de pacotes. O capítulo termina com uma apresentação de estratégias de escalonadores de pacotes existentes na literatura, descrevendo os conceitos do algoritmo PF (do inglês, *Proportional Fair*), algoritmo M-LWDF (do inglês, *Modified Largest Weighted Delay First*) e algoritmo EXP/PF (do inglês, *Exponential Proportional Fair*).

2.2 Long Term Evolution - LTE

O LTE é um padrão de comunicação que foi proposto pelo 3GPP, para melhorar as especificações do sistema de comunicação móvel de terceira geração UMTS. Sua criação no meado de 2004, foi motivada pelo incremento na demanda de serviços de telecomunicações móveis de banda larga, que requer altas taxas de transmissão de dados e melhor qualidade de serviço. Em 2008 a primeira versão do LTE foi documentada no *Release 8* das especificações 3GPP, com uma interface de rádio e uma rede central completamente nova, permitindo um desempenho de transmissão de dados consideravelmente melhorado em comparação com os sistemas anteriores. Todas as versões futuras das especificações

3GPP tentam melhorar a tecnologia LTE (vide Figura 2.1).

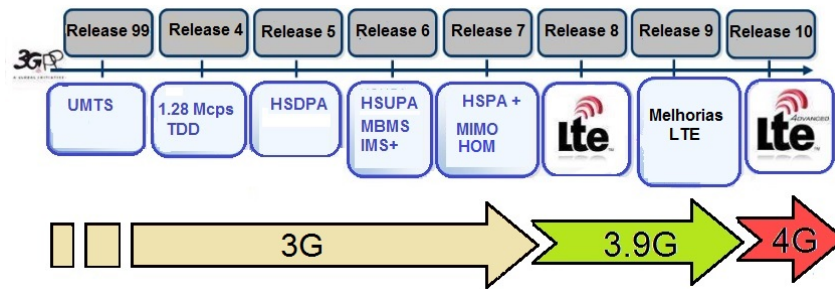


Figura 2.1: Evolução dos padrões de 3GPP.

O sistema LTE foi projetado para ser competitivo com suas premissas bastante ambiciosas, possuindo as seguintes principais características e requisitos [4]:

- **Suporta alta taxa de transmissão de dados:** a tecnologia LTE (*Release 8* da 3GPP) passou a ser a tecnologia de comunicação móvel com o crescimento mais rápido de todos os tempos. Os equipamentos de usuário final comercialmente disponíveis suportam no máximo 100 Mbps em transmissão *downlink* e até 50 Mbps em transmissão *uplink*, com uma largura de banda escalonável de até 20 MHz respectivamente, sendo capaz de suportar interatividade em tempo real;
- **Controle de latência:** os requisitos de latência são encontrados tanto no plano de controle quanto no plano de usuário [11]. A latência no plano de controle foi reduzida para um tempo de transição menor que 100 ms do modo inativo (do inglês, *Idle-Mode*¹) para o modo ativo. A latência no plano de usuário é definida como o tempo de propagação de ida e volta desde a camada IP até o núcleo da rede, permitindo uma latência menor a 5 ms, sendo capaz de suportar *web browsing*, FTP², vídeo *streaming* (multimídia e vídeo por demanda), VoIP e jogos *online*;
- **Suporte de mobilidade:** suportar mobilidade entre redes celulares de baixa mobilidade (de 0 km/h até 15 km/h), de alta mobilidade (de 15 km/h até 120 km/h) e de muito alta mobilidade (de 120 km/h até 350 km/h);
- **Largura de banda do canal:** suporta canais para faixas de 1,4 MHz, 3 MHz, 5 MHz, 10 MHz, 15 MHz e 20 MHz. A rede LTE possui uma capacidade de suportar até 200 usuários em um canal de largura de banda de 5 MHz e até 400 usuários em um canal de 20 MHz;
- **Espectro:** a rede LTE opera em dois modos de multiplexação TDD (do inglês, *Time Division Duplex*) e FDD (do inglês, *Frequency Division Duplex*). No modo FDD, requer bandas emparelhadas, uma para *downlink* e outra para o *uplink*. No modo TDD, o espectro é compartilhado, uma vez que o *downlink* e *uplink* estão em uma única frequência, mas separados no tempo;

¹*Idle-Mode*: Traduzido como “modo inativo” é um estado em que o telefone não tem conectividade de rede e os aplicativos estão temporariamente suspensos.

²FTP (do inglês, *File Transfer Protocol*): protocolo que foi criado para realizar a transferência de arquivos entre computadores na Internet, possibilitando *download* e *upload* de arquivos.

- **Maior cobertura:** entre 5 *km* e 100 *km*;
- **Interoperabilidade** com redes 3GPP e redes não-3GPP;
- **Técnicas MIMO** (do inglês, *Multiple-Input Multiple-Output*): oferece maior confiabilidade e capacidade de serviços de banda larga móvel;
- **Qualidade de Serviço:** a tecnologia LTE opera em uma arquitetura baseada em todo IP (*all-IP*³) e permite que o LTE ofereça suporte à Qualidade de Serviço (QoS) para aplicações em tempo real, como VoIP e *streaming* de vídeo ao vivo.

2.3 Arquitetura da Rede LTE

A rede LTE traz uma nova arquitetura bastante diferente da que vinha sendo utilizada em tecnologias anteriores [25]. Além disso, suporta serviços através da comutação por pacotes IP (*Internet Protocol*), deixando para trás a comutação de circuito das tecnologias anteriores [68].

A arquitetura geral do sistema LTE está dividida principalmente por três componentes como mostra a Figura 2.2: o núcleo da rede EPC (do inglês, *Evolved Packet Core*), a rede de acesso via rádio E-UTRAN (do inglês, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) sendo que os dois compõem o que hoje se conhece como EPS (do inglês, *Evolved Packet System*); e finalmente o equipamento do usuário UE (do inglês, *User Equipment*) fazendo a interface aérea entre o usuário e a rede LTE [35]. Estes componentes são projetados para suportar todos os tipos de serviços de telecomunicações, usando mecanismos de comutação de pacotes entre os equipamentos de usuários (UE) e as redes de pacotes externas PDN (do inglês, *Packet Data Network*), tais como a rede Internet. Em seguida, detalhamos cada um dos três componentes da arquitetura LTE.

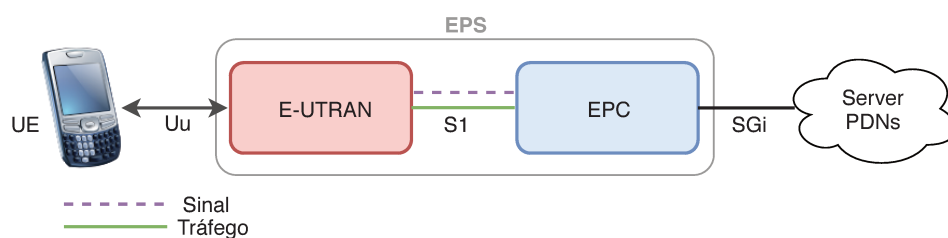


Figura 2.2: Arquitetura geral do sistema LTE [35]

2.3.1 EPC

O núcleo da rede ou simplesmente EPC (do inglês, *Evolved Packet Core*) do sistema LTE, foi introduzido pela primeira vez em *Release 8* do padrão 3GPP. O EPC é responsável pelo controle geral do UE e pelo estabelecimento dos portadores (do inglês, *bearer*).

A Figura 2.3 mostra uma arquitetura do EPC composta por três entidades funcionais: a entidade de gerenciamento de mobilidade MME (do inglês, *Mobility Management*

³all-IP: termo utilizado para definir uma tecnologia baseada completamente em IP (comutação de pacotes IP).

Entity), o *gateway* de serviço S-GW (do inglês, *Serving Gateway*) e o *gateway* de rede de dados P-GW (do inglês, *Packet Data Network Gateway*). Além dessas entidades, adicionam-se também o HSS (do inglês, *Home Subscriber Server*) e PCRF (do inglês, *Policy Control and Charging Rules Function*), em conjunto constituem os elementos básicos para prover serviços de conectividade IP entre os UEs, conectados através da rede de acesso rádio E-UTRAN e redes externas. A interligação entre a rede E-UTRAN e EPC é através da interface S1, mais especificamente para a entidade MME por meio da interface S1-MME que suporta o plano de controle, enquanto, a interface S1-U que suporta o plano de usuário conecta com o S-GW. Por outro lado, a interligação do EPC com redes externas ou plataformas de serviço IMS (do inglês, *IP Multimedia Subsystem*), realiza-se através do P-GW por meio da interface SGi. Internamente P-GW conecta-se com S-GW através da interface S5/S8 [12], [19], [20], [25], [35].

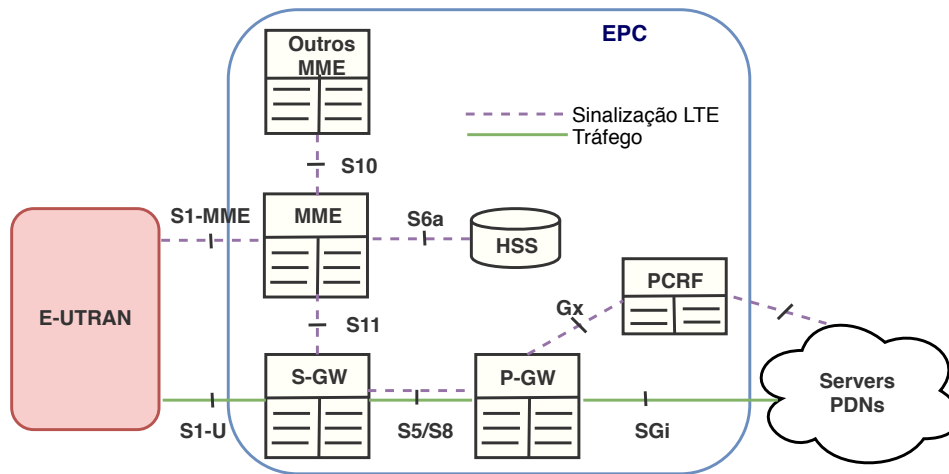


Figura 2.3: Arquitetura EPC [35]

As funções de cada entidade encontrada na arquitetura do EPC são descritas brevemente abaixo:

- **Mobility Management Entity (MME)**, o MME age no plano de controle e é responsável pela sinalização relacionada a mobilidade do usuário (UE) e segurança, incluindo autenticação, estabelecimento de conexões, suporte ao *handover*⁴ entre diferentes eNodeBs e entre diferentes tecnologias (por exemplo, GSM, UMTS). O MME também é responsável pelo rastreamento e pela paginação do UE no modo inativo (do inglês, *Idle-Mode*). O MME se conecta a eNodeB através da interface S1-MME, controla as funções de transferência no plano de usuário da rede LTE através da interface S11 via o S-GW. Além disso, o MME pode estar conectado com a entidade HSS através da interface S6a para acessar a informação associada aos usuários da rede autorizados para estabelecer a conexão (vide Figura 2.3).
- **Serving Gateway (S-GW)**, atua como um roteador e encaminha os pacotes IP no plano de usuário. Ele transporta o tráfego de dados IP entre o equipamento do

⁴Handover: é considerado como a transferência de conexão do usuário de um canal de rádio para outro.

usuário (UE) e as redes externas. O S-GW gerencia as informações de contexto relacionadas ao UE no modo inativo e gera solicitações de paginação quando os dados chegam para o UE para transmissão *downlink*.

- **Packet Data Network Gateway (P-GW)**, é responsável pela alocação de endereço IP para os usuários, bem como pela aplicação de QoS e cobrança baseada em fluxo de acordo com as regras do PCRF. O P-GW é também responsável pela filtragem de pacotes IP do usuário de transmissão *downlink* nas diferentes portadoras, baseadas no QoS. Isso é feito com base em modelos de fluxo de tráfego TFT (do inglês, *Traffic Flow Template*). Também é responsável pela conectividade com outras redes externas possivelmente com tecnologias não-3GPP.
- **Home Subscription Server (HSS)**, é responsável por armazenar os perfis de assinatura dos usuários para serem posteriormente utilizados na autenticação de UE.
- **Policy Control and Charging Rules Function (PCRF)**, é o único ponto de controle de QoS em função das políticas da rede. Ela é responsável por formular regras de política de controle a partir dos detalhes técnicos dos fluxos de dados de serviços SDF (do inglês, *Service Data Flow*) que serão aplicados aos serviços de rede requisitados pelo usuário. A execução dessas regras é realizada pelo P-GW.

2.3.2 E-UTRAN

A rede de acesso via rádio ou E-UTRAN (do inglês, *Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network*) do LTE, foi introduzida pela primeira vez em *Release 8* do padrão 3GPP. A Figura 2.4 ilustra a arquitetura da rede E-UTRAN via a rede de entidades denominadas de eNodeB (do inglês, *Evolved Node B*), ou também conhecidas como estações de rádio base [12].

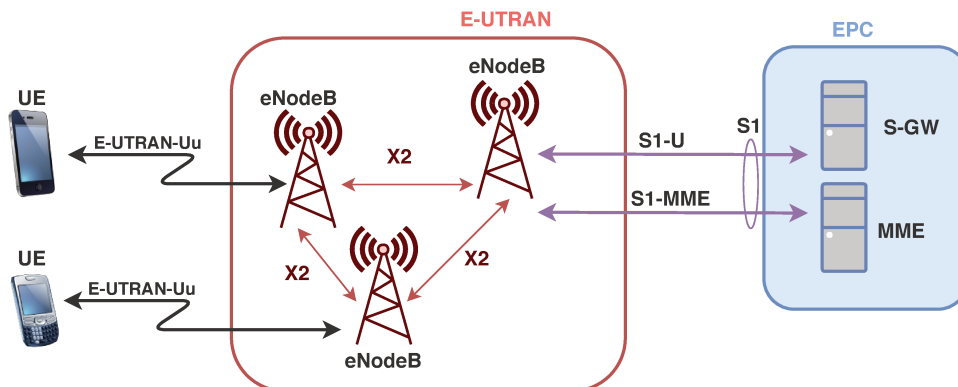


Figura 2.4: Arquitetura de E-UTRAN [12]

O eNodeB é responsável por todas as funções e protocolos de comunicação necessários para realizar o envio de dados e controle do funcionamento da interface rádio LTE [12].

A interligação com os equipamentos de usuário (UE) e a rede núcleo (EPC) são realizadas por meio das interfaces E-UTRAN-Uu e S1, respetivamente [23], [12]. A interface

E-UTRAN-Uu, também chamada de LTE-Uu ou simplesmente interface de rádio LTE, permite a transferência de informação de dados pelo canal de rádio em direção *downlink* e *uplink* entre eNodeBs e UEs [35], [18].

O eNodeB está conectado ao núcleo de rede (EPC) através da interface S1, mais especificamente para o MME, através da interface S1-MME que suporta o plano de controle e o S-GW por meio da interface S1-U como suporte do plano de usuário. Além disso, internamente os eNodeBs estão normalmente conectados entre si por meio da interface X2. Através desta interface X2 os eNodeBs trocam mensagens de sincronização destinadas a permitir uma gestão mais eficiente do uso de recursos de rádio, assim como, o tráfego dos usuários do sistema LTE quando estes se deslocam de uma estação para outra estação durante o processo de *handover*, [11], [10], [23].

2.3.3 Equipamento do Usuário - UE

O equipamento do usuário UE (do inglês, *User Equipment*) do sistema LTE permite que os usuários acessem os serviços da rede através da interface rádio Uu. A Figura 2.5 mostra a arquitetura interna do UE que contém dois elementos básicos: os cartões inteligentes UICC (do inglês, *Universal Integrated Circuit Card*) e o equipamento móvel ME (do inglês, *Mobile Equipment*). O equipamento ME possui duas entidades funcionais: MT (do inglês, *Mobile Termination*) e TE (do inglês, *Terminal Equipment*) [35], [5]. Estes elementos possuem as seguintes funcionalidades:

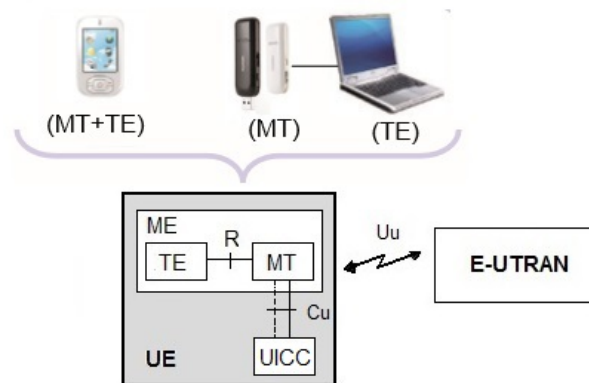


Figura 2.5: Arquitetura interna de UE [5]

- **Universal Integrated Circuit Card -(UICC)**, é um cartão inteligente, conhecido como o cartão SIM (*Subscriber Identity Module*) para equipamentos LTE, que providencia as subscrições dos usuários na rede 3GPP.
- **Mobile Equipment - (ME)**, é o dispositivo móvel de comunicação.
- **Mobile Termination - (MT)**, é a terminação móvel que lida com todas as funções de comunicação. O MT poderia ser um cartão LTE plug-in para um laptop.
- **Terminal Equipment - (TE)**, é o equipamento que termina a linha de transmissão. O TE poderia ser o laptop conectado ou um smartphone.

2.4 Protocolo de E-UTRAN

As pilhas de protocolos usadas nas interfaces de acesso rádio E-UTRAN (Uu, S1 e X2) estrutura-se em torno a dois grupos: plano de usuário e plano de controle.

O plano de usuário envolve um grupo de protocolos usados para enviar o tráfego (pacotes IP) correspondente a um serviço que um UE acessa através da rede. Enquanto que, o plano de controle refere-se aos protocolos necessários para manter as funções e procedimentos nas diferentes interfaces. A seguir detalham-se os protocolos utilizados nas diferentes interfaces de acesso rádio [11].

2.4.1 Protocolo de Interface Rádio

O envio de pacotes IP entre a *eNodeB* e o equipamento de usuário (UE) através da interface rádio LTE-Uu é baseado numa pilha de protocolos que envolvem a camada de enlace de dados e a camada física. Na camada de enlace de dados encontra-se subdividida em três subcamadas: protocolo de convergência de dados PDCP (do inglês, *Packet Data Convergence Protocol*), o controle de enlace de rádio RLC (do inglês, *Radio Link Control*) e o controle de acesso ao meio MAC (do inglês, *Medium Access Control*). A Figura 2.6 mostra a pilha de protocolos da interface de rádio do LTE [12] e a Figura 2.7 apresenta com mais detalhes uma visão da arquitetura de protocolo da interface rádio do LTE para o plano de usuário na direção *downlink* [36].

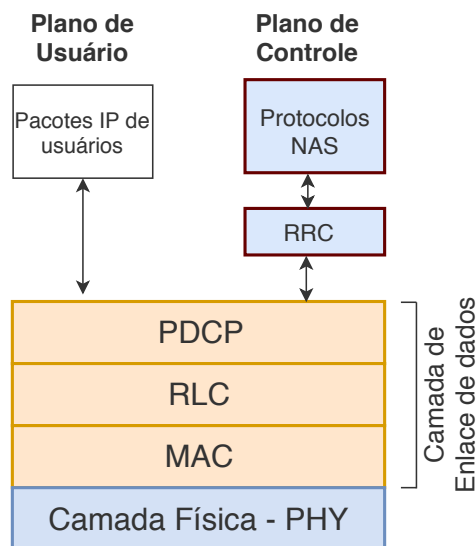


Figura 2.6: Protocolo de interface rádio [12]

Cada subcamada da pilha de protocolos de interfaces de E-UTRAN executa um conjunto de funções concretas e define o formato dos pacotes de dados (cabecinhos e dados de informação) trocados entre entidades de equipamento remotos.

Descreveremos as principais funções de cada uma das subcamadas PDCP/RLC/MAC que são comuns nos planos de usuário e de controle, mostradas nas Figuras 2.6 e 2.7. Além disso, descreveremos os protocolos RRC/NAS presentes no plano de controle (vide Figura 2.6) [68], [36].

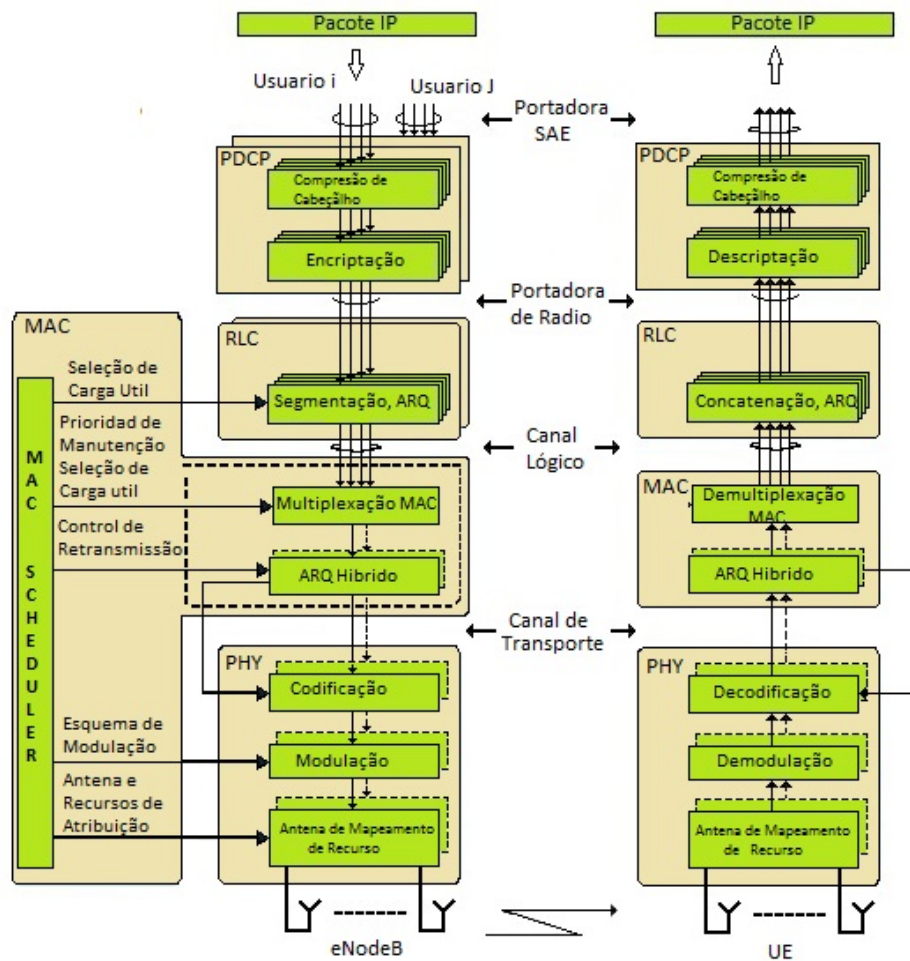


Figura 2.7: Arquitetura de protocolo da interface rádio do LTE (*Downlink*) [36]

2.4.1.1 Subcamada PDCP

A subcamada do protocolo de convergência de dados PDCP (do inglês, *Packet Data Convergence Protocol*) suporta as seguintes principais funções: compressão e descompressão do cabeçalho dos pacotes IP, transferência da dados do plano de usuário. O cabeçalho adicionado pela subcamada PDCP contém um número de seqüências que permite fazer ordenação dos pacotes IP na recepção, detetando possível duplicação de pacotes IP [14], [23], [36].

2.4.1.2 Subcamada RLC

A subcamada de controle de enlace de rádio RLC (do inglês, *Radio Link Control*), é responsável pelo envio confiável dos pacotes da subcamada superior PDCP entre o eNodeB e UE através das tarefas de segmentação, concatenação e remontagem, suporta funções de correção de erros mediante mecanismos ARQ (do inglês, *Automatic Repeat reQuest*) [12], [7].

As principais funções executadas pela subcamada RLC são realizadas por entidades chamadas de RLC *Entities* que podem operar nos seguintes modos [68]:

- **Modo Transparente** (*Transparent Mode - TM*), usado principalmente para trocar mensagens de configuração, uma vez que não utiliza *overhead*.
- **Modo não confirmado** (*Unacknowledged Mode - UM*), usado principalmente para fluxos do tipo VoIP, que são tolerantes a erros e atrasos sensíveis, mas ainda requer outras funções como entrega em sequência e detecção de duplicados.
- **Modo Confirmado** (*Acknowledged Mode - AM*): tem como principal funcionalidade a retransmissão. Dessa forma é utilizado por serviços que são tolerantes a atrasos, mas não a perdas.

2.4.1.3 Subcamada MAC

A subcamada de controle de acesso ao meio MAC (do inglês, *Medium Access Control*), controla o acesso das camadas superiores ao meio de comunicação através da camada física (PHY Layer). A subcamada MAC suporta funções de escalonamento dinâmico entre equipamentos de usuários (UE) atendendo as prioridades, realiza correção de erros através do protocolo HARQ (do inglês, *Hybrid Automatic Repeat reQuest*). A subcamada MAC oferece serviços de transferência de dados a subcamada de cima RLC através dos canais lógicos e a camada física (PHY Layer) através dos canais de transporte [23], [36], [16].

2.4.1.4 Controle de Recurso Rádio (RRC)

Encontra-se o protocolo de controle de recursos rádio RRC (do inglês, *Radio Resource Control*) no plano de controle da interface rádio do LTE entre o UE e a eNodeB (vide Figura 2.6). Entre os principais serviços e funções do protocolo RRC destacam-se: os mecanismos de gestão dos serviços de rádio *bearer* (estabelecimento, configuração, manutenção e libertação de sinalização e rádio *bearer* ponto a ponto), função da segurança incluindo gerenciamento de chaves, suporte de funções de mobilidade (sinalização de *handover*), difusão de parâmetros do sistema (*broadcast*) e funções de aviso dos terminais que não dispõem de uma conexão RRC estabelecida (envio de avisos a través do canal de *paging*) [17].

2.4.1.5 Sinalização dos protocolos (NAS)

Os protocolos NAS (do inglês, *Non-Access Stratum*) são um conjunto de protocolos EMM (do inglês, *EPS Mobility Management*) e ESM (do inglês, *ESS Session Management*) localizados na camada mais alta do plano de controle e é utilizado para transmissão da sinalização não rádio entre o UE e o MME do EPC (vide Figura 2.6). As principais funções dos protocolos NAS são: conexão de rede, autenticação e gestão da mobilidade e gerência de *bearers*. A segurança NAS é uma função adicional do NAS que fornece serviços para os protocolos NAS, por exemplo proteção de integridade e codificação de mensagens de sinalização NAS [8].

2.4.2 Plano de Usuário entre UE e EPC

A Figura 2.8 apresenta a pilha de protocolos no plano de usuário de E-UTRAN para a transferência de pacotes IP entre o UE e S-GW do EPC. Os pacotes IP contêm a informação de serviço dos usuários (voz, vídeo e dados) assim como a sinalização a níveis de aplicação. O eNodeB realiza funções de “relay” entre a pilha de protocolo PDCP/RLC/MAC/PHY da interface rádio e a pilha de protocolos da interface S1-U. É importante destacar que o eNodeB não realiza nenhuma decisão de encaminhamento a partir da informação contida nos cabeçalhos IP dos pacotes de usuários, apenas transferência de dados entre as duas interfaces atendendo aos serviços portadores estabelecidos.

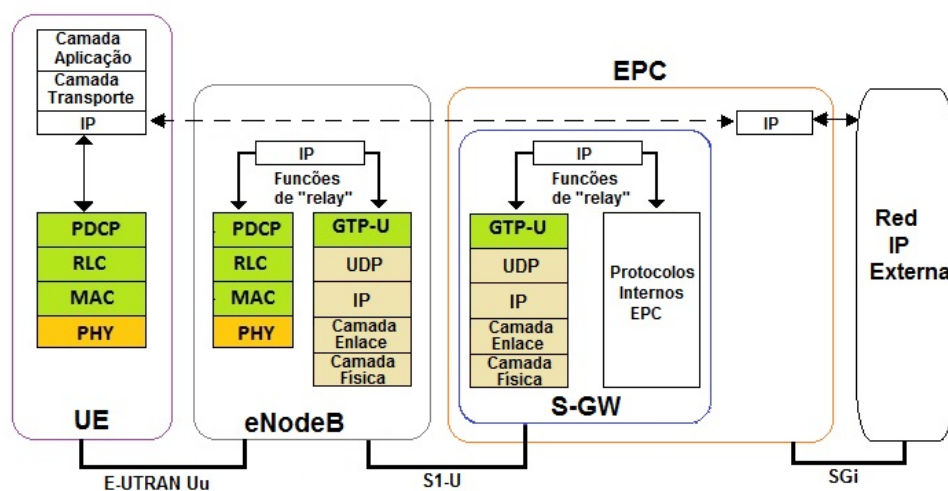


Figura 2.8: Protocolo de plano de usuário

2.4.3 Plano de Controle entre UE e EPC

A Figura 2.9 mostra a pilha de protocolos no plano de controle para o envio de sinalização NAS entre o equipamento de usuário UE e MME do núcleo da rede EPC. Os protocolos NAS são transportados encapsulados dentro de mensagens RRC através da interface de rádio E-UTRAN-Uu e dentro de mensagens S1-AP (do inglês, *S1 Application Protocol*) por meio da interface S1-MME. O eNodeB realiza as funções de “relay” necessárias entre ambas pilhas de protocolos.

2.5 Camada Física (PHY)

A camada física PHY (do inglês, *Physical Layer*) é um meio altamente eficiente que transmite dados e informações de controle entre a eNodeB e UEs. Além disso, oferece serviços de transporte de dados para camadas mais altas através do uso de canal de transporte. As características mais importantes da camada PHY são: o uso da técnica OFDM (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e dois métodos de duplexação como estrutura de *frame* de rádio (TDD e FDD). O TDD (do inglês, *Time Division Duplex*) usa um mesmo canal de radiofrequência que é alocado em *time slots* diferentes para

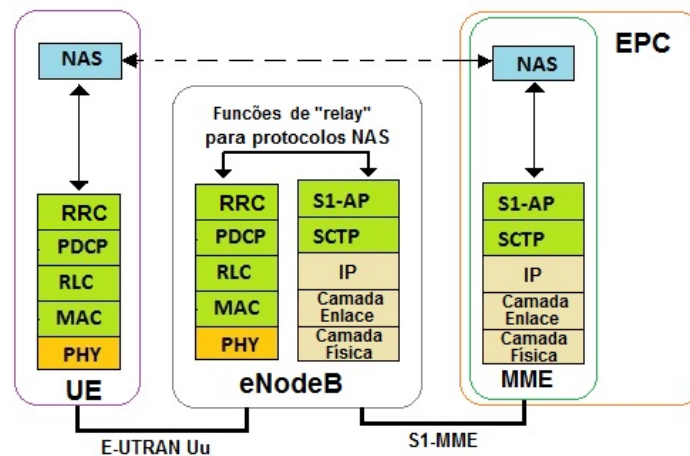
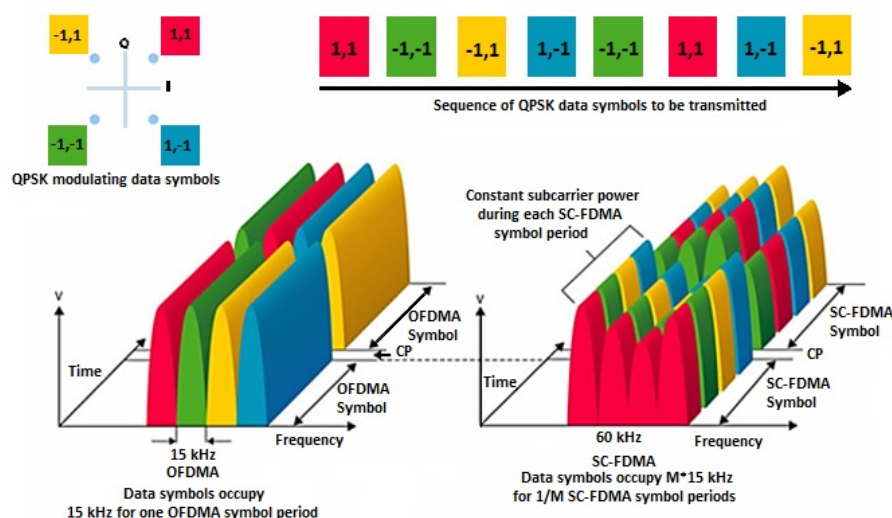


Figura 2.9: Protocolo de plano de controle

transmissões diferentes, enquanto o FDD (do inglês, *Frequency Division Duplex*) utiliza duas bandas emparelhadas uma para *downlink* e o seguinte para transmissão *uplink* [3].

O OFDM é uma técnica de transmissão baseada na idéia da técnica FDM (do inglês, *Frequency Division Multiplexing*) que divide o canal em várias subportadoras ortogonais mais estreitas com as mesmas larguras de banda, permitindo a transmissão dos dados em fluxos paralelos, atribuídos para um mesmo UE a cada instante de tempo. A técnica OFDM possui várias vantagens tais como elevada eficiência espectral, robustez ao desvanecimento multi-percurso e redução da interferência entre símbolos [2].

O 3GPP em *Release 8* padronizou dois esquemas de acesso múltiplo, os quais são: a técnica OFDMA (do inglês, *Orthogonal Frequency Division Multiple Acces*) para transmissão *downlink* desde eNodeB para o UE e SC-FDMA (do inglês, *Single Carrier Frequency Division Multiple Acces*) na transmissão *uplink* desde UE para eNodeB [3] [2] como mostra a Figura 2.10.

Figura 2.10: Comparação das técnicas de acesso múltiplo, OFDMA para *downlink* e SC-FDMA para *uplink* [54]

A técnica OFDMA é uma extensão do OFDM para implementação do sistema de comunicação multiusuário [68]. A diferença entre as duas técnicas OFDM e OFDMA são: em OFDM todas as subportadoras do símbolo são usados para fornecer dados a um usuário específico. No entanto, em OFDMA, a subportadora de cada símbolo pode ser dividida entre múltiplos usuários permitindo assim o melhor uso de recurso rádio. A alocação dinâmica em OFDMA permite uma melhor utilização do canal para múltiplos usuários de baixa taxa, a fim de evitar interferências de banda estreita e desvanecimento multi-percurso. A Figura 2.11 apresenta o alocação de subportadoras para OFDM e OFDMA [68].

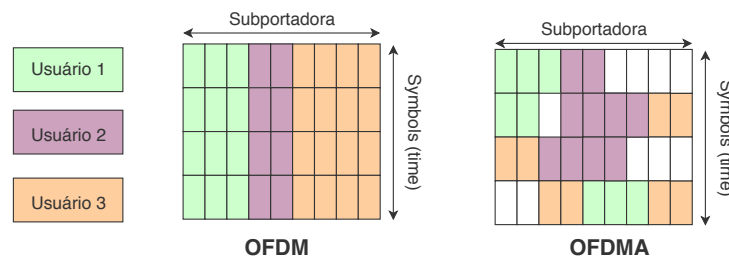


Figura 2.11: Alocação de subportadoras OFDM e OFDMA

Os recursos de rádio são distribuídos no LTE com base numa grade de tempo e frequência. A Figura 2.12 apresenta uma estrutura de quadro básica da grade de recursos para o caso do comprimento de um prefixo cíclico de tamanho normal (7 símbolos OFDM) [25].

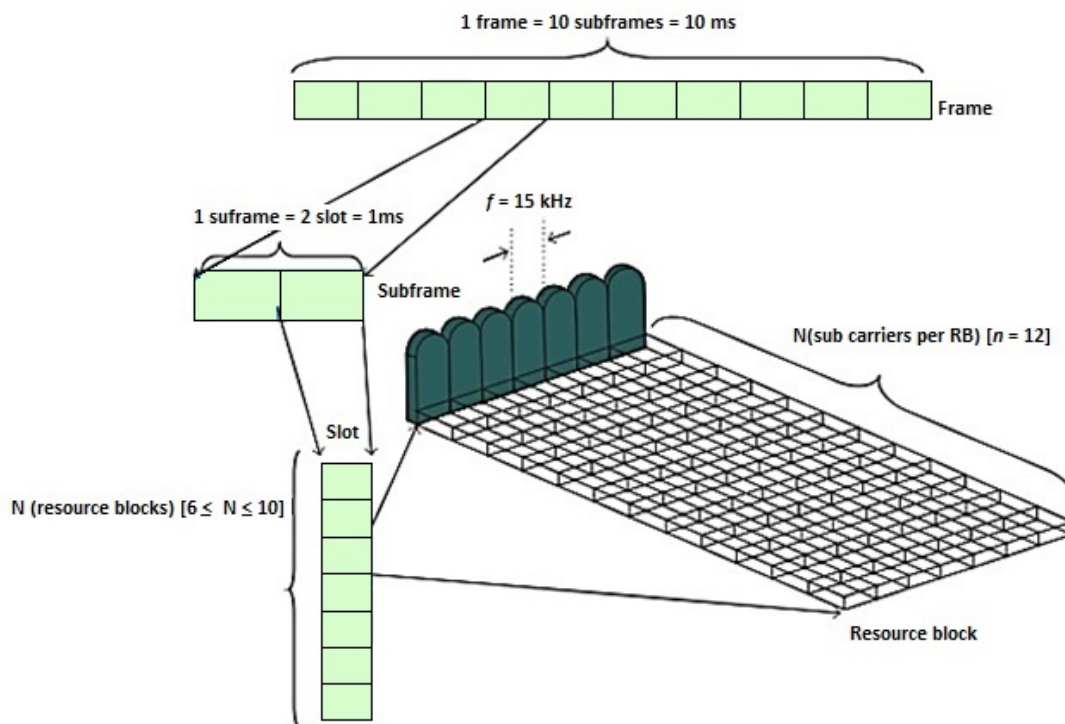


Figura 2.12: Grade de recursos em redes LTE

No domínio do tempo, o sinal é dividido em quadros de rádio de 10ms de duração. Cada quadro é subdividido em 10 subquadros de 1ms. Cada subquadro é dividido em

dois *slots* de 0.5ms. Cada *slot* compreende de 7 símbolos OFDM quando é usado com o prefixo cíclico normal ou 6 símbolos OFDM quando é o caso do prefixo cíclico estendido. No domínio da frequência, a largura de banda total utilizada pela rede (1.4, 3, 5, 10, 15 ou 20 MHz) é dividida em subcanais com 12 subportadoras equiespaçadas de 15kHz entre elas, totalizando uma largura de banda de 180 kHz. De modo que uma unidade de 12 subportadoras por uma duração de um *slot* formam um Bloco de Recurso (do inglês, *Resource Block* - RB). A menor unidade de recurso é chamado de Elemento de Recurso (do inglês, *Resource Element* - RE), que consiste em uma subportadora por uma duração de um símbolo OFDM. Um RB contém 84 REs no caso com o prefixo cíclico normal e 72 REs no caso com prefixo cíclico estendido. A Tabela 2.1 lista as quantidades destes recursos para diferentes larguras de bandas.

Tabela 2.1: Larguras de banda suportada no LTE [35]

| Largura de Banda (MHz) | 1.4 | 3 | 5 | 10 | 15 | 20 |
|-------------------------------|------------|----------|----------|-----------|-----------|-----------|
| Bloco de Recursos | 6 | 15 | 25 | 50 | 75 | 100 |
| Subportadoras | 72 | 180 | 300 | 600 | 900 | 120 |

2.6 Qualidade de Serviço (QoS)

A qualidade de serviço (do inglês, *Quality of Service* - QoS) introduzida pelo 3GPP [1] é definida como um conjunto de tecnologias que possibilitam à rede oferecer garantias de que os requisitos mínimos de serviço e tráfego podem ser satisfeitos, permitindo o melhor uso dos recursos de infraestrutura de rede existente [25]. Do ponto de vista das aplicações multimídia, QoS está relacionada a atraso, variação de atraso e ao descarte de pacotes, sendo para um fluxo ou conjunto de fluxos de dados. Nota-se que a QoS tem um requisito em comum que é a capacidade de diferenciar entre tráfegos e tipos de serviços, para que o usuário possa tratar uma ou mais classes de tráfegos na forma determinada. Nas redes de comunicações modernas, há cada vez mais serviços emergentes com diferentes requisitos de QoS que podem ser tecnicamente representados por diferentes conjuntos de parâmetros de QoS.

Em redes LTE o conceito de QoS (Figura 2.13) traz um elemento central chamado portador (do inglês, *bearer*). Um “portador” identifica fluxos de pacotes que recebem um tratamento de QoS comum entre o UE e o gateway P-GW [9], [42].

Todos os fluxos de pacotes mapeados em um mesmo *bearer* recebem o mesmo tratamento de encaminhamento de pacotes assim como, por exemplo, as mesmas políticas de escalonamento, políticas de gerenciamento da fila, entre outros. Em termos gerais, os *bearers* podem ser classificados em dois tipos diferentes de canais *bearer* dependendo do tipo de QoS que eles fornecem (Figura 2.14) [25], [68].

- Portador padrão (do inglês, *Default bearer*), canal atribuído por padrão ao UE quando se conecta à rede LTE.
- Portador dedicado (do inglês, *Dedicated bearer*), canal atribuído ao UE quando

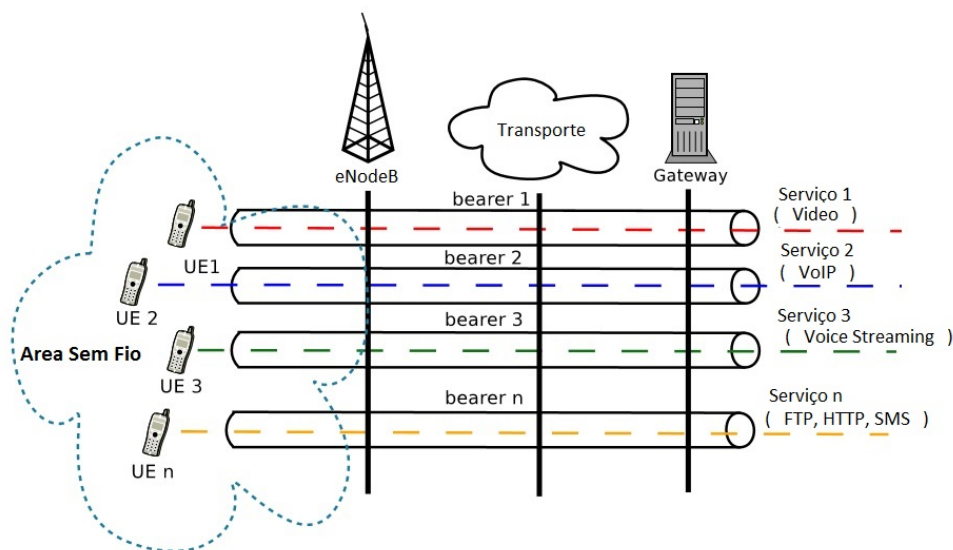


Figura 2.13: Conceito de bearer

solicita a utilização de um serviço que requer uma QoS mais alta que a fornecida pelo canal padrão (como VoIP, vídeo, etc.).

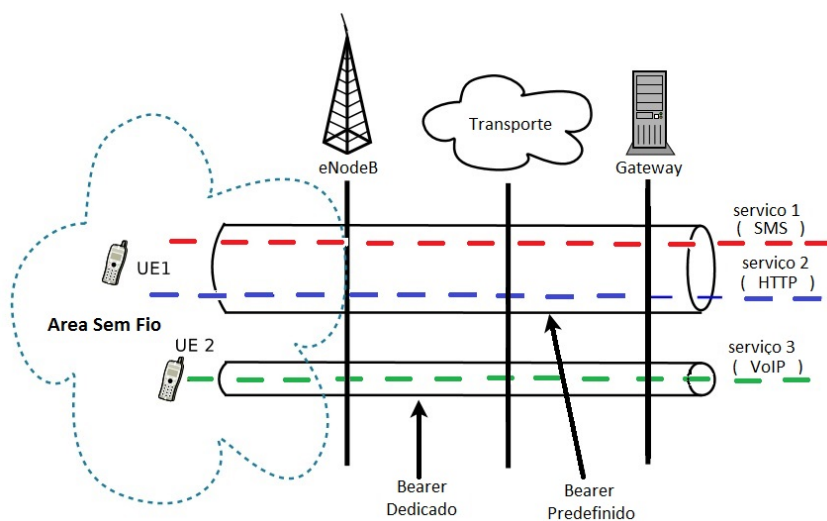


Figura 2.14: Tipo de bearer

2.6.1 Parâmetros de QoS

No LTE, o QoS é dividido em radio *bearer*, conhecidos como EPS *bearer*, que inclui os parâmetros QCI (do inglês, *QoS Class Identifier*), ARP (do inglês, *Allocation and Retention Priority*), GBR (do inglês, *Guaranteed Bit Rate*) e MBR (do inglês, *Maximum Bit Rate*), sendo detalhados brevemente abaixo:

- O identificador de classe de QoS (QCI), é um valor usado pelos elementos da rede para identificar qual o tipo de tratamento que a rede deve dar aos pacotes.

- Prioridade de alocação e retenção ARP, define o grau de prioridade do serviço solicitado é usado para decidir se o estabelecimento de um portador ou o pedido de modificação deve ser aceito ou rejeitado, devido às limitações de recursos.
- Taxa máxima de bit MBR, determina a largura de banda máxima permitida no portador.
- Taxa de bit garantida GRB, é a largura de banda máxima que deve ser garantida pelo portador.
- Taxa de bit não garantida (Non-GBR)(do inglês, *Non-Guaranteed Bit Rate*).

Os EPS *bearer* Non-GBR estão associados aos parâmetros QCI e ARP, enquanto os EPS *bearer* GBR estão associados a os parâmetros GBR e MBR. Os parâmetros que diferenciam cada tipo de QCI são apresentados na Tabela 2.2 [25], [19].

Tabela 2.2: QCIs padronizados pelo 3GPP [13]

| QCI | Tipos de Bearer | Prioridade | Atraso Máximo (ms) | Taxa de Perda de Pacotes | Exemplos de Serviço |
|-----|-----------------|------------|--------------------|--------------------------|---|
| 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} | <i>Buffered streaming</i> |
| 5 | Non-GBR | 1 | 100 | 10^{-6} | Sinalização de IMS |
| 6 | Non-GBR | 6 | 300 | 10^{-6} | Vídeo (<i>buffered streaming</i>) baseados em TCP |
| 7 | Non-GBR | 7 | 100 | 10^{-3} | Voz, Vídeo (<i>live streaming</i>) e Jogos iterativos |
| 8 | Non-GBR | 8 | 300 | 10^{-6} | Vídeo (<i>buffered streaming</i>) baseados em TCP |
| 9 | Non-GBR | 9 | 300 | 10^{-6} | Vídeo (<i>buffered streaming</i>) baseados em TCP |

2.7 Alocação de Recursos na Transmissão Downlink

O melhor uso da transmissão em direção *downlink* concedida pelo OFDMA do sistema LTE pode ser atingido com um gerenciamento dinâmico de alocação de recursos de rádio. Este mecanismo de alocação de recursos é responsável por definir como serão distribuídos os recursos entre os diferentes usuários. Conforme descrito na seção 2.5, o recurso de rádio é organizado em quadros de 10ms, sendo que cada quadro é composto de 10 subquadros

com duração de 1 ms. Além disso, cada subquadro é dividido em dois *slots* com duração de 0,5ms. Cada *slot* constitui um bloco de recurso (RB) composto por um conjunto de 12 subportadoras consecutivas no domínio da frequência e 7 ou 6 símbolos OFDM consecutivos no domínio do tempo. Um subquadro constitui um TTI (do inglês, *Transmission Time Interval*) que é a menor unidade de transmissão de dados [15]. Esta estrutura de quadros é mostrada na Figura 2.15.

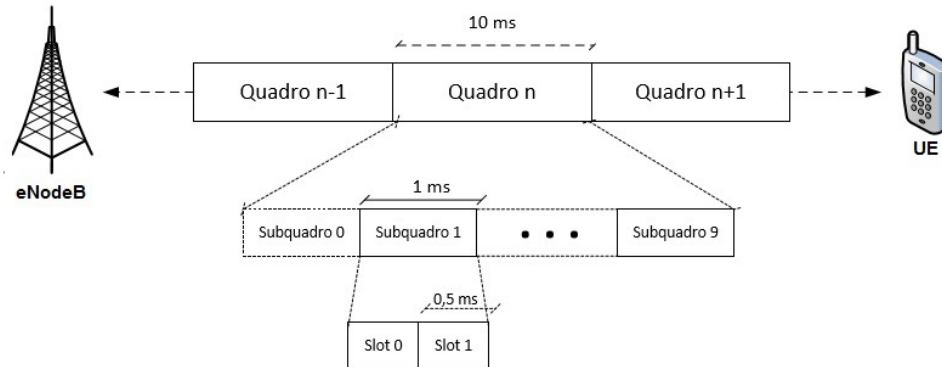


Figura 2.15: Estrutura de quadros em redes LTE

Um modelo generalizado de alocação de recursos em rede LTE é mostrado na Figura 2.16. Observa-se que para cada usuário é atribuído um *buffer* no eNodeB. Os pacotes que chegam ao *buffer* são marcados com hora de chegada e são enfileirados para ser enviados ao escalonador de pacote sob o mecanismo de fila tipo FIFO (do inglês, *First In First Out*). Os pacotes recebidos pelo escalonador são organizados via uma matriz identificando subcanais (frequência) e símbolos OFDMA (tempo) onde os recursos *downlink* estão disponíveis. Em cada TTI, o escalonador de pacote determina os blocos de recursos de rádio que serão atribuídos para usuários envolvidos, obedecendo alguns critérios de algoritmos de escalonamento de pacotes no eNodeB. Neste sistema existe a possibilidade de que um usuário possa receber zero, um ou mais blocos de recursos em cada TTI [25].

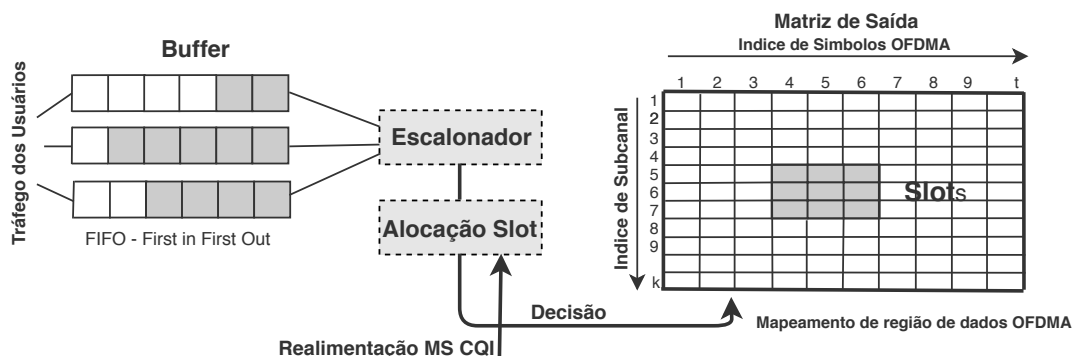


Figura 2.16: Modelo geral de alocação de recursos em redes LTE *downlink*

2.7.1 Principais Parâmetros de um Mecanismo de Alocação de Recursos

Vários parâmetros são cruciais para a tecnologia LTE que suporta serviços em tempo real e altas taxas de dados. A construção de um escalonador de pacote eficiente para alocação de recursos deve levar em consideração estes elementos [42], [25]:

Atraso de Pacotes: Para aplicações multimídia sensíveis a atraso, como vídeo *streaming*, os atrasos de pacotes limitados são essenciais para manter uma qualidade de serviço adequado. Logo, um esquema de escalonamento eficiente deve manter o atraso de pacotes o menor possível.

Condição do Canal: A condição do canal poderia ser considerada como um dos fatores mais importantes na toma de decisão do escalonador em sistemas sem fio. Devido às distancias variáveis entre a estação base e os usuários, e os fatores, tais como sombreamento (do inglês, *shadow fading*) e multi-percursos (do inglês, *multipath*), podem alterar as condições do canal para diferentes usuários causando perdas de pacotes.

Tipo de serviço: Em LTE existem dois tipos principais de serviços: serviços em tempo real (do inglês, *Real Time* - RT) e serviços em tempo não real (do inglês *non-Real Time* - non-RT). Neste contexto, é importante definir com antecedência o tipo de serviço requerido para poder decidir a prioridade do escalonamento. Por exemplo, um vídeo conferência precisa de uma alocação dinâmica de recursos com maior prioridade de transmissão enquanto um atraso maior de um SMS (do inglês, *Short Message Service*) pode não ser relevante.

Complexidade do tempo: A complexidade do tempo quantifica o tempo necessário para um algoritmo, executar uma determinada função. Uma vez que a alocação de recursos em LTE é realizada a cada intervalo de tempo de transmissão (TTI) de 1ms de duração, um algoritmo eficiente deve fornecer resultados em um tempo mais curto do que um TTI. Portanto, um eficiente escalonador deve ter uma complexidade baixa para realizar esta tarefa.

Estado do *buffer*: O estado do *buffer* fornece informações sobre a quantidade de pacotes pendentes a serem servidos em uma fila. O estado da fila está altamente relacionado com a taxa de bit da aplicação envolvida. Por exemplo, em uma aplicação de vídeo, a taxa de bit pode ser de 242kbps e para serviços de VoIP a taxa de bits é de 8,4kbps. Normalmente a fila de vídeo é mais longa do que a de VoIP. O estado do *buffer* é definido por dois fatores: o atraso de pacotes HOL (do inglês, *Head of Line*) e o comprimento da fila.

2.7.2 Escalonadores de Pacotes

O escalonador de pacotes em rede LTE é uma das entidades funcionais mais significativas do gerenciamento de recurso rádio RRM (do inglês, *Radio Resource Management*) que é responsável pela alocação dinâmica dos recursos de rádio para os usuários, permitindo as transmissões de dados ordenadamente através da interface de rádio LTE. O objetivo central do escalonador de pacotes é atender de forma satisfatória os requerimentos de QoS para maioria dos UEs [12]. Neste contexto, o escalonador envolve várias sub-tarefas

assim como: decidir quais usuários irão transmitir, em que recursos da interface de rádio e em que formato de modulação e codificação serão adotados. Para isso, o escalonador de pacote analisa os requisitos de qualidade de serviço associado com os serviços portadores de rádio, a qualidade do canal para cada terminal e o estado do *buffer*, entre outros.

A Figura 2.17 apresenta a operação genérica do escalonador de pacotes na transmissão *downlink*. Todo o procedimento do escalonador de pacotes pode ser dividido em uma sequência de operações que são repetidas a cada intervalo de tempo de transmissão (TTI), no qual o escalonador estima a quantidade de recursos sendo alocado para cada fluxo. Referiremos $w_{i,j}$ como sendo a métrica atribuída ao fluxo i para o sub-canal j . Os algoritmos de escalonamento diferem na forma de como a métrica de recursos é calculada [59]. O escalonador trabalha atribuindo a cada sub-canal j o fluxo com maior métrica $w_{i,j}$. Assim, o procedimento do escalonamento pode ser resumido da seguinte forma:

1. O eNodeB prepara a lista de fluxos que podem ser escalonados no TTI atual. Observamos que um fluxos pode ser escalonado se e somente se houver pacotes de dados para transmissão na camada MAC e o receptor UE não estiver no modo inativo (Idle-Mode).
2. Cada UE decodifica os sinais de referência, calculando o Indicador de Qualidade do Canal CQI (do inglês, *Channel Quality Indication*) e enviando o resultado para a eNodeB, para ajudar a estimação da qualidade do canal na transmissão *downlink*. O eNodeB será configurado de acordo com a informação CQI atribuindo toda a largura de banda de *downlink* ou apenas uma parte dela chamada sub-banda.
3. Assim, a métrica escolhida é calculada para cada fluxo de acordo com a estratégia do escalonador usando as informações do CQI. O subcanal correspondente é atribuído a esse UE que possui a maior métrica.
4. Para cada fluxo escalonado, o eNodeB calcula a quantidade de dados sendo transmitidos na camada MAC, isto é, o tamanho do bloco de transporte durante o TTI atual. O módulo AMC (do inglês, *Adaptive-Modulation and Coding*) na camada MAC seleciona o melhor esquema de modulação e codificação MCS (do inglês, *Modulation and Coding Scheme*) que deve ser usado para a transmissão de dados por usuários escalonados.
5. O canal PDCCH (do inglês, *Physical Downlink Control Channel*) é usado para enviar as informações sobre os usuários, os blocos de recursos atribuídos e os MCS selecionados para os terminais também conhecida como as informações de controle de *downlink* DCI (do inglês, *Downlink Control Information*).
6. Cada usuário monitora o canal PDCCH focando no canal do seu interesse PDSCH (do inglês, *Physical Downlink Shared Channel*) para a recepção de dados.

Para estimar a métrica de alocação de recurso, os algoritmos de escalonamento geralmente exigem o conhecimento da taxa média de dados \bar{R}_i no fluxo i , e a taxa de dados instantânea disponível do UE destinatário para o sub-canal j . Este conhecimento

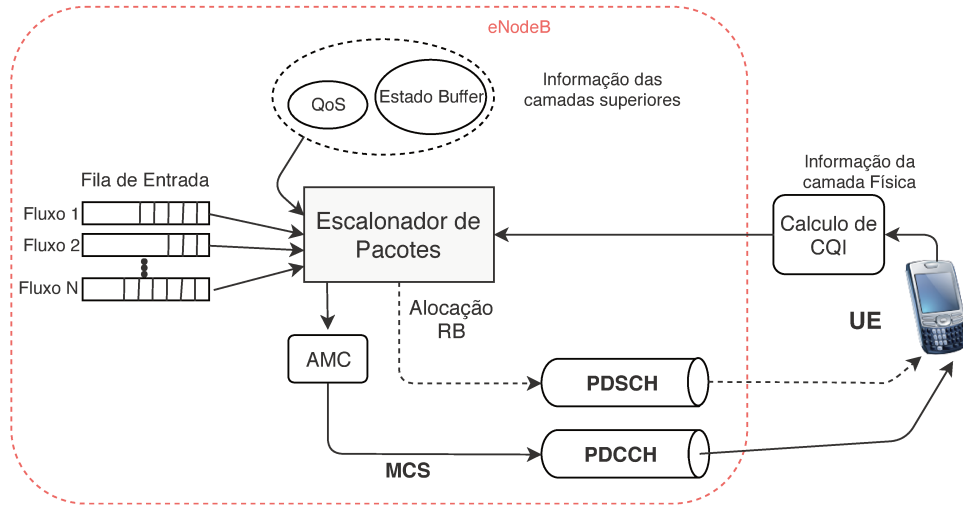


Figura 2.17: Operação genérica do escalonador de pacotes na rede LTE *downlink*

é útil quando a métrica tem que levar em consideração informações sobre o desempenho garantido no passado para cada fluxo e realiza a alocação equilibrada de recursos. Em particular, em cada TTI, a estimativa de \bar{R}_i é calculada da seguinte forma:

$$\bar{R}_i(k) = 0.8\bar{R}_i(k-1) + 0.2R_i(k) \quad (2.1)$$

onde $R_i(k)$ representa a taxa de dados alcançada pelo fluxo i durante o k TTI e $\bar{R}_i(k-1)$ representa a estimativa do TTI anterior.

2.7.3 Estratégias de Escalonadores de Pacotes

Atualmente existem vários esquemas de escalonamento propostos para realizar a alocação de recursos. Esses esquemas possuem várias características em comum, no entanto, de maneira geral as estratégias dos escalonadores são divididas em classes ou famílias da seguinte forma (vide Figura 2.18) [46]:

- Estratégias inconscientes do canal (*Channel Unaware*).
- Estratégias conscientes do canal (*Channel Aware*) e inconscientes dos requisitos de QoS (*QoS Unaware*).
- Estratégias conscientes do canal (*Channel Aware*) e conscientes dos requisitos de QoS (*QoS Aware*).

Estratégias inconscientes do canal (*Channel Unaware*).- os algoritmos que seguem este tipo de estratégia inconscientes do canal são citados na Figura 2.18, isto é, FIFO (First In First Out) e RR (Round Robin). Essas estratégias não tem conhecimento do canal em termos de qualidade, são baseados sobre a premissa que a transmissão é invariante no tempo e livre de erros [59].

Estratégias consciente do canal (*Channel Aware*) e inconscientes dos requisitos de QoS (*QoS Unaware*).- aqui, as informações sobre o canal estão presentes,

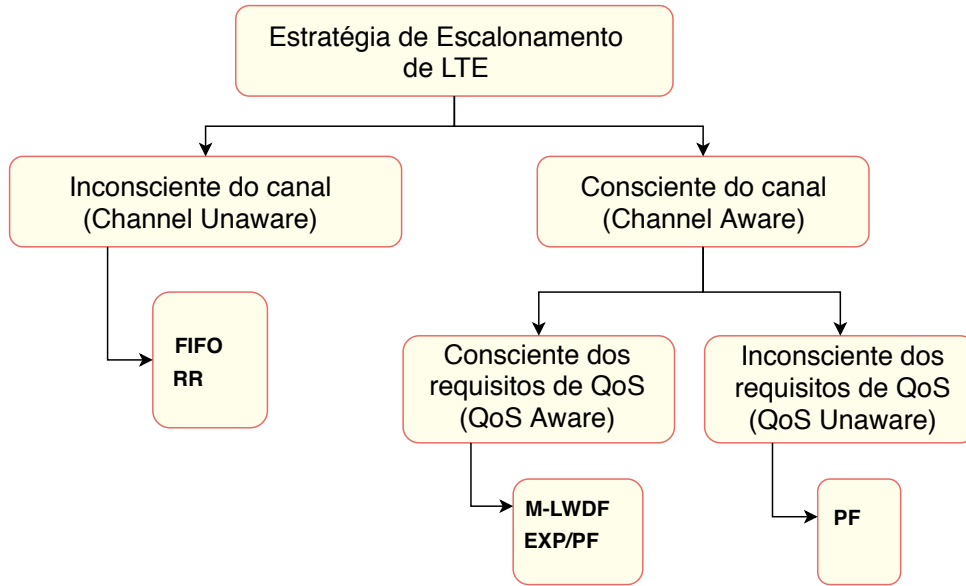


Figura 2.18: Algoritmo de escalonamento

mas e o fator de QoS não são considerados. Um UE calcula os valores do indicador de qualidade do canal (CQI) e envia para estação base (eNodeB) de forma periódica. Em seguida, o escalonador avalia a qualidade do canal a ser enfrentada por cada usuário, para concluir com a estimativa de desempenho a ser atingida. O algoritmo que segue este tipo de estratégia é chamado de PF (do inglês, *Proportional Fair*).

Estratégias conscientes do canal (*Channel Aware*) e conscientes dos requisitos de QoS (*QoS Aware*). - aqui as informações sobre o canal estão presentes e o fator QoS também são considerados na execução. Os algoritmos que seguem esta estratégia de escalonamento garantem um tempo definido de retardo e são os seguintes EXP/PF (do inglês, *Exponential Proportional Fair*) e M-LWDF (do inglês, *Modified-Largest Weighted Delay First*).

Particularmente, ainda nesta seção, apresentamos os algoritmos de escalonamento PF (do inglês, *Proportional Fair*), EXP/PF (do inglês, *Exponential Proportional Fair*) e M-LWDF (do inglês, *Modified-Largest Weighted Delay First*).

2.7.3.1 Algoritmo PF

O algoritmo de escalonamento PF (do inglês, *Proportional Fair*) é apropriado para suportar tráfegos em tempo não real (do inglês, *non-Real Time* - non-RT) [47]. O algoritmo PF tem como finalidade de estabelecer o equilíbrio entre a adequação e a taxa de transferência geral do sistema. Para este algoritmo PF o cálculo da métrica $w_{i,j}$ é definido pela seguinte expressão [36] [59]:

$$w_{i,j} = \frac{r_{i,j}}{\bar{R}_i} \quad (2.2)$$

onde $r_{i,j}$ denota a taxa de dados instantânea disponível para o fluxo i no sub-canal j e \bar{R}_i corresponde a taxa média de dados no fluxo i .

2.7.3.2 Algoritmo M-LWDF

O algoritmo de escalonamento M-LWDF (do inglês, *Modified-Largest Weighted Delay First*), foi desenvolvido para suportar múltiplos dados de usuários em tempo real (RT) com diferentes requerimentos de QoS [29]. Em cada intervalo de tempo (*time slot*) o algoritmo M-LWDF prioriza os fluxos de tempo real de maior atraso baseado na melhor condição do canal. A métrica de alocação é definida pela seguinte expressão [59]:

$$w_{i,j} = -\frac{\log \delta_i}{\tau_i} \cdot D_{HOL,i} \frac{r_{i,j}}{\bar{R}_i} \quad (2.3)$$

onde $r_{i,j}$ denota a taxa de dados instantânea disponível para o fluxo i no sub-canal j e \bar{R}_i corresponde a taxa média de dados no fluxo i , $D_{HOL,i}$ denota o atraso de pacote HOL (do inglês, *Head of Line*) no fluxo i , τ_i denota o valor limite de atraso de pacote suportado pelo fluxo i e finalmente δ_i corresponde a probabilidade máxima que o atraso $D_{HOL,i}$, primeiro pacote a ser transmitido na fila exceda o tempo limite.

Note-se que, na implementação do esquema de alocação M-LWDF, os pacotes pertencentes a um fluxo em tempo real serão removidos da fila MAC se não forem transmitidos antes do término do prazo. Esta operação é necessária para evitar o desperdício de largura de banda. Esta implementação não está disponível para o algoritmo PF, porque ele não foi projetada para serviços em tempo real [59] [29].

2.7.3.3 Algoritmo EXP/PF

O algoritmo de escalonamento EXP/PF é uma melhoria do algoritmo PF. Foi desenvolvido para aumentar a prioridade de fluxo em tempo real com respeito a fluxos de tempo não real [29]. A medida considerada é estimada usando a seguinte equação:

$$w_{i,j} = \exp\left(\frac{\alpha_i D_{HOL,i} - \lambda}{1 + \sqrt{\lambda}}\right) \frac{r_{i,j}}{\bar{R}_i} \quad (2.4)$$

onde $r_{i,j}$ denota a taxa de dados instantânea disponível para o fluxo i no sub-canal j e \bar{R}_i corresponde a taxa média de dados no fluxo i , $D_{HOL,i}$ calcula o atraso de pacote HOL (do inglês, *Head of Line*) no fluxo i , a expressão α_i é calculada por:

$$\alpha_i = -\frac{\log \delta_i}{\tau_i} \quad (2.5)$$

sendo τ_i o valor limite de atraso de pacote suportado pelo usuário i , δ_i é definida como a probabilidade máxima que o atraso $D_{HOL,i}$, primeiro pacote a ser transmitido na fila exceda o tempo limite e a expressão λ é definida como:

$$\lambda = \frac{1}{N_{rt}} \sum_{i=1}^{N_n} \alpha_i D_{HOL,i} \quad (2.6)$$

sendo N_{rt} o número de fluxos em tempo real ativo na direção *downlink*.

Quando o fluxo de dados no escalonador EXP/PF é caracterizado pela classe de serviço em tempo não real, a métrica considerada é um simples algoritmo PF. Além disso, se os pacotes de dados não forem transmitidos antes da expiração da métrica, os pacotes pertencentes aos fluxos dos usuários são descartados da camada MAC.

Capítulo 3

Mecanismo de Policiamento de Tráfego

3.1 Introdução

Um fluxo de tráfego admitido na rede deve ser policiado a fim de evitar as pretensões e os comportamentos maliciosos que podem prejudicar os serviços contratados pelos usuários e outros fluxos de tráfego [44], [58]. Sob certo mecanismo de controle, os fluxos de tráfego que violam o contrato de conexão podem ter seus pacotes descartados ou marcados como baixa prioridade de transmissão a fim de evitar o congestionamento na rede ou algum impacto negativo na garantia da qualidade de serviço dada a outros fluxos de tráfego envolvidos. O nível de desempenho contratado é considerado alcançado satisfatoriamente se os parâmetros de tráfego medidos estiverem de acordo com os valores negociados na fase de admissão [58]. A rede que implementa os mecanismos de policiamento deve ser capaz de detectar e tratar adequadamente as violações ocorridas [69]. Em outras palavras, o mecanismo de policiamento de tráfego desempenha um papel importante na conformidade de qualidade de serviço (QoS) na rede moderna.

Um mecanismo de policiamento de tráfego mais discutido na literatura é o Balde Furado (do inglês, Leaky Bucket - LB) [44], [58], [69]. Normalmente o balde furado não funciona satisfatoriamente quando o processo de tráfego de entrada tem comportamento em rajadas, podendo causar o enchimento do “balde” (*buffer*) e consequentemente forçando o controlador do tráfego descartar os dados dos outros tráfegos bem comportados [44], [73]. Particularmente este fenômeno pode ser amplamente observado quando o tráfego de entrada apresenta características monofractal e multifractal [69].

Um regulador de tráfego conhecido como balde furado fractal (do inglês, Fractal Leaky Bucket - FLB) foi introduzido em [39] para lidar com traços de tráfegos de entrada de natureza monofractal. A abordagem FLB provou ser um mecanismo eficaz para policiar e controlar fontes monofractais [70]. O correspondente balde furado multifractal (do inglês, Multifractal Leaky Bucket - MLB) é um algoritmo de policiamento de tráfego que tornou-se evidente para o tráfego real de rede hoje em dia [73].

Neste capítulo, aborda-se os mecanismos de policiamento de tráfegos com características monofractais e multifractais mais utilizados na literatura. Inicialmente serão apresentadas as séries de fluxos de tráfego utilizadas neste estudo. Em seguida, introduz o conceito de processo envelope. Na seção de policiamento de tráfego, detalharemos os

mecanismos de balde furado, o balde furado fractal e balde furado multifractal amplamente mencionados na literatura. Por último, avaliamos e comparamos todos os processos envelopes dos algoritmos de policiamento de tráfego estudados neste capítulo.

3.2 Séries de Tráfego

Nesta seção, apresenta-se as séries (do inglês, *traces*) de tráfego de rede utilizadas neste trabalho. Temos os seguintes tráfegos de vídeo: o traço de vídeo *Lord of the rings III* (chamado neste trabalho de “*Lord-III*”) e o traço de vídeo *Foreman-H264* (chamada como “*Foreman*”). Estas séries de tráfego de vídeo estão disponíveis no site *Video Trace Library*¹ [60], no formato MPEG-4. A Figura 3.1-(a) apresenta as amostras da série do vídeo *Lord-III* utilizada em [61], com a taxa de quadros de 25fps (do inglês, *frames per second*). A Figura 3.1-(c) exibe as amostras da série real do vídeo *Foreman* com a taxa de quadro de 25fps, a sequencia de vídeo *Foreman* tem sido comprimido usando H.264 a uma taxa de bit de 242kbps, esta amostra é utilizada em diversos estudos [59], [42].

Utilizamos também, traços de tráfego TCP/IP, chamada de *lbl-pkt-5*, disponível no site *Internet Traffic Archive*² [41]. A Figura 3.2-(a) apresenta as 7000 (sete mil) amostras da série de tráfego *lbl-pkt-5* com o tempo de amostragem de 512ms, recolhidos pelo *Lawrence Berkeley Laboratory* (LBL). Esta série de tráfego *lbl-pkt-5* tem sido amplamente utilizada em diversos estudos [44], [73].

Uma outra característica ilustrativa das séries de tráfego é via suas funções densidade de probabilidade (PDFs) tendo um comportamento de uma função lognormal. A função distribuição de probabilidade $F_X(X)$ é calculada através da sua função densidade de probabilidade $f(x)$ usando a seguinte equação [57].

$$F_X(X) = P[a \leq X \leq b] = \int_a^b f(x)dx \quad (3.1)$$

Observe-se nas Figuras 3.1-(b) e 3.1-(d) respetivamente as estimativas da função densidade de probabilidade (PDF) das séries de tráfego (*Lord-III* e *Foreman*) e na Figura 3.2-(b) do fluxo (*lbl-pkt-5*), representados através de seus histogramas. A partir das Figuras 3.1-(b), 3.1-(d) e 3.2-(b) é possível observar que todas as séries apresentam um perfil de densidade de probabilidade lognormal.

As principais caraterísticas estatísticas básicas das séries de tráfegos acima mencionadas são apresentadas na Tabela 3.1, incluindo seus parâmetros de *Hurst* (H).

Tabela 3.1: Características estatísticas básicas das séries de tráfego

| Séries | Média (bytes) | Variância (bytes) | Parâmetro de Hurst (H) |
|-----------|----------------------|----------------------|---------------------------|
| lbl-pkt-5 | 1.3387×10^4 | 1.2738×10^8 | 0,782 |
| Lord-III | 2.6764×10^4 | 7.1398×10^8 | 0,746 |
| Foreman | 1.2282×10^3 | 3.0808×10^6 | 0,579 |

¹<http://trace.eas.asu.edu/>

²<http://ita.ee.lbl.gov/>

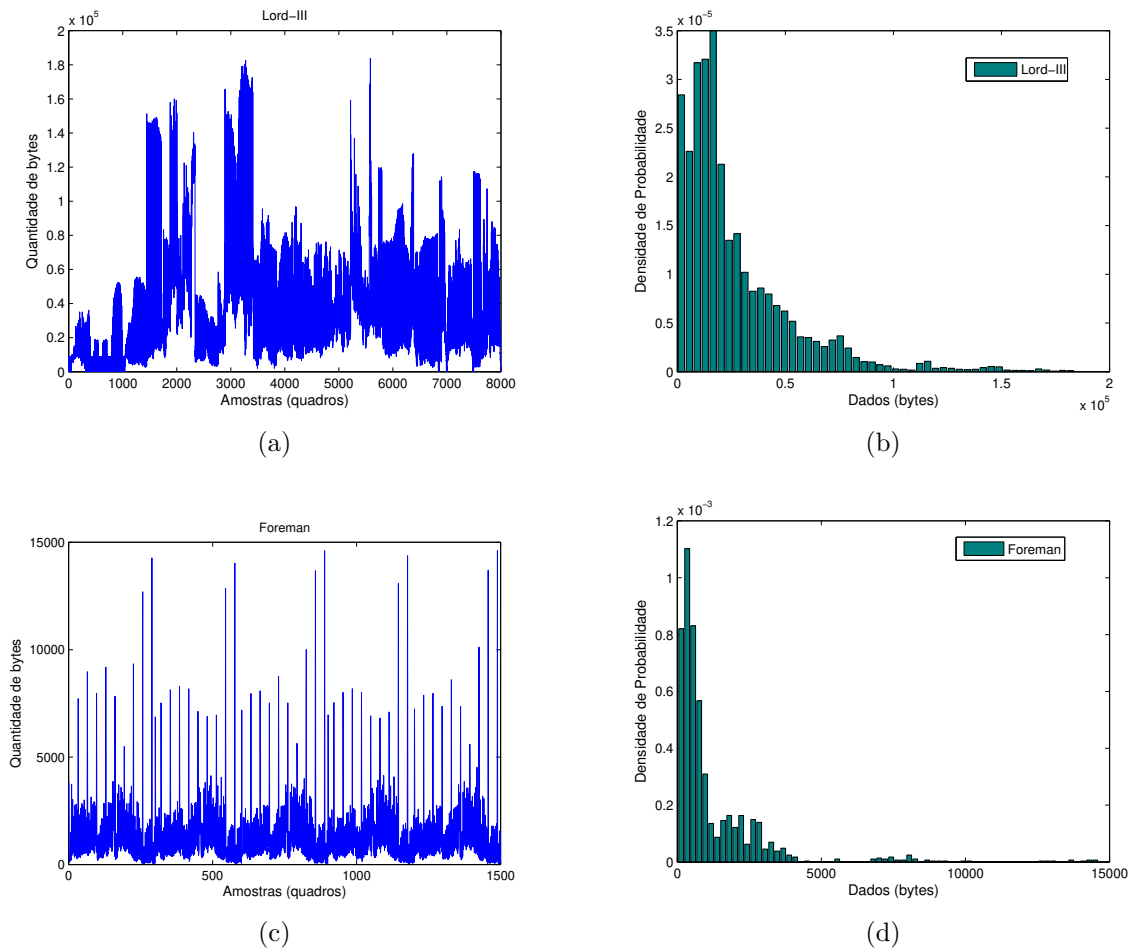


Figura 3.1: Amostras da séries de tráfego de vídeos (a) *Lord-III*, (b) *Foreman*. Função densidade de probabilidade dos tráfegos (c) *Lord-III*, (d) *Foreman*

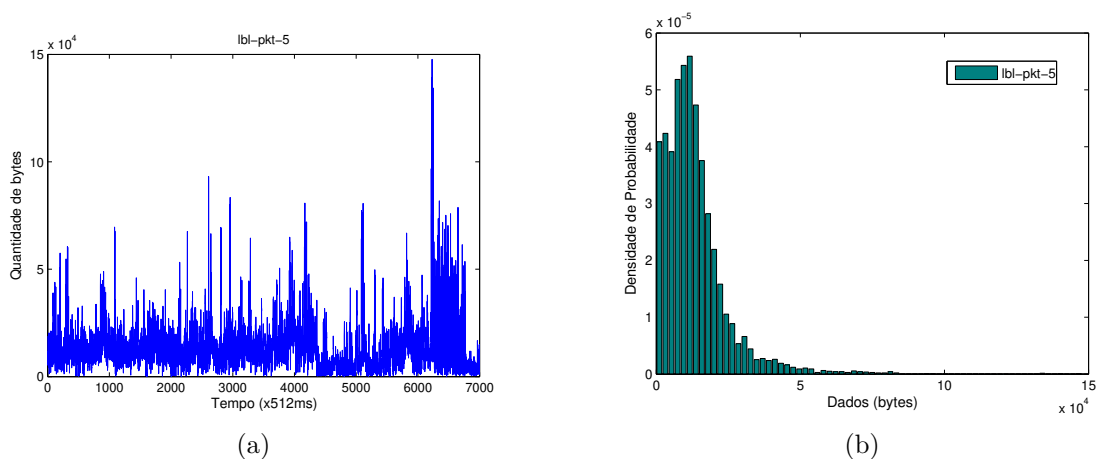


Figura 3.2: (a) Amostra da série de tráfego e (b) Função densidade de probabilidade do tráfego *lbl-pkt-5*

O parâmetro de *Hurst* (H) mede o grau de autossimilaridade do processo com característica fractal e representa basicamente uma medida do decaimento de autocorrelação do

processo. O chamado autossimilaridade refere-se a propriedades associadas aos fractais, uma vez que os fractais são objetos cuja aparência não muda apesar da mudança de escala [62], [49].

As séries de tráfegos acima mencionados foram escolhidos por apresentar características encontradas como: a variabilidade do tamanho dos pacotes transmitidos em função do tempo, a presença de rajadas em intervalos de tempos específicos, os altos valores estimados para o parâmetro de *Hurst* e o comportamento lognormal das PDFs das séries reais, todas estas características encontradas motivam a aplicação de análise fractal e multifractal neste capítulo.

3.3 Processo Envelope

O conceito do processo envelope (do inglês, *Envelope Process*) tem sido apresentado por muitos autores [49], [62], [70] como um limitante superior para um volume do tráfego em um dado intervalo de tempo. Um processo envelope pode ser classificado como: determinístico e probabilístico [52]. A diferença entre os dois está na possibilidade de violação do processo envelope. Os processos envelopes determinísticos são absolutos e consideram sempre o comportamento de pior caso de um processo de tráfego, enquanto, os processos envelopes probabilístico não são absolutos, isto é, permitem a violação do limitante estabelecido pela função limitante de um processo envelope probabilístico.

O processo acumulativo real da sequência de observações X_n é definido por [69]:

$$A_n = \sum_{i=1}^n X_i \quad (3.2)$$

Nesta seção, serão apresentados resumidamente os conceitos do processo envelope do movimento browniano fracionário fBm (do inglês, *Fractional Brownian motion*) e do processo de chegada limitante multifractal MFBAP (*Multifractal Bounded Arrival Process*).

Definição 1: (Processo envelope do movimento browniano fracionário - fBm) Seja o tráfego browniano fracionário $A(t)$, dado pela equação [52], [69].

$$A(t) = \rho t + \sigma Z(t) \quad (3.3)$$

onde $A(t)$ representa o tráfego acumulado até um dado instante t , ρ é a sua taxa média, σ é o coeficiente associado ao seu desvio padrão e $Z(t)$ é o movimento browniano fracionário de parâmetro de *Hurst* ($H \in [0.5, 1)$).

Este tráfego browniano fracionário pode estar associado a um processo envelope, dando como resultado o processo envelope de movimento browniano fracionário - fBm (do inglês, *Fractional Brownian motion*) que foi definido em [52] e foi provado que é um limitante superior estreito para processo acumulativo monofractal. O processo envelope fBm é dado pela seguinte equação:

$$\hat{A}(t) = \rho t + k\sigma t^H \quad (3.4)$$

onde ρ e σ representam a média e o desvio padrão, respectivamente. $H \in [0.5, 1)$ é um parâmetro de *Hurst* [67]. O parâmetro k é uma constante, relacionada à probabilidade ϵ

do processo de tráfego acumulado real $A(t)$ exceda ou viole o processo envelope $\hat{A}(t)$ no instante t . O parâmetro k pode ser determinado usando a seguinte relação [52], [69]:

$$k = \sqrt{-2\ln\epsilon} \quad (3.5)$$

Definição 2: (Processo de chegada limitante multifractal - MFBAP) O processo MFBAP (do inglês, *Multifractal Bounded Arrival Process*) foi introduzido em [58] como uma alternativa determinística de obter o processo envelope que limita o volume do tráfego em um intervalo de tempo dado. Em [72] os autores afirmam que o processo envelope MFBAP sendo visto com a capacidade de representar o tráfego acumulado de um processo multifractal sem assumir qualquer distribuição marginal específica. O processo envelope MFBAP é dado pela seguinte equação [69]:

$$MFBAP(t) = \bar{a}t + k\sigma\hat{C}(t) \quad (3.6)$$

$$\hat{C}(t) = t^{H(t)} \quad (3.7)$$

$$H(t) = H_0 + \sigma_H \exp\left\{-\frac{[\ln(t) - \bar{a}_H]^2}{2\sigma_H^2}\right\} \quad (3.8)$$

onde $H(t)$ é chamado função de Hölder ou expoente de Hölder [63] e é uma generalização do parâmetro de Hurst, t é o instante de tempo, \bar{a} e σ representam a média e desvio padrão do tráfego respetivamente, \bar{a}_H e σ_H , representam a média e o desvio padrão do expoente de Hölder respetivamente, k é uma constante relacionada à probabilidade ϵ que o processo acumulado real excederia o processo envelope. k é dada pela equação (3.5).

3.4 Policiamento de Tráfego

O mecanismo de policiamento de tráfego é uma ferramenta importante na arquitetura da rede e é responsável por garantir que as aplicações não ultrapassem os limites previamente estabelecidos pelas operadoras contratadas e estejam em conformidade com o contrato de serviço (SLA³ - *Service Level Agreement*). O policiamento de tráfego supervisiona os fluxos de tráfego de entrada e permite que as conexões de tráfego ocorram apenas para fluxos bem-comportados. Os fluxos de tráfego mal-comportados (fora dos padrões acordados pelo SLA) devem ser descartados ou atendido como baixa prioridade para evitar congestionamento na rede ou impacto adverso na qualidade de serviço dos outros fluxos [73]. Nesta seção, descreve-se alguns algoritmos de policiamento de tráfego amplamente divulgados na literatura.

3.4.1 Balde Furado (LB)

O tradicional balde furado LB (do inglês, *Leaky Bucket*) tem sido adotado em vários padrões da arquitetura de redes. O LB pode ser comparado com um balde comum de

³SLA: Acordo de Nível de Serviço (ANS ou SLA, do inglês, Service Level Agreement). O acordo é firmado geralmente entre um prestador de serviço e seu cliente interno, a fim de definir o nível de serviço acordado para a qualidade desse serviço.

capacidade S com um pequeno orifício no fundo do balde drenando líquido com fluxo de taxa constante. A Figura 3.3 mostra a analogia conceitual entre o sistema de armazenamento de líquido de balde furado e um esquema de transmissão de fila, onde o balde furado modifica o processo de fluxo de entrada por armazenamento temporário da carga em função da taxa do fluxo de saída determinada pelo tamanho do orifício. Claramente, o transbordamento do balde causa a perda de líquido (dados) [71].

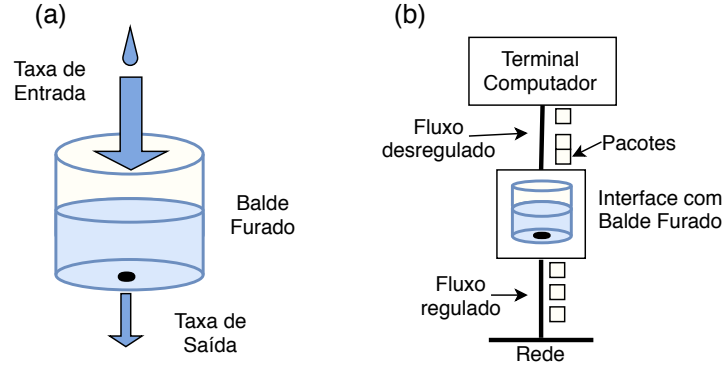


Figura 3.3: (a) Balde furado com líquido (b) Balde furado com pacotes [71]

O balde furado (LB) é simplesmente um sistema de filas composto por um único servidor com um tempo de serviço constante [32]. Se assumirmos que o balde está inicialmente vazio ($t=0$), a quantidade máxima de trabalho processada pelo processo envelope de balde furado até o instante t é dada pela seguinte equação [69], [73].

$$LB(t) = \bar{a}t + S \quad (3.9)$$

onde, \bar{a} denota a taxa média do tráfego de entrada, S o tamanho do balde.

O tradicional balde furado (LB) pode ser visto como um mecanismo de policiamento de tráfego que pode ser interpretado como um teste sequencial para analisar o comportamento do tráfego de entrada [44], [69], [73]. Este mecanismo de policiamento é descrito pelo seguinte conjunto de equações:

$$E_n = \max \{0, E_{n-1} + X_n - \bar{a}\Delta\} \quad (3.10)$$

$$K_n = \begin{cases} S, & E_n = 0 \\ k_{n-1}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.11)$$

$$J_n = \begin{cases} 0, & E_n \leq K_n \\ X_n - \bar{a}\Delta, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.12)$$

onde, E_n consiste de uma sequência de teste, K_n denota o limiar de decisão para E_n e J_n é o controle que o algoritmo exerce na sequência aleatória de entrada X_n , Δ é a unidade de intervalo de tempo considerado, S é o tamanho do balde e \bar{a} é a taxa média do tráfego de entrada X_n .

A Figura 3.4-(a) mostra o resultado de simulação do processo envelope do algoritmo de balde furado (LB) para a série de tráfego *Lord-III* (tráfego sem policiamento). Verifica-se uma considerável discrepância entre os dois processos (Lord-III e LB). Nitidamente o processo da série de tráfego *Lord-III* é altamente não linear com grandes variações de rajadas de pacotes. A Figura 3.4-(b) apresenta o comportamento da sequência J_n de número de pacotes marcados com prioridade baixa ou que serão descartados na aplicação do algoritmo LB para a série de tráfego *Lord-III*, onde o valor médio de J_n do trecho de tráfego analisado é igual a 9481,1 *bytes*.

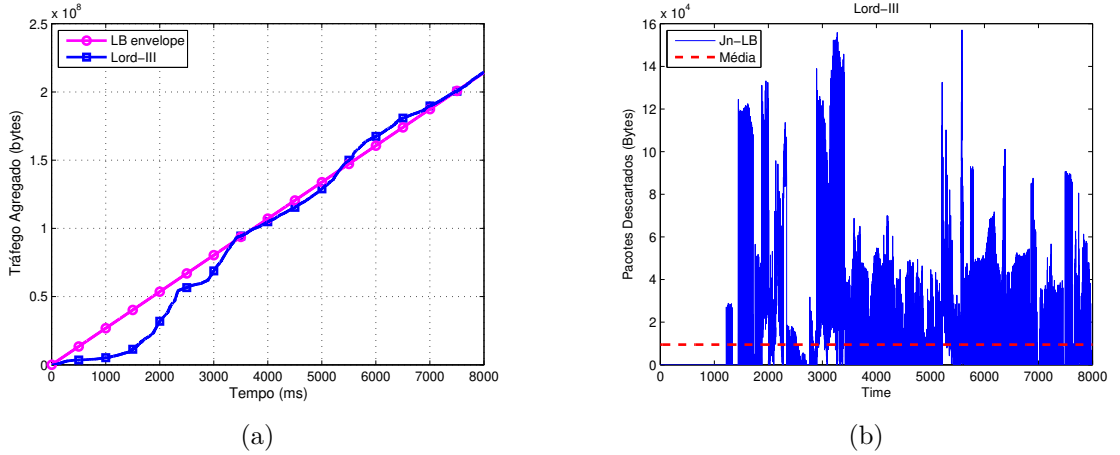


Figura 3.4: (a) Processo envelope do algoritmo LB para a série de tráfego *Lord-III*, (b) Pacotes descartados ou marcados de baixa prioridade para a série de tráfego *Lord-III* utilizando o algoritmo LB

A Figura 3.5-(a) mostra o resultado de simulação do processo envelope do algoritmo de balde furado (LB) para a série *Foreman* (tráfego sem policiamento). Observamos que o fluxo controlado pelo processo envelope LB está bem próximo da série *Foreman*. Verifica-se na Figura 3.5-(b) a sequência J_n de número de pacotes marcados como prioridade baixa ou que serão descartados na aplicação do algoritmo LB juntamente com seu valor médio de J_n baixo igual a 532,9 *bytes*.

A Figura 3.6-(a) compara o tráfego acumulado da série *lbl-pkt-5* com o processo envelope do algoritmo LB do tráfego de entrada da série *lbl-pkt-5*. O comportamento do algoritmo LB é observado na Figura 3.6-(b) onde mostra uma sequência J_n de número de pacotes marcados com prioridade baixa ou que serão descartados juntamente com o valor médio de J_n igual a 3692,9 *bytes*.

Os resultados acima sugerem que o algoritmo de balde furado LB não fornece um desempenho adequado, por não prever as altas variações de pacotes nos altos fluxos de tráfego com rajadas, isso é revelado pelos altos valores da sequência J_n . Esse comportamento também foram observados em [32], [44], [73].

O desempenho do algoritmo de balde furado é avaliado via a taxa de perda de dados devido ao mecanismo de policiamento. A Equação 3.13 mostra o calculo da taxa de perda onde P_b representa a taxa de *bytes* descartados para cada série de tráfego, $P(i)$ define a

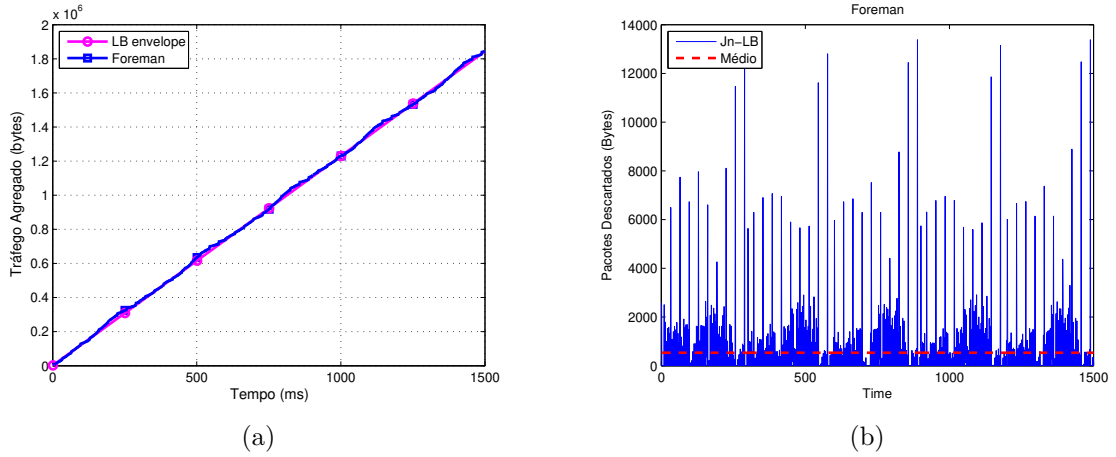


Figura 3.5: (a) Processo envelope do algoritmo LB para a série de tráfego *Foreman*, (b) Pacotes descartados ou marcados como baixa prioridade para a série de tráfego *Foreman* utilizando o algoritmo LB

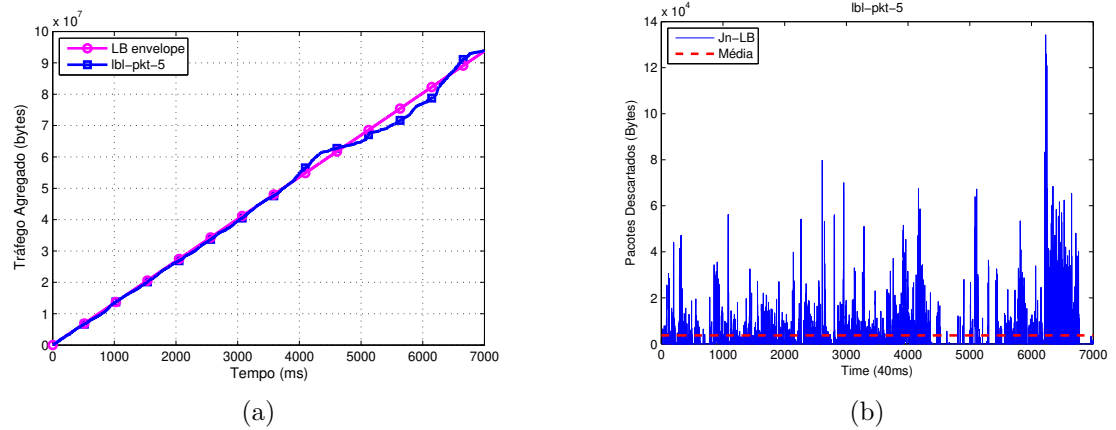


Figura 3.6: (a) Processo envelope do algoritmo LB para a série de tráfego *lbl-pkt-5*, (b) Pacotes descartados ou marcados de baixa prioridade para a série de tráfego *lbl-pkt-5* utilizando o algoritmo LB

perda de *bytes* no sistema de transmissão e $X(i)$ é o tráfego de entrada.

$$P_b = \frac{\sum_{i=1}^n P(i)}{\sum_{i=1}^n X(i)} \quad (3.13)$$

Os resultados comparativos das perdas de pacotes para as séries de tráfego de entrada, sem policiamento e com policiamento via o algoritmo LB, são apresentados na Tabela 3.2. Observa-se que o algoritmo LB foi capaz de reduzir possíveis impactos provocados pelas características rajadas do fluxo de tráfego. Como consequência, a perda total P_b de tráfegos policiados com o algoritmo LB tem seu valor nulo. Em outras palavras, o algoritmo conseguiu regular todos os fluxos de entrada analisados.

As Figuras 3.7-(a), 3.7-(b) e 3.7-(c) apresentam a relação entre a taxa de perda de pacotes (P_b) e o tamanho do *buffer* para as séries de tráfegos *Lord-III*, *Foreman* e *lbl-pkt-5* policiados e não policiados, respetivamente. Observa-se que a da taxa da perda (P_b)

Tabela 3.2: Comportamento da perda de pacote para séries de tráfego sem policiamento e policiado com o algoritmo LB

| Série de tráfego | Perda Total sem policiamento (<i>byte</i>) | Total de J_n com algoritmo LB (<i>byte</i>) | Perda total P_b do tráfego regulado (<i>byte</i>) |
|------------------|--|---|---|
| lbl-pkt-5 | 2.093×10^7 | 2.596×10^7 | 0 |
| Lord-III | 6.963×10^7 | 7.584×10^7 | 0 |
| Foreman | 4.731×10^5 | 7.994×10^5 | 0 |

das séries utilizadas, policiado pelo algoritmo LB, não apresenta perdas, isto é, com o valor nulo da perda total da taxa de perda (P_b), em contraste com as taxas de perda não desprezíveis de tráfegos não policiados.

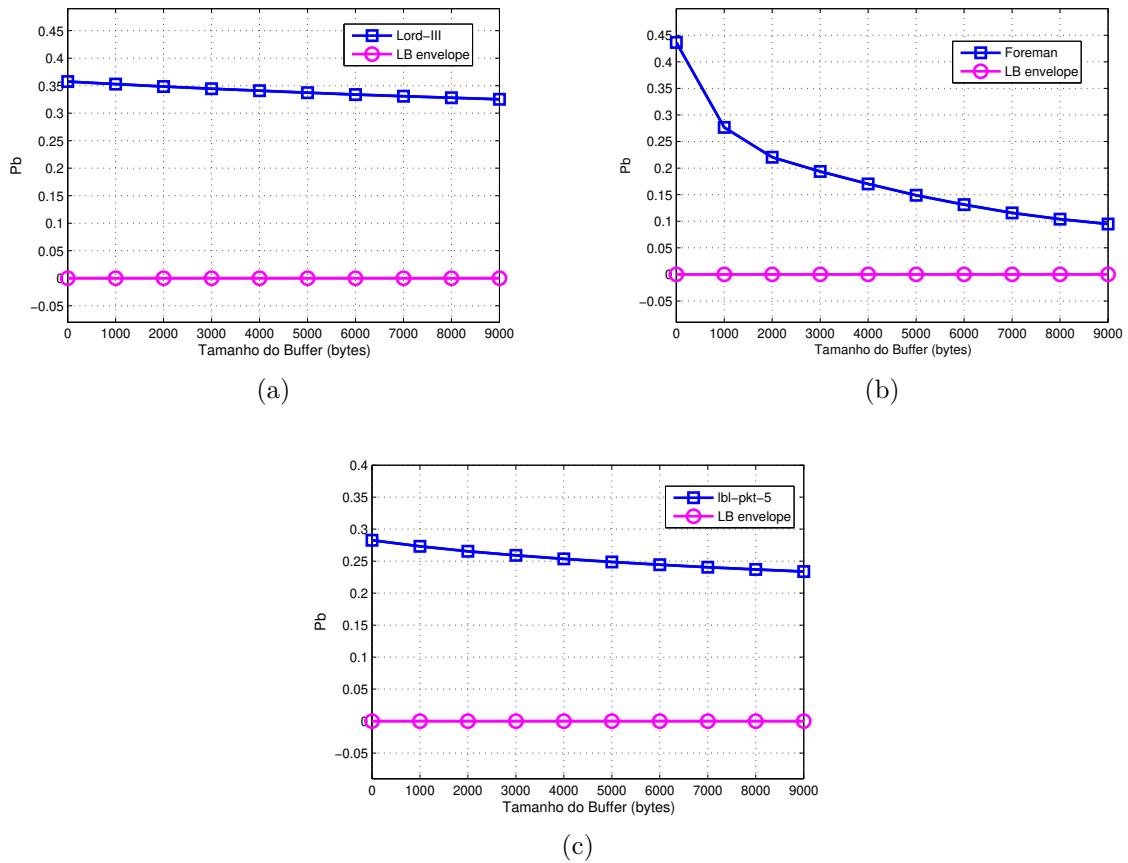


Figura 3.7: P_b versus tamanho do *buffer* com o algoritmo LB para as séries de tráfego (a) *Lord-III*, (b) *Foreman* e (c) *lbl-pkt-5*

3.4.2 Balde Furado Fractal (FLB)

O balde furado fractal FLB (do inglês, *Fractal Leaky Bucket*), é um mecanismo de policiamento de tráfego proposto em [51]. O FLB é baseado no conceito do processo envelope de *fBm* (*fractional Brownian motion*). O modelo fBm é considerado preciso na descrição do fluxo de tráfego com comportamento monofractal e especificado através das

seguintes parâmetros: a taxa média (\bar{a}), desvio padrão (σ) e parâmetro de *Hurst* (H) [67]. A quantidade máxima de trabalho aceito pelo processo envelope de balde furado fractal (FLB) é dado pela seguinte equação [69]:

$$FLB(t) = \bar{a}t + k\sigma t^H + S \quad (3.14)$$

O algoritmo FLB também pode ser visto como um teste sequencial da mesma forma que o algoritmo LB, especificado pelos seguintes conjuntos de sequencias [44], [69]:

$$E_n = \max \{0, E_{n-1} + X_n - \bar{a}\Delta\} \quad (3.15)$$

$$K_n = \begin{cases} S, & E_n = 0 \\ k\sigma\Delta^H [n^H - (n-1)^H] + K_{n-1}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.16)$$

$$J_n = \begin{cases} 0, & E_n \leq K_n \\ X_n - \bar{a}\Delta - k\sigma\Delta^H [n^H - (n-1)^H], & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.17)$$

onde, E_n consiste de uma sequência de teste, K_n denota o limiar de decisão para E_n , J_n é o controle que o algoritmo exerce na sequência aleatória de tráfego de entrada X_n , Δ é a unidade de intervalo de tempo considerado, S é o tamanho do balde, \bar{a} é a taxa média do tráfego de entrada X_n e k é uma constante relacionada à probabilidade de violação ϵ do processo envelope. k é dada pela equação (3.5).

A Figura 3.8-(a) apresenta o processo cumulativo do tráfego real Lord-III e seu correspondente processo envelope FLB. Na Figura 3.8-(b) mostra o comportamento da sequência J_n , correspondendo o número de *bytes* marcados como mal comportados pelo algoritmo FLB. O valor médio de J_n do trecho de tráfego analisado é igual a 1690,5 *bytes*.

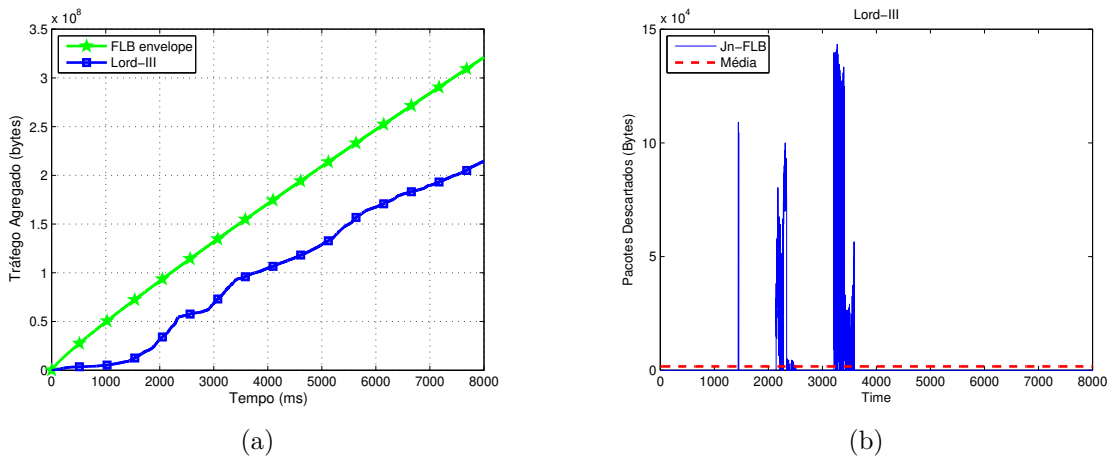


Figura 3.8: (a) Processo envelope do algoritmo FLB para a série de tráfego *Lord-III*, (b) Pacotes descartados ou marcados como baixa prioridade para a série de tráfego *Lord-III* utilizando o algoritmo FLB

A Figura 3.9-(a) mostra o processo cumulativo de tráfego real *Foreman* e seu correspondente processo envelope FLB. Observa-se que tem o comportamento parecido da

Figura 3.8-(a) tem seu envoltório (processo envelope) acima e afastando-se no decorrer no tempo do envoltório do tráfego real *Foreman* (tráfego sem policiamento), Pelas Figuras 3.8-(b) e 3.9-(b), podemos observar que apenas uma quantidade bem pequena de cada tráfego é marcada. O valor médio de J_n obtido para a série de tráfego *Foreman* é igual a 141,75 bytes.

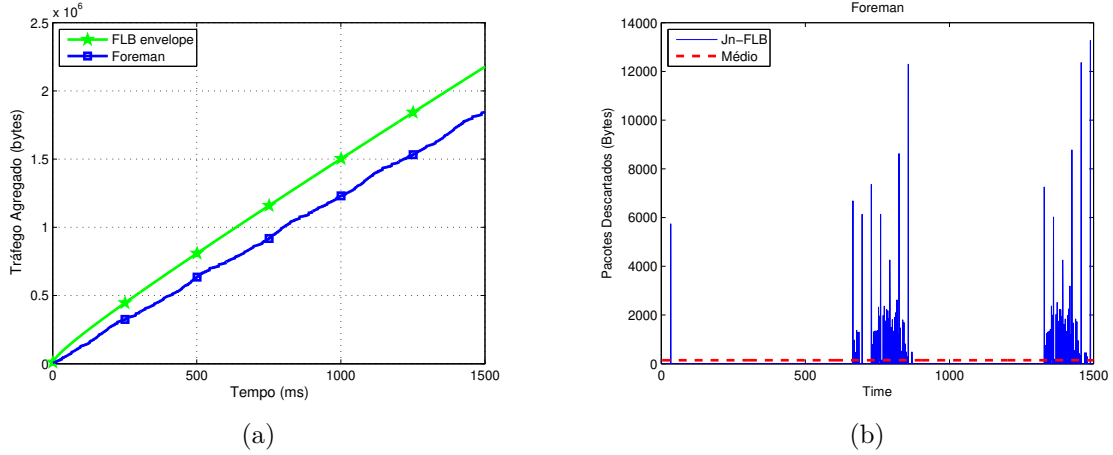


Figura 3.9: (a) Processo envelope do algoritmo FLB para a série de tráfego *Foreman*, (b) Pacotes descartados ou marcados como baixa prioridade para a série de tráfego *Foreman* utilizando o algoritmo FLB

Observa-se o resultado do processo envelope FLB mostrado na Figura 3.10-(a) com a curva de carga de processo envelope localizado, porém ligeiramente, acima do envoltório do tráfego real da série de tráfego *lbl-pkt-5* (tráfego sem policiamento). Na Figura 3.10-(b) apresenta o comportamento da sequencia J_n , com pacotes da série *lbl-pkt-5* y o valor médio de J_n neste caso é igual a 222,74 bytes, o comportamento também observado em [44], [51], [73].

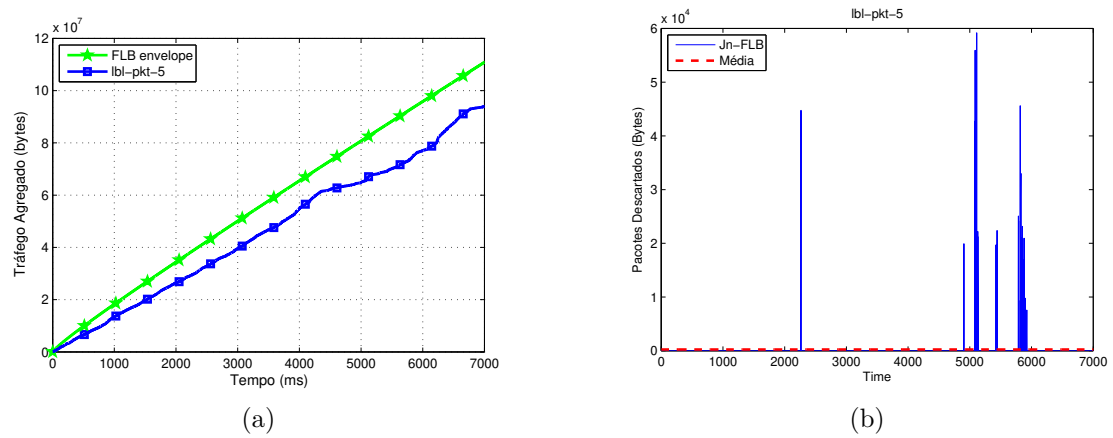


Figura 3.10: (a) Processo envelope do algoritmo FLB para a série de tráfego *lbl-pkt-5*, (b) Pacotes descartados ou marcados como baixa prioridade para a série de tráfego *lbl-pkt-5* utilizando o algoritmo FLB

A Tabela 3.3 apresenta a quantidade de bytes perdidos de cada série de tráfego sem

policimento e tráfegos policiados com o algoritmo FLB. Para este análise considere-se um sistema simples de transmissão com *buffer* e com capacidade de transmissão iguais a taxa média do tráfego de entrada. Note-se os valores de perda total P_b com o algoritmo FLB, são menores para as séries *lbl-pkt-5* e *Foreman* em comparação com a perda total de tráfego sem policiamento porém, uma maior perda P_b ocorre com o tráfego *Lord-III* quando o tráfego é policiado com o FLB. Ainda, observa-se que os valores de J_n possuem valores menores que o valor total da perda P_b para todas as séries analisadas.

Tabela 3.3: Comportamento da perda de pacote para séries de tráfego sem policiamento e policiado com o algoritmo FLB

| Série de tráfego | Perda Total sem policiamento (<i>byte</i>) | Total de J_n com algoritmo FLB (<i>byte</i>) | Perda total P_b do tráfego regulado (<i>byte</i>) |
|------------------|--|--|---|
| lbl-pkt-5 | 2.093×10^7 | 1.566×10^6 | 1.710×10^7 |
| Lord-III | 6.963×10^7 | 1.352×10^7 | 1.011×10^8 |
| Foreman | 4.731×10^5 | 2.126×10^5 | 3.234×10^5 |

Para verificar a eficiência do algoritmo FLB, comparou-se a taxa de perda P_b das séries utilizadas versus tamanho do *buffer* mostradas nas Figuras 3.11-(a), 3.11-(b) e 3.11-(c). Observa-se que para o tráfego *Foreman* quando o tamanho do *buffer* ultrapassa os 5000 *bytes*, a taxa de perda sem policiamento torna-se menor que a taxa de perda P_b da série policiada pelo algoritmo FLB. O mesmo comportamento acontece com o tráfego *Lord-III* quando ultrapassa os 6000 *bytes*.

3.4.3 Balde Furado Multifractal (MLB)

O balde furado multifractal MLB (do inglês, *Multifractal Leaky Bucket*) que foi utilizado nesta dissertação é chamada de Mecanismo de Policiamento de Chegada Multifractal (do inglês, *The Multifractal Arrival Policing Mechanism* - MAPM), introduzido em [73]. O algoritmo MAPM é baseado no processo envelope conhecido como Processo de Chegada com Limitante Multifractal (do inglês, *Multifractional Bounded Arrival Process* - MFBAP), descrito anteriormente na seção 3.3. O processo envelope MLB é dado pela seguinte equação [58], [69]:

$$MLB(t) = \bar{a}t + k\sigma t^{H(t)} + S \quad (3.18)$$

onde $H(t)$ é o expoente de Hölder [63], t o instante de tempo, os parâmetros \bar{a} e σ representam a taxa média e o desvio padrão do tráfego de entrada respectivamente, S é o tamanho do balde e k é uma constante relacionada à probabilidade de violação ϵ do processo envelope. k é calculada pela equação (3.5) [58].

O controle do algoritmo MLB é definido pelo seguinte conjunto de equações [73]:

$$E_n = \max \{0, E_{n-1} + X_n - \bar{a}\Delta\} \quad (3.19)$$

$$K_n = \begin{cases} S, & E_n = 0 \\ k\sigma\Delta^{H(t)} \left[n^{H(t)} - (n-1)^{H(t)} \right] + K_{n-1}, & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.20)$$

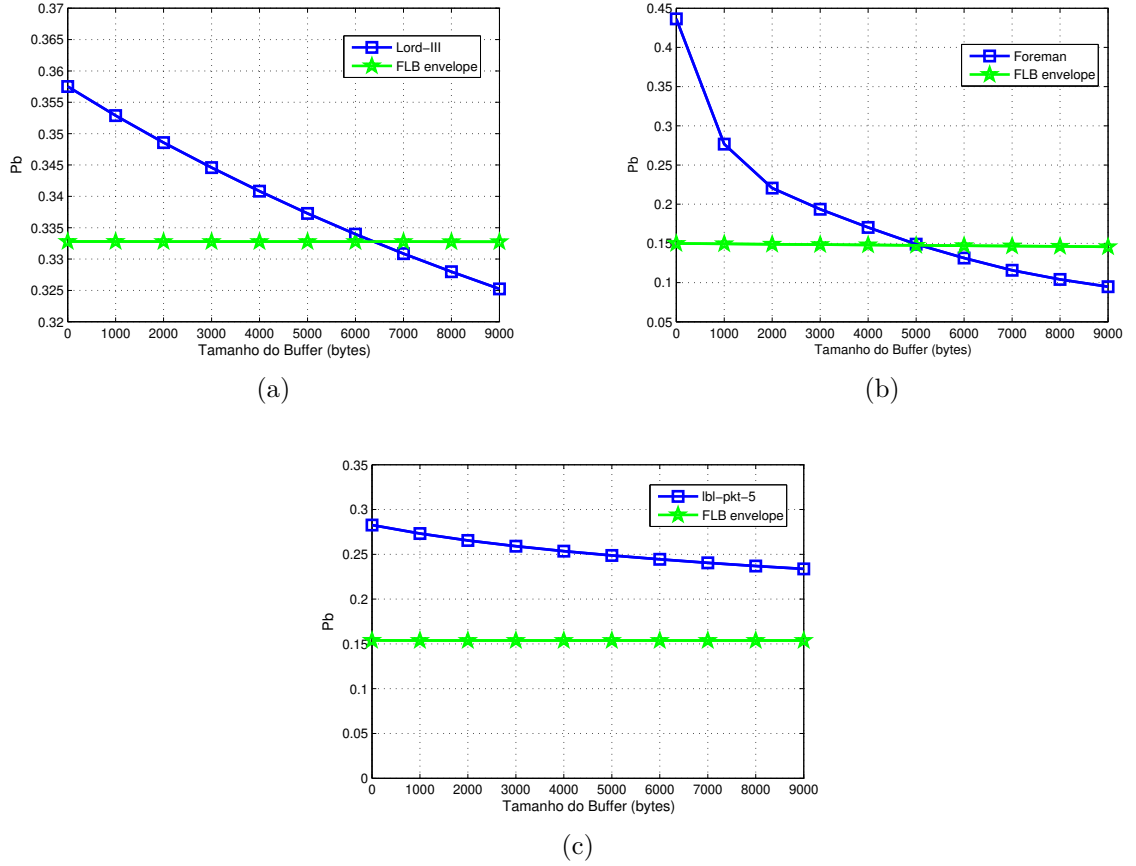


Figura 3.11: P_b versus tamanho do buffer com o algoritmo FLB para as séries de tráfego (a) Lord-III, (b) Foreman e (c) lbl-pkt-5

$$J_n = \begin{cases} 0, & E_n \leq K_n \\ X_n - \bar{a}\Delta - k\sigma\Delta^{H(t)} \left[n^{H(t)} - (n-1)^{H(t)} \right], & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.21)$$

onde, E_n consiste de uma sequência de teste, K_n denota o limiar de decisão para E_n , J_n é o controle que o algoritmo exerce na sequência aleatória de tráfego de entrada X_n , Δ é a unidade de intervalo de tempo considerado.

O modelo MLB pode ser visto como uma versão generalizada do FLB trocando o parâmetro de Hurst pelo expoente de Hölder. O expoente de Hölder descreve os comportamentos altamente irregulares que os processos multifractais exibem em função do tempo [69]. Esta generalização de FLB para MLB permite um melhor e mais realismo em representação do comportamento das séries de modo que descartes do pacotes será mínima possível, possivelmente sem comprometer o bom desempenho de toda a rede [44]. Neste trabalho utilizou-se o software FracLab [63] para estimação do expoente de Hölder das séries de tráfego.

A Figura 3.12-(a) compara a curva do processo envelope MLB com o envoltório do tráfego real *Lord-III* (tráfego sem policiado). A Figura 3.12-(b) apresenta o comportamento da sequência J_n , de número de *bytes* marcados como mal comportados pelo algoritmo MAMP. O valor médio de J_n é igual a 8599,9 *bytes*.

A Figura 3.13-(a) apresenta o processo envelope MLB para a série de tráfego *Foreman*.

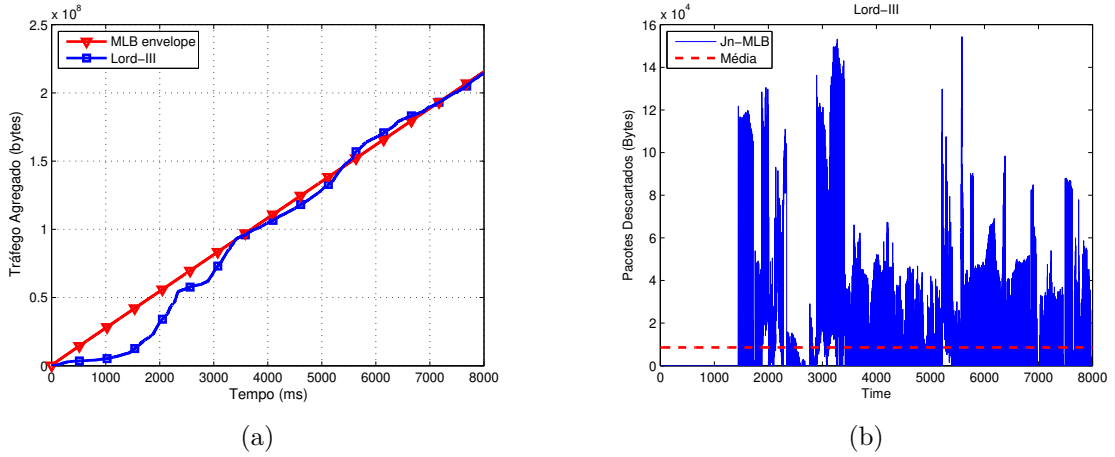


Figura 3.12: (a) Processo envelope do algoritmo MLB para a série de tráfego *Lord-III*, (b) Pacotes descartados ou marcados como baixa prioridade para a série de tráfego *Lord-III* utilizando o algoritmo MLB

Observa-se que a envoltório MLB (curva do processo envelope) praticamente acompanha o envoltório do tráfego real *Foreman* (tráfego sem policiado). Na Figura 3.13-(b) mostra o número de *bytes* marcados como mal comportados pelo algoritmo MAMP. O valor médio de J_n é igual a 127,08 *bytes*.

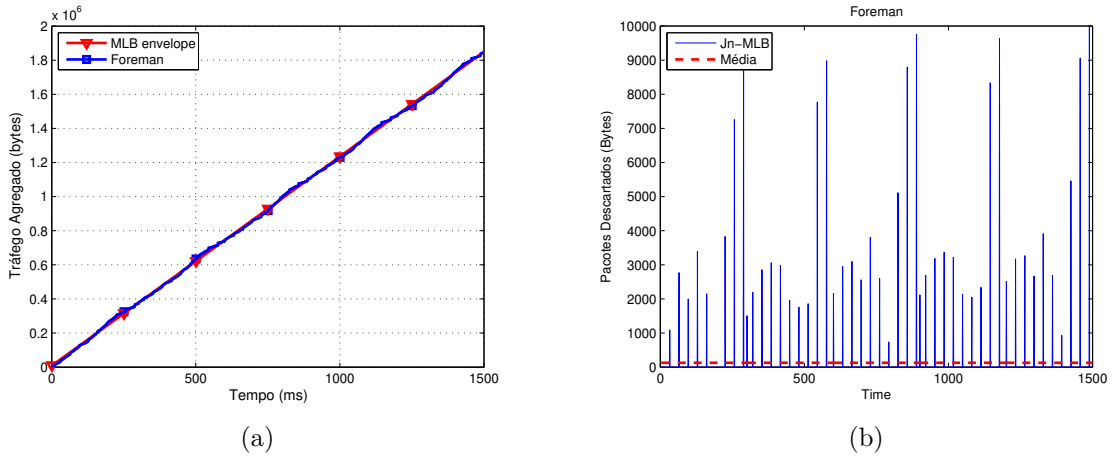


Figura 3.13: (a) Processo envelope do algoritmo MLB para a série de tráfego *Foreman*, (b) Pacotes descartados ou marcados como baixa prioridade para a série de tráfego *Foreman* utilizando o algoritmo MLB

A Figura 3.14-(a) apresenta o processo envelope MLB para a série de tráfego *lbl-pkt-5*. Observa-se que tem seu envoltório (curva do processo envelope) também acompanhando perto do envoltório do tráfego real *lbl-pkt-5* (tráfego sem policiado). A Figura 3.14-(b) mostra o comportamento da sequência J_n , de número de *bytes* marcados como mal comportados pelo algoritmo MLB. O valor médio de J_n é igual a 3166,8 *bytes*.

Note-se que, os valores médios de J_n obtido até agora pelo algoritmo MLB são maiores que dos valores de J_n obtidos nos algoritmos anteriores (LB e FLB). Porém, essa mar-

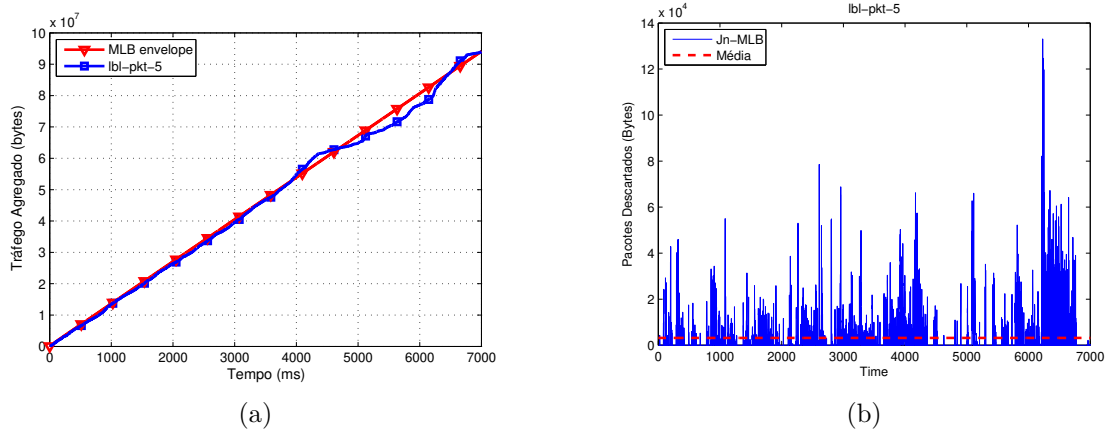


Figura 3.14: (a) Processo envelope do algoritmo MLB para a série de tráfego *lbl-pkt-5*, (b) Pacotes descartados ou marcados como baixa prioridade para a série de tráfego *lbl-pkt-5* utilizando o algoritmo MLB

cação de J_n não prejudicou o tráfego, como se observam nas Figuras 3.13-(a) e 3.14-(a) respectivamente, os tráfegos acumulativos reais estão próximo ao processo envelope MLB.

A Tabela 3.4 lista as perdas de bytes das series de tráfego sem policiamento e séries de tráfegos policiados com o algoritmo MLB. Para esta análise também foi considerado um sistema simples de transmissão com *buffer* e capacidade de transmissão iguais a média do tráfego de entrada. Observa-se na tabela que as taxas de perda P_b com o uso do algoritmo de policiamento MLB são menores para todas as séries analisadas em comparação com as taxas de perda das séries analisadas sem policiamento. No entanto, os valores de J_n policiado com MLB apresentam valores menores somente para as séries *Lord-III* e *Foreman* em comparação com as taxas de perda total das séries sem policiamento.

Tabela 3.4: Comportamento da perda de pacote para séries de tráfego sem policiamento e policiado com o algoritmo MLB

| Série de tráfego | Perda Total sem policiamento (<i>byte</i>) | Total de J_n com algoritmo MLB (<i>byte</i>) | Perda total P_b do tráfego regulado (<i>byte</i>) |
|------------------|--|--|---|
| lbl-pkt-5 | 2.093×10^7 | 2.226×10^7 | 2.871×10^5 |
| Lord-III | 6.963×10^7 | 6.879×10^7 | 1.260×10^6 |
| Foreman | 4.731×10^5 | 1.906×10^5 | 0 |

A eficiência do algoritmo MLB, pode ser verificada através da variação da taxa de perda P_b das séries em função do tamanho do *buffer* conforme apresentada na Figura 3.15-(a), 3.15-(b) e 3.15-(c). Observa-se que, as taxas de perda policiadas com o algoritmo MLB são sempre menores em comparação com as taxas de perdas de tráfegos sem policiamento.

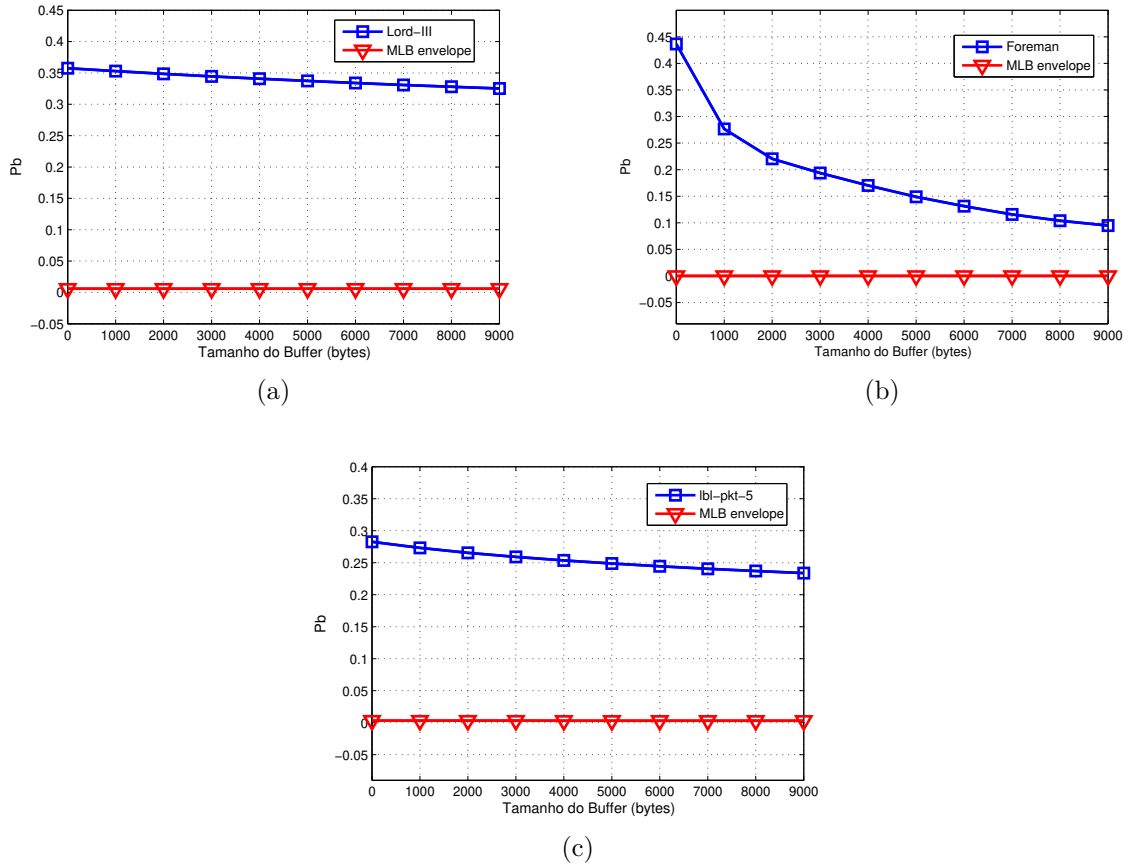


Figura 3.15: P_b versus tamanho do *buffer* com o algoritmo MLB para as séries de tráfego (a) *Lord-III*, (b) *Foreman* e (c) *lbl-pkt-5*

3.5 Comparação entre Processos Envelopes dos Algoritmos de Policiamento

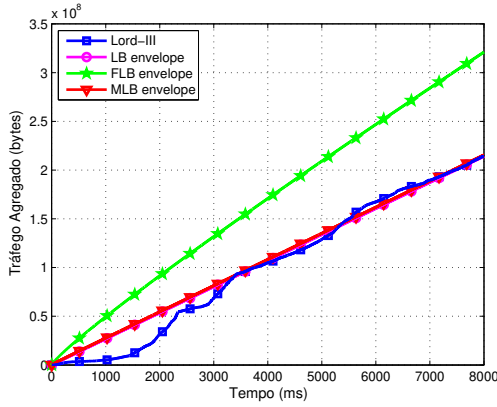
A Figura 3.16 apresenta uma comparação entre os processos envelopes dos algoritmos LB, FLB e MLB estudados anteriormente utilizando as mesmas séries de tráfego *Lord-III*, *Foreman* e *lbl-pkt-5*. Apresentados todos os processos envelopes analisados em um mesmo gráfico para cada série utilizado para melhor verificação do comportamento de cada algoritmo.

Quando analisamos os mecanismos de policiamento de tráfego devem ser consideradas duas características: o número de pacotes bem comportados que foram castigados e o número de pacotes mal comportados não castigados pelo algoritmo. Note-se que para um tráfego acumulado com maior variações mostrado na Figura 3.16-(a), o algoritmo de policiamento baseado em FLB obteve uma resposta muito acima do tráfego acumulado real (*Lord-III*), permitindo uma maior passagem de pacotes marcados como mal comportados. Para um tráfego de entrada melhor comportado sem muitas rajadas mostrado na Figura 3.16-(b), o resultado para o processo envelope FLB apresenta também um envelope afastado do processo acumulativo real (*Foreman*), mais do que os outros processos envelopes.

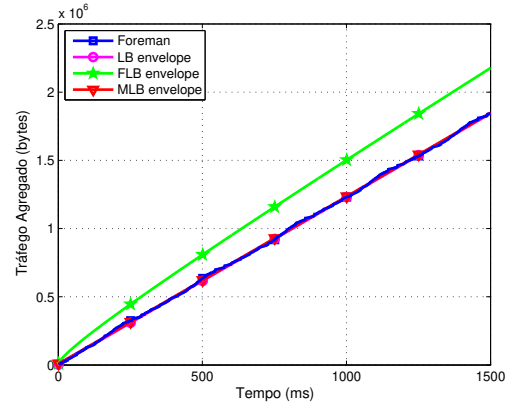
Nas Figuras 3.16-(a), 3.16(b) e 3.16-(c), apesar de exibir um maior afastamento do

envoltório do processo acumulativo real, o processo envelope FLB mostra um melhor desempenho do que o processo envelope LB, devido ao parâmetro de *Hurst* (H) calculado pelo software Selfis [67] que fornece um valor fixo que pode não descrever com precisão as características de diferentes fluxos de tráfego.

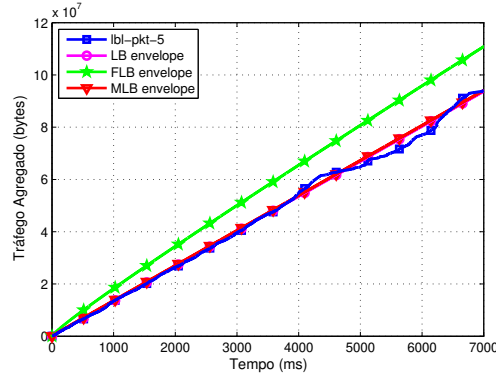
Pode-se observar nas Figuras 3.16-(a), 3.16-(b) e 3.16-(c) que o processo envelope MLB e LB praticamente acompanham o envoltório do tráfego real sem policiamentos (*Lord-III*, *Foreman* e *lbl-pkt-5*), respectivamente. O processo envelope MBL apresenta valores similares ao processo acumulativo de tráfego real (tráfego sem policiamento) portanto, com maior precisão. O fato se justifica do expoente de *Hölder* ($H(t)$), calculado pelo software FracLab [63], que descreve os comportamentos altamente irregulares em função do tempo de um processo multifractal.



(a)



(b)



(c)

Figura 3.16: Processos envelopes LB, FLB e MLB para série de tráfego (a) *Lord-III*, (b) *Foreman* e (c) *lbl-pkt-5*

Capítulo 4

Estratégia de Escalonamento de Pacote com Policiamento de Tráfego em Rede LTE Downlink

4.1 Introdução

A rede LTE opera com uma arquitetura baseada em comutação por pacotes. Dessa forma, ao alocar recursos para os usuários é necessário observar os requisitos de qualidade de serviço (QoS) de cada aplicação a fim de atender de forma eficiente principalmente para os serviços de tempo real. Esses requisitos são particularmente desafiantes em redes de comunicação que oferecem serviços em tempo real. Além disso, a qualidade do canal de comunicação sem fio normalmente varia para diferentes usuários na forma aleatória em escala de tempos distintos. Hoje, é imprescindível implementar alguns mecanismos eficazes de suporte de qualidade de serviço de dados em tempo real sobre canais de comunicação sem fios. As especificações técnicas de LTE tem como objetivo fornecer qualidade de serviço para serviço multimídia com rápida conectividade, maior segurança e alta mobilidade. No entanto, as especificações 3GPP não definem nenhuma estratégia de escalonamento que suporte aplicações de serviço em tempo real e serviços em tempo não real.

Neste capítulo, apresenta-se uma proposta de estratégia de escalonamento de pacotes com policiamento de tráfego, para melhorar o desempenho de dois algoritmos de escalonamento de pacotes convencionais que suportam serviços multimídia chamados de M-LWDF (do inglês, *Modified-Largest Weighted Delay First*) e EXP/PF (do inglês, *Exponential Proportional Fair*), a fim de, minimizar o atraso de pacotes na rede LTE na transmissão *downlink*. Inicialmente faremos uma breve revisão bibliográfica sobre as técnicas de escalonamento de pacotes e policiamento de tráfego relacionadas. Em seguida, descrevemos o esquema de escalonamento de pacotes proposto. Posteriormente proporemos e detalharemos esta nova estratégia de escalonamento proposta. Na seção de cenários de simulação, descreveremos a ferramenta de simulação, o ambiente de simulação, os parâmetros de simulação, o tráfego de simulação e as métricas de desempenho de simulação utilizadas. Finalmente, serão apresentados os resultados experimentais obtidos.

4.2 Trabalhos Relacionados

Existem muitos trabalhos de pesquisas propostos e estudados pela comunidade acadêmica sobre o escalonamento de pacotes no sistema LTE na transmissão *downlink*, simulado com a ferramenta LTE-Sim, entre eles temos [22], [24], [31], [37], [45], [55], [65], [56]. Dentre estes trabalhos, uma quantidade considerável de trabalhos avaliam o desempenho dos principais escalonadores na transmissão *downlink*. É possível identificar diversas abordagens de estratégias de escalonamento para serviços multimídia já existentes, conforme destacados a seguir.

Para satisfazer os requisitos de QoS, em [74] foi proposto um método chamado “Escalonador de balde de token” (do inglês, *Tocken Bucket* - TBS). O TBS utiliza relação sinal-interferência mais ruído (SINR) instantânea do canal *downlink* e informação de QoS, alocando recursos do canal para serviços em tempo real.

Em [42], os autores propõem um mecanismo baseado na teoria dos jogos cooperativos que realiza o compartilhamento de recursos baseado nos algoritmos de escalonamento MLWDF (do inglês, *Modified-Largest Weighted Delay First*) e na Regra EXP (do inglês, *Exponential Rule*) através do mecanismo de token virtual com intuito de oferecer melhor desempenho para os fluxos em tempo real na transmissão *downlink*.

Em [50], a condição de canal do usuário desempenha o papel essencial para o novo mecanismo de escalonamento proposto, empregando uma métrica baseada em relatórios do indicador de qualidade de canal (do inglês, *Channel Quality Indicator* - CQI) e prioridade *bearer* para tomada de decisão.

Em [66], o escalonador proposto considera características de tráfego em tempo real na sua implementação principalmente em termos dos requerimentos de atraso. O mecanismo implementado visa evitar a expiração do prazo de descarte de pacotes recebidos na fila de transmissão no eNodeB.

Em [48], os autores modificam o algoritmo PF (do inglês, *Proportional Fair*) levando em consideração o atraso de pacote HOL (do inglês, *Head of Line*) e o tempo residual do pacote no *buffer* até ser descartado.

Em [38], é proposto um algoritmo de alocação de blocos de recursos para sistemas LTE, levando em consideração o critério de atraso máximo e as restrições impostas pelo esquema de modulação e codificação (do inglês, *Modulation and Coding Scheme* - MCS) para transmissão *downlink*. O algoritmo de alocação proposto tenta reduzir o atraso de transmissão utilizando a informação do atraso real da rede e a qualidade do canal. O algoritmo de alocação implementado considera a qualidade do canal e o limitante de atraso, estimado através de Cálculo de Rede que utiliza curva de serviço e processo envelope MFBAP (do inglês, *Multifractal Bounded Arrival Process*), para decidir sobre a alocação de recursos de rádio disponíveis. Este conjunto de tarefas realizadas tem como finalidade fornecer resultados que ajudem no processo da estratégia de escalonamento de pacotes no sistema LTE, melhorando o desempenho dos usuários e também garantindo a qualidade de serviço (QoS) exigida.

Diante dos trabalhos pesquisados de mecanismos de escalonamento de pacotes na transmissão *downlink* já reportado na literatura, notamos que ainda é possível melhorar a eficiência das estratégias de escalonamento que atende os serviços em tempo real de forma

eficiente. A estratégia proposta neste trabalho busca um melhor desempenho no sistema LTE na transmissão *downlink*, garantindo um atraso máximo permitido para os serviços em tempo real dos usuários.

4.3 Esquema Proposto de Escalonamento de Pacote Downlink

A Figura 4.1 apresenta um esquema básico de escalonamento de pacotes com policiamento de tráfego na direção *downlink*. O esquema proposto atende os requisitos de qualidade de serviço (QoS) para diferentes aplicações de serviço em tempo real, coletando as informações de cada fluxo de tráfego relacionadas sobre o estado do canal do usuário (UE), atraso de transmissão, estado do *buffer*, taxa de perda, entre outros. As informações coletadas são utilizadas pelo escalonador de pacotes para o cálculo de uma métrica de prioridade de transmissão para cada fluxo dentro do eNodeB.

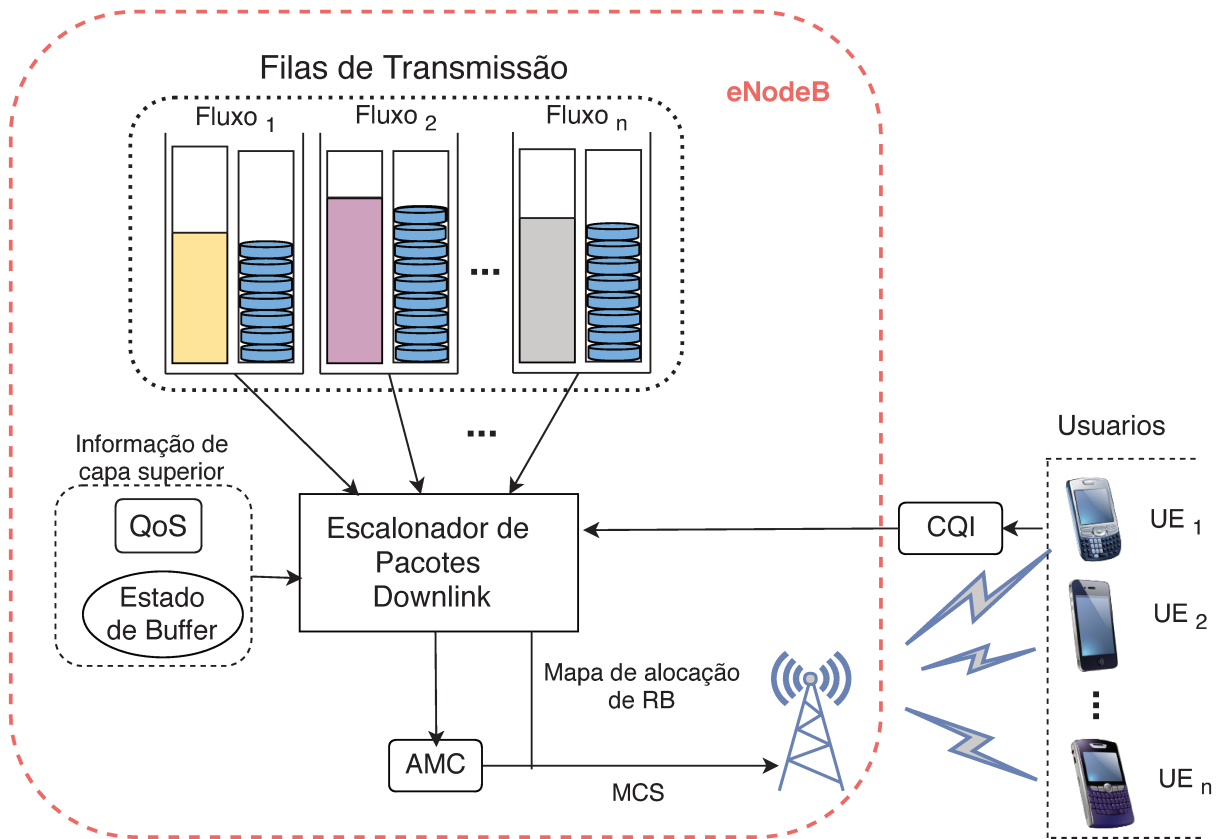


Figura 4.1: Esquema proposto de escalonamento de pacote com policiamento de tráfego na direção *downlink*

O esquema de escalonamento apresentado possui uma estrutura dinâmica que garante a interoperabilidade entre vários módulos internos, realizando as seguintes tarefas:

- (i) As filas de transmissão são responsáveis pela transmissão de dados de cada serviço de aplicação. Cada fila de transmissão é construída juntamente com um policiador de tráfego conhecido como regulador de balde furado, a fim de satisfazer a taxa de transmissão requerida.

- (ii) As seguintes informações são recebidas e coletadas pelo escalonador:
 - (a) Primeiramente o estado de cada fila de transmissão e do balde furado para depois ser transmitido ao escalonador de pacotes no eNodeB.
 - (b) Em seguida temos o relatório do estado do *buffer* BSR (*Buffer Status Reporter*), ele cumpre a função de receber periodicamente as informações do *buffer* de recepção de cada usuário (UE) e transmitir para o escalonador de pacotes no eNodeB.
 - (c) Por ultimo, temos o indicador de qualidade de canal CQI (*channel Quality indicator*), que é usado pelo usuário (UE) para informar ao escalonador de pacotes no eNodeB sobre a qualidade do estado do canal na direção *downlink*, a fim de ajudar ao escalonador do eNodeB selecionar um esquema de modulação e codificação adaptativa AMC (*adaptive Modulation and Coding*) mais adequado para transmissão de pacotes aos usuários (UE) naquele momento.
- (iii) O escalonador de pacote do eNodeB, utiliza as informações coletadas para calcular uma métrica prioritária de transmissão a fim de alocar recursos para cada usuário (UE).

4.4 Algoritmo de Escalonamento Proposto

Em redes LTE, o objetivo principal do escalonador de pacote é satisfazer os requisitos de qualidade de serviço (QoS) de todos os usuarios (UE), alcançando um compromisso (*trade-off*) entre a eficiência e equilíbrio, especialmente na presença de aplicativos multi-mídia em tempo-real [30]. Na literatura existem vários algoritmos de escalonamento de pacotes que suportam tráfegos de aplicações em tempo-real (do inglês, *Real Time* - RT) e tempo não real (do inglês, *non-Real Time* non-RT) para redes móveis e sem fio.

Nesta dissertação, analisa-se e compara-se o desempenho de dois algoritmos de escalonamento M-LWDF e EXP/PF convencionais [34], [26], [29] com os algoritmos de escalonamentos propostos. Cada um dos algoritmos convencionais mencionados acima, possui uma estratégia distinta de distribuição de recursos de rede. [42].

Os algoritmos M-LWDF e EXP/PF, os mesmos que foram definidos nas equações (2.3) e (2.4) da subseção 2.7.3 respectivamente, tomam decisões de escalonamento baseadas em atraso máximo permitido de um serviço de aplicação e a condição do canal de um usuário (UE) [59]. No entanto, essas medidas são insuficientes para determinar a prioridade do escalonamento em serviços de tempo-real. Devemos considerar a taxa de bits requerida e o atraso na tomada de decisões do escalonador de pacotes, incluindo as informações do estado da fila de transmissão, tais como: o atraso de pacotes na fila e o comprimento da fila de transmissão, sendo informações iniciais para especificar a qualidade de serviço (QoS) requerida. De fato, uma das formas mais efetivas para alcançar certa qualidade de serviço (QoS) é através de um controle eficaz das filas de transmissão [27].

A Figura 4.2 mostra o modelo da fila de transmissão no eNodeB projetado para obter a informação do atraso de pacote HOL (do inglês, *Head of Line*) [31].

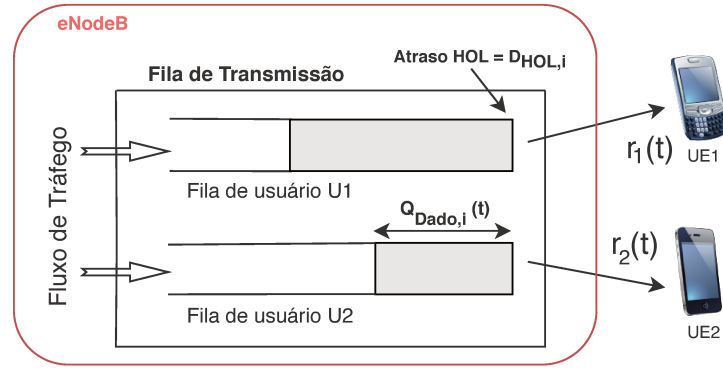


Figura 4.2: Modelo da fila de transmissão no eNodeB

O atraso de pacotes HOL do fluxo i é denotado por $D_{HOL,i}$ que indica o atraso do primeiro pacote a ser transmitido na fila de transmissão. Se substituirmos o atraso HOL pelo comprimento da fila $Q_{Dado,i}(t)$ [27] (vide na Figura 4.2), obtemos a seguinte expressão:

$$D_{HOL,i} = \frac{Q_{Dado,i}(t)}{r_i(t)} \quad (4.1)$$

onde $Q_{Dado,i}(t)$ denota o número de pacotes acumulados na fila de transmissão do fluxo i no tempo t e $r_i(t)$ denota a taxa de transmissão calculada com base no estado do canal sem fio transmitido pelo usuário (UE) através do indicador de qualidade do canal (CQI) [31], [23].

O $D_{HOL,i}$ varia dependendo do tamanho dos pacotes acumulados na fila de transmissão e da taxa de transmissão do usuário (UE). A situação de maior acúmulo de pacotes aguardando na fila de transmissão para serem transmitidos implica maior atraso de HOL e maior atraso na transmissão de pacotes devido ao longo tempo de espera. Em contraste, um menor tamanho de pacotes acumulados na fila de transmissão implica menos atraso HOL e menor atraso de transmissão devido a um curto tempo de espera.

Um método de controle para este fim acima mencionado foi descrito na seção 3.4 chamado de mecanismo de policiamento de tráfego ou regulador de balde furado (LB) [44], [69]. Este método de regulador de balde furado (LB) definido na equação (3.9) modifica o tráfego de entrada para obter um fluxo regulado na saída do “balde”, com média igual a \bar{a} e rajadas máxima igual a S . Normalmente o balde furado tradicional não funciona satisfatoriamente quando o tráfego de entrada tem comportamento de rajadas, causando o descarte de dados bem comportados [73], [69]. Particularmente este fenômeno pode ser amplamente observado quando o tráfego de entrada apresenta a característica monofractal e multifractal [69].

Neste contexto, na seção 3.4.2 foi apresentado o Balde Furado Fractal (FLB) [39] definida na equação (3.14). O regulador FLB lida com traços de tráfegos de entrada de natureza monofractal, provou ser um mecanismo eficaz para policiar e controlar fontes monofractais [70]. O parâmetro característico do FLB é o parâmetro de *Hurst* (H) que fornece um valor fixo. Além disso, na seção 3.4.3 foi apresentado o Balde Furado Multifractal (MLB) [73] definida pela equação (3.18). O regulador MLB lida com traços de tráfegos de entrada de natureza multifractal, que tornou-se evidente para tráfego real de rede. O parâmetro característico do MLB é o expoente Hölder ($H(t)$) descreve os com-

portamentos altamente irregulares que os processos multifractais exibem em função do tempo.

Para nossa análise substituímos o parâmetro \bar{a} (taxa média do tráfego de entrada) pelo parâmetro ρ sendo uma taxa fixa originada pela média do tráfego de entrada do *buffer* (vide na Figura 4.3). A ação do balde furado é iniciada com as permissões ou tokens sendo gerados a uma taxa fixa ρ e armazenados num balde de tamanho S . Assim o tráfego é liberado na saída do *buffer* para rede com a média igual a ρ . Em nossa análise o tráfego é assumido infinitamente divisível [33], [69].

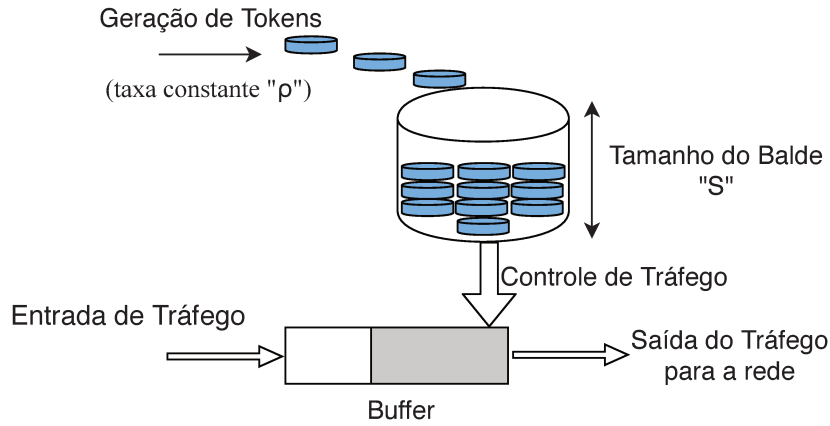


Figura 4.3: Funcionamento do modelo de balde furado

Para garantir uma taxa de transmissão e serviço de aplicação requerida, associamos a cada fila de transmissão de dados um regulador de balde furado em que tokens ou permissões chegam a uma taxa constante ρ como mostra na Figura 4.4. A taxa de transmissão requerida é especificada baseada nas informações do balde furado associado a cada fila de transmissão dentro do eNodeB, que depende da característica do funcionamento do balde em termos de mecanismo de gerenciamento dos tokens restantes no balde e os estados da fila de transmissão.

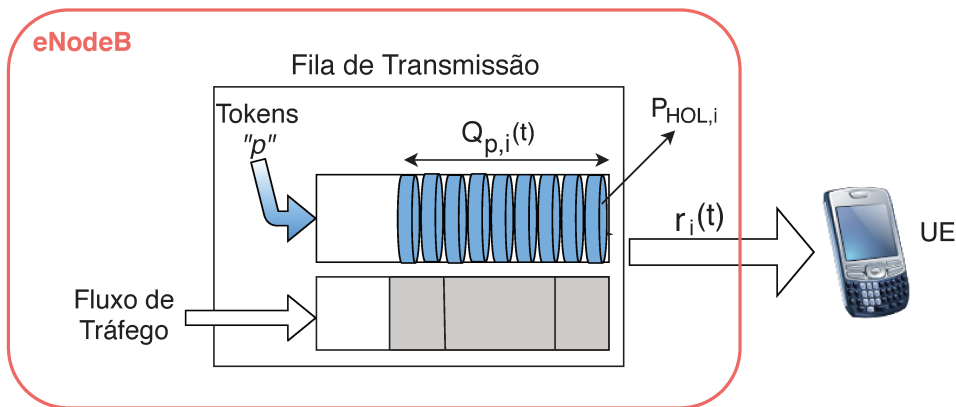


Figura 4.4: Modelo da fila de transmissão com policiamento na eNodeB

Definimos $P_{HOL,i}$ para ser o atraso de token HOL (*Head of Line*) do balde furado (LB) no fluxo i . O atraso HOL do balde furado pode ser determinado usando a equação (4.2) onde $Q_{P,i}(t)$ denota o número de tokens acumulados no balde para o fluxo i no tempo t

e ρ representa a taxa constante de geração de tokens.

$$P_{HOL,i} = \frac{Q_{P,i}(t)}{\rho} \quad (4.2)$$

O $P_{HOL,i}$ do balde furado varia proporcionalmente de acordo com o número de tokens ou permissões restantes no balde furado. Grande quantidade de tokens ou permissões acumulados no balde furado implica maior $P_{HOL,i}$ o que indicaria que a taxa de transmissão de dados na fila de transmissão está longe da taxa de transmissão desejada. Nessa situação, o escalonador de pacotes deve atribuir uma maior prioridade para a fila em questão aumentando a taxa de transmissão de dados.

Os algoritmos de escalonamento M-LWDF e EXP-PF convencionais, apresentam o atraso $D_{HOL,i}$ em suas equações, as mesmas que foram definidas nas equações (2.3) e (2.4), respectivamente. Se substituirmos o $D_{HOL,i}$ pelo $P_{HOL,i}$ do balde, afim de, obter as novas métricas modificadas dos algoritmos de escalonamento convencionais (M-LWDF e EXP-PF) representada como $w_{i,j}^{(p)}$ que denota a métrica com policiamento que atribuída o fluxo i no sub-canal j , expressadas nas seguintes equações (4.3) e (4.4) respetivamente.

- ***M-LWDF com Policiamento (Modified- Largest Weighted Delay First - com Policiamento)***

$$w_{i,j}^{(p)} = -\frac{\log \delta_i}{\tau_i} P_{HOL,i} \frac{r_{i,j}}{\bar{R}_i} \quad (4.3)$$

- ***EXP/PF com Policiamento (Exponential Proportional Fair - com Policiamento)***

$$w_{i,j}^{(p)} = \exp\left(\frac{\alpha_i P_{HOL,i} - \lambda}{1 + \sqrt{\lambda}}\right) \frac{r_{i,j}}{\bar{R}_i} \quad (4.4)$$

onde $r_{i,j}$ denota a taxa de dados instantâneas disponível para o fluxo i no sub-canal j , \bar{R}_i representa a taxa média de dado no fluxo i , $P_{HOL,i}$ define o atraso de token HOL (*Head of Line*) do balde furado no fluxo i , a expressão α_i é definida como a razão entre o limite de atraso de pacote τ_i e a probabilidade δ_i definida como a probabilidade máxima de atraso no fluxo i seja descartado e a expressão λ é definida como:

$$\lambda = \frac{1}{N_{rt}} \sum_{i=1}^{N_n} \alpha_i P_{HOL,i} \quad (4.5)$$

onde N_{rt} representa o número de fluxos ativos em tempo real na direção *downlink*.

4.5 Cenários de Simulação

Nesta seção, apresentamos o desempenho das estratégias de escalonamento de pacotes em cenário de tráfego multimídia obtido via simulação. Inicialmente descreveremos a ferramenta de simulação LTE-Sim focando nas simulações computacionais de cenários de rede LTE. Precisamente são detalhados os ambientes de simulação dos cenários, distribuição de usuários, parâmetros de simulação utilizada, tráfego de simulação e por último as métricas de simulação.

4.5.1 Ferramenta de Simulação

As estratégias de escalonamento de pacotes propostas são avaliadas via simulação, utilizamos a ferramenta computacional LTE-Sim para simular vários cenários de rede LTE. O LTE-Sim é uma plataforma de simulação de código aberto (*open source*), escrito na linguagem C++ e disponível gratuitamente sob a licença GPLv3 [59]. O simulador LTE-Sim permite simular estratégias de escalonamento de pacotes nas direções *downlink* e *uplink* em ambientes de multi-usuários/multi-células levando em consideração a mobilidade dos usuários, otimização de recursos de rádio, técnicas de reuso de frequência, técnica de codificação e modulação adaptativa (*Adaptive Modulation and Coding* - AMC) entre outros. O LTE-Sim pode simular diferentes serviços (BE (do inglês, *Best Effort*) e CBR (*Constant Bit Rate*)) atendendo diversos tipos de tráfego (VoIP e Vídeo). O LTE-Sim implementa e simula ainda as camadas MAC e PHY segundo as especificações 3GPP [16], [15].

4.5.2 Ambiente de Simulação

Nesta seção, todas as simulações feitas se baseiam no mesmo modelo de cenário com uma única macro célula de área urbana com interferência inter-celular e múltiplos usuários composta de uma estação de rádio base eNodeB no centro da célula e vários usuários (UEs) como mostra a Figura 4.5. Os usuários (UEs) são distribuídos uniformemente na área celular de cobertura equivalente a 1km de raio deslocando-se em direção aleatória seguindo o modelo de mobilidade *Random Walk*.

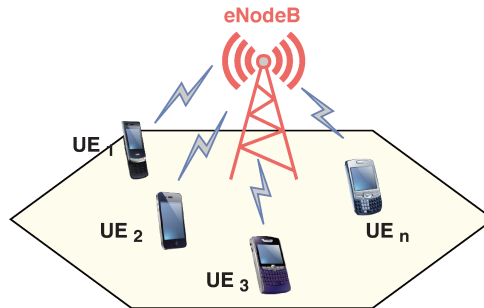


Figura 4.5: Ambiente de simulação de uma única célula com múltiplos usuários

Para avaliar o desempenho das estratégias dos escalonamentos, foram considerados dois casos. O primeiro caso ocorre quando os usuários se deslocando dentro da célula em direção aleatória a uma velocidade pedestre de 3km/h , enquanto o segundo caso quando os usuários se deslocam dentro da célula em direção aleatória a uma velocidade veicular constante de 120km/h .

Em relação a perda de propagação do sinal de rádio, consideramos quatro diferentes fenômenos na simulação, sugeridos pelo 3GPP a seguir [3], [6] a seguir:

1. **Perda por percurso (*Path Loss*):** é definida como a redução na densidade da potência quando a onda eletromagnética se propaga no espaço. Esta perda é principalmente influenciada pela distância de separação entre o transmissor e o receptor e a atenuação por meio de propagação. Para um ambiente macro-celulares

emprega-se a seguinte equação (4.6):

$$L = 128.1 + 37.6 \log_{10}(d) \quad (4.6)$$

onde d representa a distância entre o usuário (UE) e o eNodeB, em km .

2. **Perdas por desvanecimento rápido (*Fast Fading*)**: é a propagação caracterizada por flutuações rápidas em distâncias muito curtas. Para nosso caso, empregamos o modelo de Jakes' [43].
3. **Perda por Penetração (*Penetration Loss*)**: quando o usuário se encontra em um ambiente que tem construções, estas obstruem o sinal percorrido causando um desvanecimento na potência. Esta perda é considerada de desvanecimento lento porque é contabilizada para longos deslocamentos. Aqui consideramos uma perda de $10dB$.
4. **Perda por sombreamento (*Shadow fading*)**: indica bloqueio do sinal devido a grandes objetos obstruindo o caminho de propagação entre emissor e receptor. Em nosso caso para avaliar a perda por sombreamento se emprega uma distribuição log-normal com média de $0dB$ e desvio padrão de $8dB$ de perda.

4.5.3 Parâmetros de Simulação

Os valores dos principais parâmetros de simulação considerados no simulador LTE-Sim são listados na Tabela 4.1. Os valores foram escolhidos principalmente em razão a serem frequentemente mencionados pelos artigos da literatura ([22], [42], [45], [48], [53]) o que facilita a avaliação da estratégia de escalonamento proposta e a comparação de performance.

Tabela 4.1: Parâmetros de simulação para rede LTE *Downlink*

| Parâmetros | Valores |
|----------------------------|----------------------------------|
| Duração de simulação | 150 s |
| Duração de fluxo | 120 s |
| Rádio de cobertura | 1 km |
| Largura de banda | 10 MHz |
| Duração de slot | 0,5 ms |
| Tempo de escalonador (TTI) | 1 ms |
| Número RBs | 50 |
| Máximo Atraso | 0.1 s |
| Escalonadores | M-LWDF e EXP/PF |
| Estrutura de frame | FDD, 10 ms de duração de frame |
| Taxa de Bit de Vídeo | 242 $kbps$ |
| Taxa de Bit de VoIP | 8.4 $kbps$ |
| Mínimo número de usuários | 10 UEs |
| Máximo número de usuários | 40 UEs |
| Intervalo entre usuários | 5 UEs |
| Simulador | LTE-Sim |

4.5.4 Tráfego de Simulação

Neste trabalho focamos nos serviços de transmissão em tempo real (do inglês, *Real Time*) com cenários de simulação envolvendo os tráfegos de Vídeo e Voz (VoIP). Para serviços de vídeo, consideramos um fluxo de tráfego de Vídeo “Foreman” no formato H264 com taxa de bits de 246 *kbps* [60]. Para serviço de voz, adotamos o tráfego de Voz (VoIP) gerado por um aplicativo no formato G.729 baseado no modelo de Cadeia de *Markov* do tipo ON/OFF. O período ON é exponencialmente distribuído com valor médio de 3s, e o período OFF segue uma distribuição exponencial truncada com o limite máximo de 6,9s e o valor médio de 3s. Durante o período ON, o aplicativo gera pacotes de 20 *bytes* de tamanho a cada 20ms com taxa de dados de 8,4*kbps* e durante o período OFF a taxa é zero porque é assumida a presença de um detector de actividade de voz (do inglês, *Voice Activity Detector*) [59].

Para representar os serviços em tempo não real (do inglês, *non-Real Time*) consideramos um modelo de fluxo *Best Effort* (BE) que é um estratégia ideal sempre quando tiver pacotes para serem enviados [59].

A Tabela 4.2 lista os parâmetros dos tráfegos de simulação considerados e requisitos de QoS dos UEs.

Tabela 4.2: Tráfegos de simulação e requisito de QoS dos UEs

| Serviço | VoIP | Vídeo | Best Effort |
|-----------------|------------------------|--|------------------------|
| Descrição | G.729 Modelo ON/OFF | H.246 Baseado em trace ¹ | 500 bytes cada 8 ms |
| Taxa de bit | 8.4 kbps | 242 kbps | 100 kbps |
| Tipo de Tráfego | Conversacional | Streaming | Background |
| CQI | 1 | 2 | 9 |
| Prioridade | 2 | 4 | 9 |
| Tipo | GBR | GBR | nonGBR |

¹ Usou-se o traços (*trace*) do vídeo Foreman, que se encontra disponível no site [60].

4.5.5 Métricas de Desempenho de Simulação

O desempenho de serviços multimídia em tempo real sob os esquemas acima discutidos é avaliado com métricas que estão relacionadas com requisitos de QoS. As descrições detalhadas destas métricas seguem abaixo:

- **Vazão média (em bit por segundo, bps):**

Ela é definida como a razão entre o número total de bits transmitidos com sucesso pelo canal físico (entre origem e o destino), durante um determinado período de tempo e, é dada pela seguinte expressão:

$$vazão(bps) = \frac{(\sum_{i=1}^N D_i) \times 8}{T_f} \quad (4.7)$$

onde N representa o número total de pacotes recebidos com sucesso, D_i corresponde ao tamanho de bytes do pacote i e T_f denota o tempo da duração do fluxo.

- **Atraso médio (em segundos, s):**

O atraso médio de pacotes e o tempo gasto para os pacotes transmitir com sucesso desde a eNodeB até UE através da rede LTE e é calculado via a seguinte expressão:

$$AtrasoMédio(segundos) = \frac{\sum_{i=1}^N (Tch_i - Tg_i)}{N} \quad (4.8)$$

onde Tg_i denota o tempo de geração de pacotes i , Tch_i representa o tempo de chegada de pacotes i e N corresponde o número total de pacotes recebidos com sucesso.

- **Taxa de perda de pacotes (percentagem):**

A taxa de perda de pacotes tem como objetivo medir a percentagem de pacotes que viajam através de um canal físico que não conseguem chegar a seu destino, é definido pela seguinte expressão:

$$PerdaPacotes(\%) = \left(1 - \frac{\sum Prx}{\sum Ptx}\right) \times 100 \quad (4.9)$$

onde $\sum Prx$ denota o número total de pacotes recebidos e $\sum Ptx$ denota o número total de pacotes enviados ou transmitidos.

4.6 Resultados Experimentais

Nesta seção, apresentamos os resultados obtidos através de simulações computacionais de cenários LTE utilizando o simulador LTE-Sim. Para cada cenário considerado foram realizadas repetidamente 20 (vinte) execuções de procedimento de simulação computacionais com o objetivo de obter os resultados com alta confiabilidade.

Variamos também os números dos usuários (UEs) em ambiente de simulação com multiplos serviços distribuídos na forma aleatória na área de cobertura da célula de 1km de raio.

A Tabela 4.3 mostra a proporção de cada serviço envolvido na simulação em termos de carga de tráfego, seguindo os valores sugerido pelos artigos [22], [42], [45], [48], [53].

Tabela 4.3: Distribuição do tipo de tráfego usado em [42], [48], [53]

| Serviços | Distribuição |
|-----------------------|--------------|
| VoIP | 40% |
| Vídeo | 40% |
| Tráfego de background | 20% |

Os desempenhos das estratégias de escalonamento propostas M-LWDF-*Com Policiamento* e EXP/PF-*Com Policiamento*, baseados em reguladores de tráfego LB (*Leaky Bucket*), FLB (*Fractal Leaky Bucket*) e MLB (*Multifractal Leaky Bucket*), foram comparados com os desempenhos dos principais algoritmos já disponíveis no simulador LTE-Sim, tais como, os escalonadores M-LWDF e EXP/PF convencionais. As comparações de performance são feitas baseadas nas seguintes medidas de desempenho: atraso médio de

pacotes, taxa de perda de pacotes e vazão média. A Tabela 4.4 lista as notações dos algoritmos estudados na simulação.

Tabela 4.4: Notações e descrições dos algoritmos usadas pelos simulações

| Expressão | Significado |
|------------|---|
| M-LWDF | Algoritmo <i>Modified Largest Weighted Delay First</i> , calculado conforme equação (2.3) |
| EXP/PF | Algoritmo <i>Exponential Proportional Fair</i> , calculado conforme equação (2.4) |
| M-LWDF-P | Algoritmo M-LWDF <i>com Policiamento</i> |
| M-LWDF-LB | Representa o algoritmo M-LWDF policiado com o algoritmo de balde furado (LB - <i>Leaky Bucket</i>) calculado conforme equação (4.3) |
| M-LWDF-FLB | Representa o algoritmo M-LWDF policiado com o algoritmo de balde furado fractal (FLB - <i>Fractal Leaky Bucket</i>) calculado conforme equação (4.3) |
| M-LWDF-MLB | Representa o algoritmo M-LWDF policiado com o algoritmo de balde furado multifractal (MLB - <i>Multifractal Leaky Bucket</i>) calculado conforme equação (4.3) |
| EXP/PF-P | Representa o algoritmo EXP/PF <i>com Policiamento</i> |
| EXP/PF-LB | Representa o algoritmo EXP/PF policiado com o algoritmo de balde furado (LB - <i>Leaky Bucket</i>) calculado conforme equação (4.4) |
| EXP/PF-FLB | Representa o algoritmo EXP/PF policiado com o algoritmo de balde furado fractal (FLB - <i>Fractal Leaky Bucket</i>) calculado conforme equação (4.4) |
| EXP/PF-MLB | Representa o algoritmo EXP/PF policiado com o algoritmo balde furado multifractal (MLB - <i>Multifractal Leaky Bucket</i>) calculado conforme equação (4.4) |

4.6.1 Cenários com Tráfego de Vídeo

4.6.1.1 Caso A - Usuários com velocidade pedestre de $3km/h$

Atraso Médio. As Figuras 4.6 e 4.7 mostram os resultados de simulação para atraso de tráfego de vídeo usando os algoritmos de escalonamento M-LWDF e EXP/PF, respectivamente, simulando a uma velocidade pedestre de $3km/h$. Note que o atraso cresce invariavelmente com o aumento do número de usuários para todos os algoritmos de escalonamento considerados. Porém, quando usado o algoritmo de escalonamento M-LWDF policiado com os reguladores de tráfego LB, FLB e MLB, os atrasos obtidos são menores do que M-LWDF convencional. Além disso, observa-se que os atrasos de fluxo de vídeo com o algoritmo de escalonamento EXP/PF mostrado na Figura 4.7, quando o escalonador EXP/PF é policiado com os reguladores de tráfego MLB e LB são menores em comparação com os demais escalonadores. Claramente, para fluxos de vídeo com 40 usuários, os atrasos medidos de todos os escalonadores M-LWDF superam os atrasos da

maioria dos escalonadores EXP/PF mostrados na Figura 4.8.

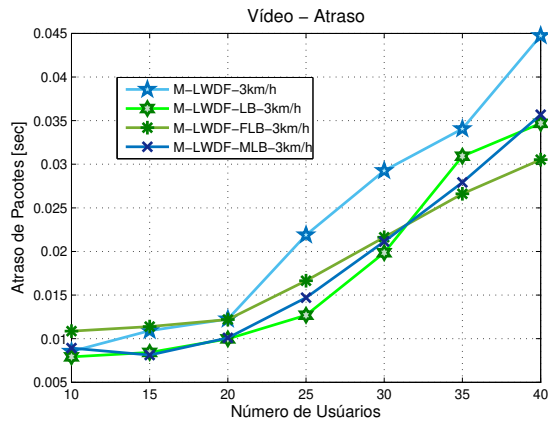


Figura 4.6: Atraso para fluxos de vídeo com o escalonador M-LWDF

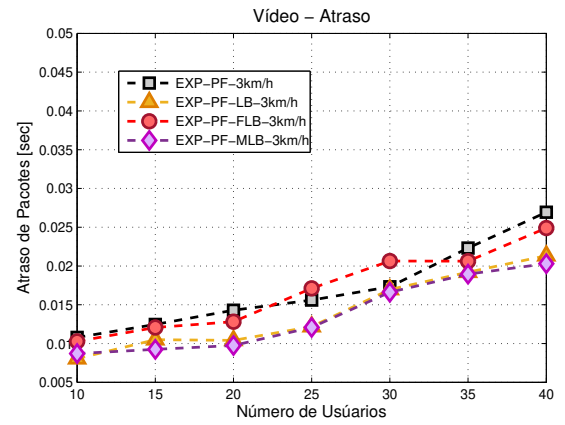


Figura 4.7: Atraso para fluxos de vídeo com o escalonador EXP/PF

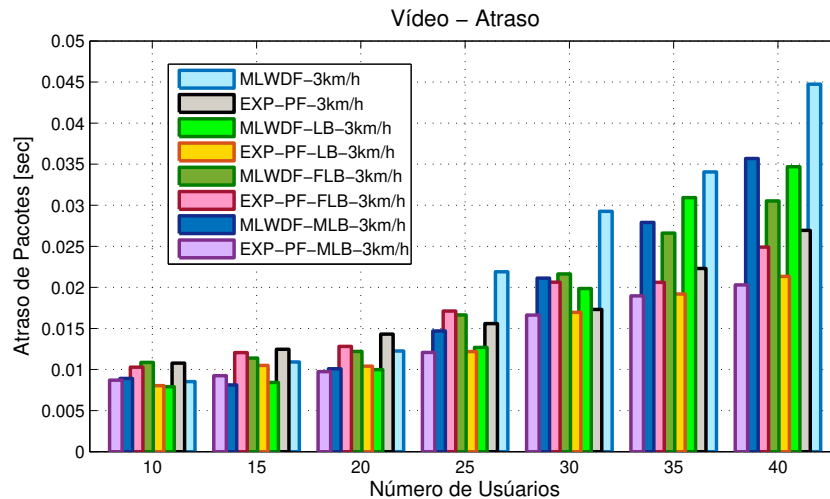


Figura 4.8: Atraso versus número de usuários para fluxos de vídeo com velocidade de 3km/h

Perda de Pacotes. A Figura 4.9 mostra que os resultados de simulação para a perda de pacotes de vídeo que permanece estável abaixo de 10% para todos os escalonadores quando o número de usuários é menor que 20. Além disso, o algoritmo de escalonamento M-LWDF-MLB garante a menor taxa de perda em comparação com os demais versões dos escalonadores M-LWDF. A Figura 4.10 apresenta a perda de pacotes para fluxos de vídeo usando o escalonador EXP/PF, os escalonadores EXP/PF-MLB e EXP/PF-LB, possuem menores perdas ao incrementar os números dos usuários. Por fim, os escalonadores M-LWDF-MLB, EXP/PF-LB e EXP/PF-MLB mantêm uma taxa de perda relativamente menor em comparação com os demais escalonadores. De fato, conforme mostrado na Figura 4.11, para o fluxo de vídeo com 40 usuários, o escalonador M-LWDF-MLB supera os demais escalonadores com perda de pacotes menores.

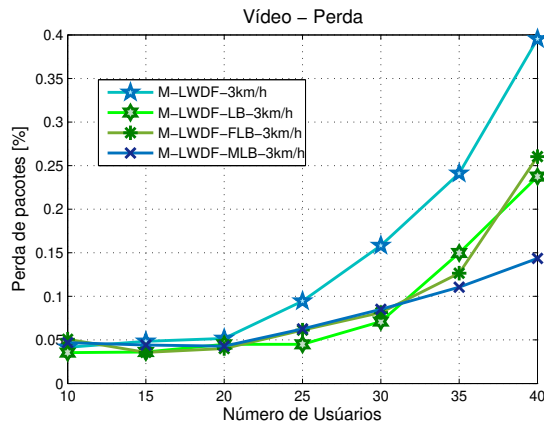


Figura 4.9: Perda de pacotes para fluxos de vídeo com o escalonador M-LWDF

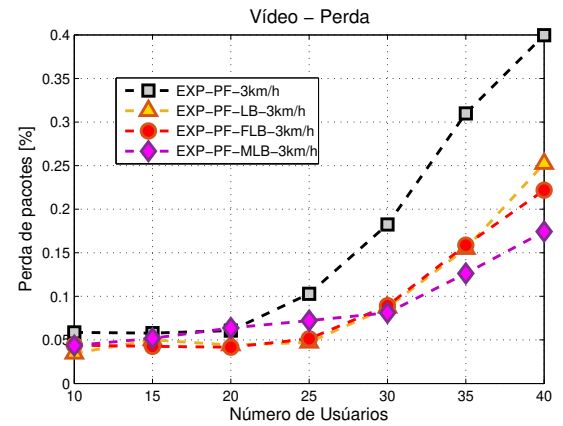


Figura 4.10: Perda de pacotes para fluxos de vídeo com o escalonador EXP/PF

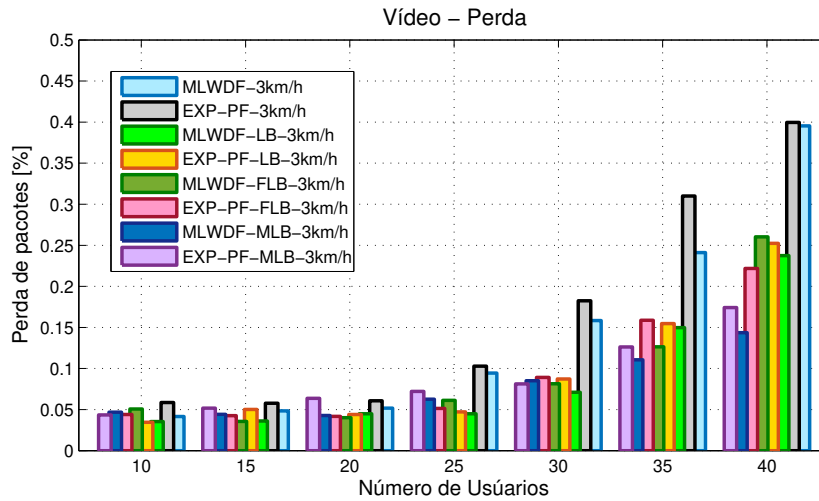


Figura 4.11: Perda de pacotes versus número de usuários para fluxos de vídeo com velocidade de 3km/h

Vazão Média. O desempenho da vazão média para fluxo de vídeo obtido através da simulação é mostrado nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14. Quando o número de usuários aumenta na célula, a vazão média do fluxo de vídeo diminui efetivamente para todos os algoritmos de escalonamentos considerados, o que significa que a quantidade de dados que pode fluir através da rede é reduzida com o aumento dos números de usuários, característica muito comum para toda a rede. Enquanto que, na Figura 4.13 os escalonadores EXP/PF-LB e EXP/PF-MLB apresentam um desempenho semelhante com menor declínio de vazão média comparados com dos demais escalonadores.

4.6.1.2 Caso B - Usuários com velocidade veicular de 120km/h

Atraso Médio As Figuras 4.15 e 4.16 mostram o resultado de simulação para o atraso de tráfego de vídeo usando os algoritmos de escalonamento M-LWDF e EXP/PF respectivamente, simulando a uma velocidade veicular de 120km/h. Note que o atraso cresce invariavelmente com o aumento do número de usuários para todos os algoritmos

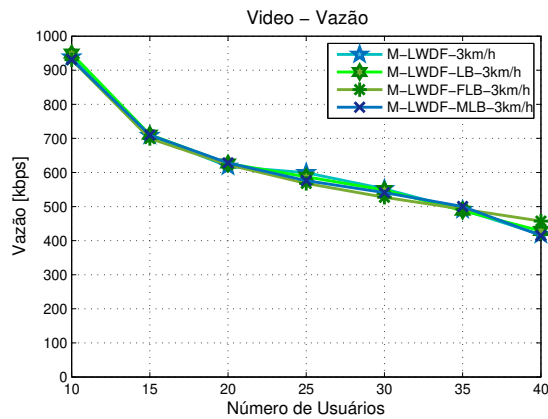


Figura 4.12: Vazão para fluxos de vídeo com o escalonador M-LWDF

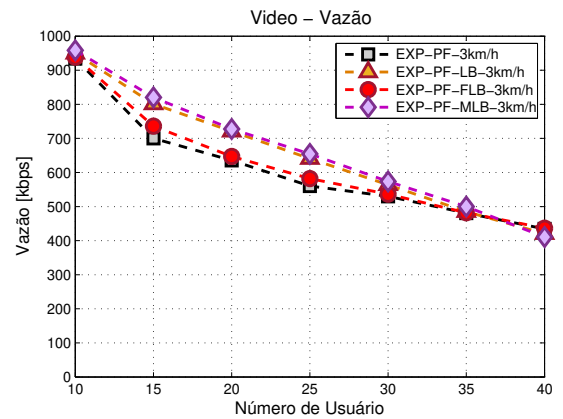


Figura 4.13: Vazão para fluxos de vídeo com o escalonador EXP/PF

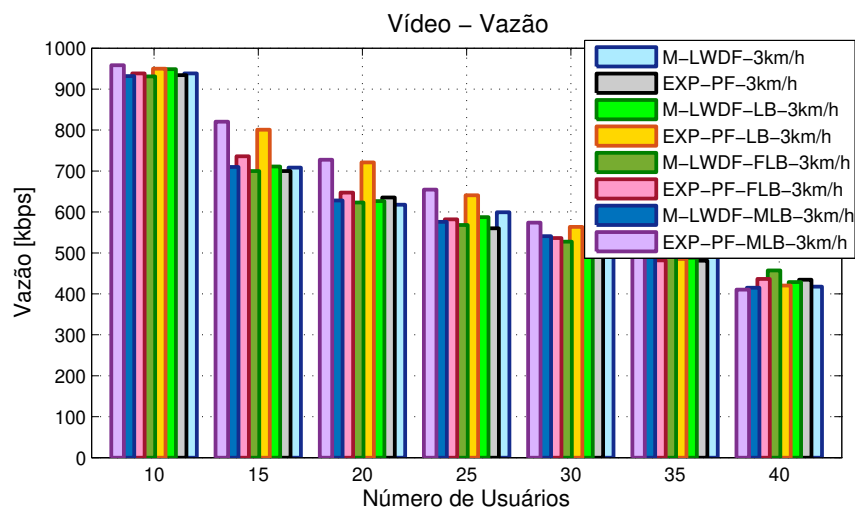


Figura 4.14: Vazão versus número de usuários para fluxos de vídeo com velocidade de 3km/h

de escalonamento considerados. Porém, quando usado o algoritmo de escalonamento M-LWDF policiado com os reguladores de tráfego LB e MLB, os atrasos são menores do que M-LWDF convencional. Além disso, quando o algoritmo de escalonamento EXP/PF policiado com os reguladores de tráfego LB e MLB são menores em comparação com os demais escalonadores. Observa-se na Figura 4.17 o atraso de tráfego para fluxo de vídeo com 40 usuários, os escalonadores EXP/PF-MLB e EXP/PF-LB apresentam menor atraso em comparação com os demais escalonadores considerados.

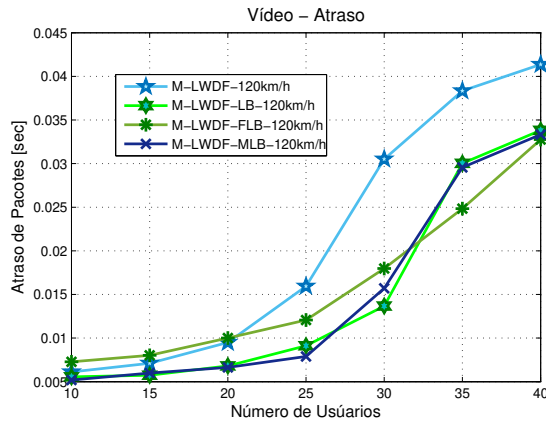


Figura 4.15: Atraso para fluxos de vídeo com o escalonador M-LWDF

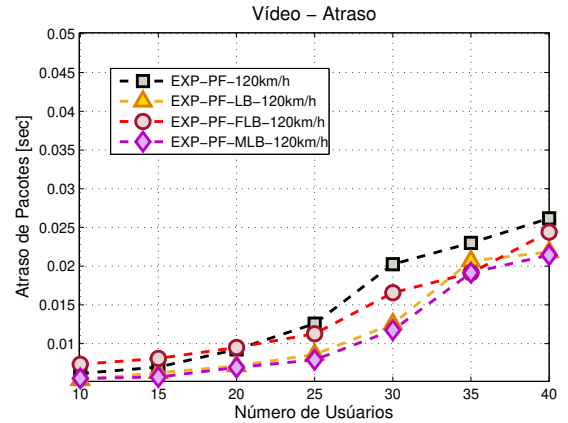


Figura 4.16: Atraso para fluxos de vídeo com o escalonador EXP/PF

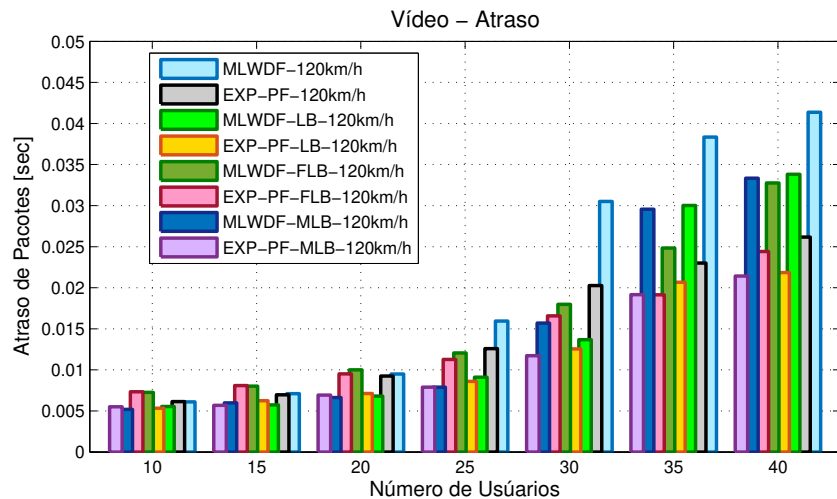


Figura 4.17: Atraso versus número de usuários para fluxos de vídeo com velocidade de 120km/h

Perda de Pacotes A Figura 4.18 mostra os resultados de simulação para taxa de perda de pacotes para vídeo, onde permanece estável para todos os escalonadores quando o número de usuários é menor que 20. Além disso, o algoritmo de escalonamento M-LWDF-MLB apresenta atraso menor em comparação com os demais versões dos escalonadores M-LWDF. Na Figura 4.19 apresenta as taxas de perda para fluxos de Vídeo usando o escalonador EXP/PF, o escalonador EXP/PF-MLB se mantém estável até 20 usuários e

apresenta menor perda ao incrementar os números de usuários. Por fim, conforme mostrado na Figura 4.20 para taxa de perda de Vídeo com 40 usuários, os escalonadores M-LWDF-MLB e EXP/PF-MLB mantêm uma taxa de perda relativamente mais lenta em comparação com as demais escalonadores considerados, apresentando melhor desempenho na simulação.

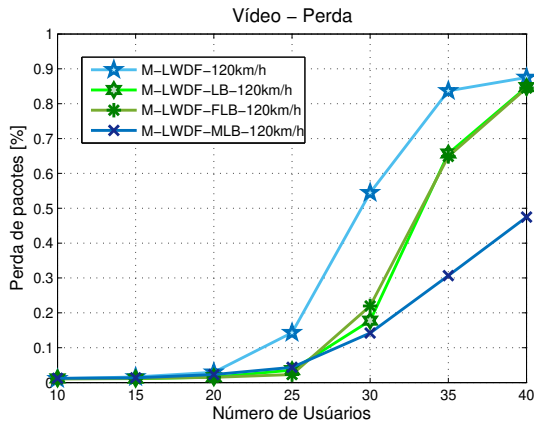


Figura 4.18: Perda de pacotes para fluxos de vídeo com o escalonador M-LWDF

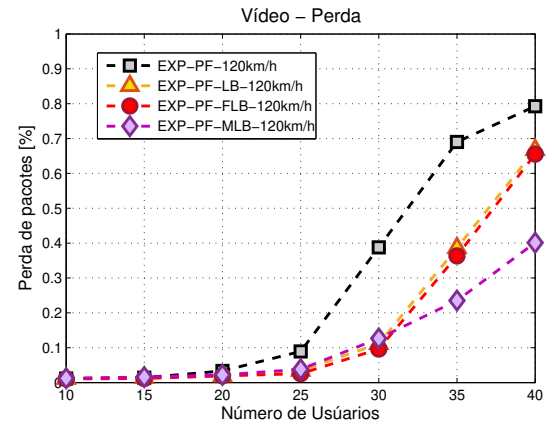


Figura 4.19: Perda de pacotes para fluxos de vídeo com o escalonador EXP/PF

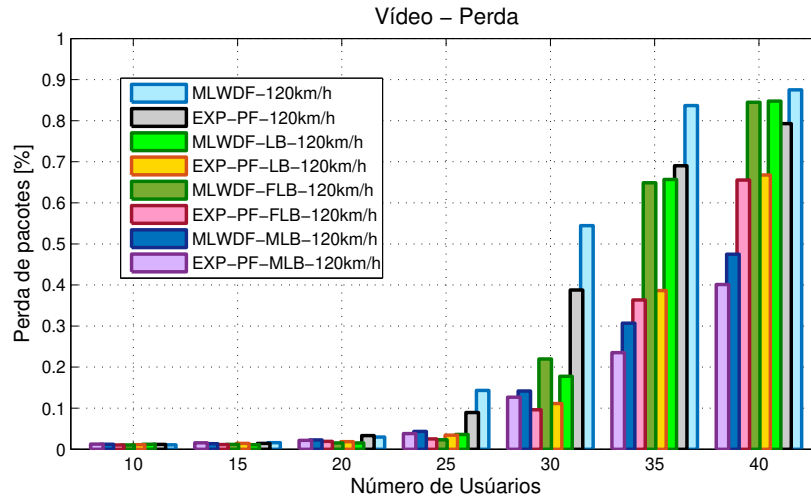


Figura 4.20: Perda de pacotes versus número de usuários para fluxos de vídeo com velocidade de 120km/h

Vazão Média. O desempenho da vazão média para fluxo de vídeo obtido através da simulação é mostrado nas Figuras 4.21, 4.22 e 4.23. À medida que o número de usuários aumenta na célula, a vazão média do fluxo de vídeo diminui efetivamente para todos os algoritmos de escalonamentos considerados. Na Figura 4.21 o desempenho de vazão média quando o número de usuários na célula excede os 25 usuários para o escalonador M-LWDF apresenta uma diminuição forte, No entanto, o escalonador M-LWDF-MLB mostra um menor declínio de vazão média comparado com os demais escalonadores. Na Figura 4.22 o escalonador EXP/PF-MLB apresenta menor declínio de vazão média quando o número

de usuários na célula exceda os 25 usuários comparado com os demais escalonadores. Por fim, observa-se na Figura 4.23 quando o número de usuários na célula chega até 40 usuários, o escalonador EXP/PF-MLB apresenta melhor vazão em comparação com os demais escalonadores considerados.

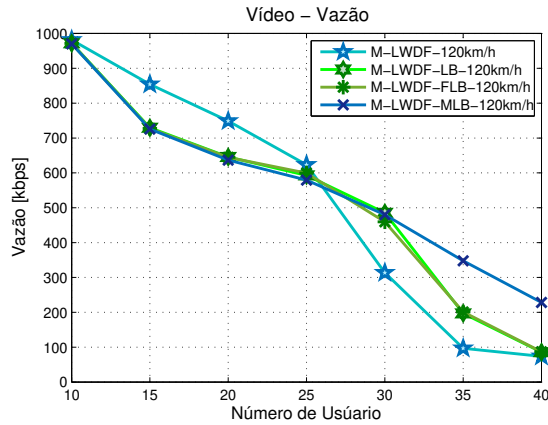


Figura 4.21: Vazão para fluxos de vídeo com o escalonador M-LWDF

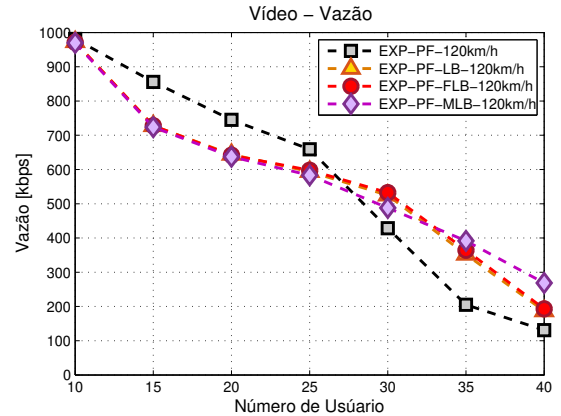


Figura 4.22: Vazão para fluxos de vídeo com o escalonador EXP/PF

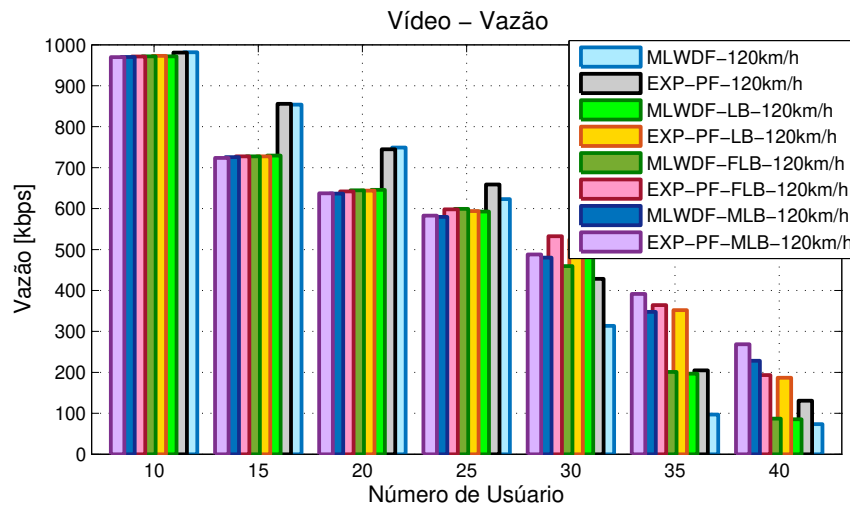


Figura 4.23: Vazão versus número de usuários para fluxos de vídeo com velocidade de 120km/h

4.6.2 Cenários com Tráfego de VoIP

4.6.2.1 Caso A - Usuários com velocidade pedestre de 3km/h

Atraso Médio. O resultado de simulação do atraso para tráfego VoIP usando algoritmos de escalonadores M-LWDF e demais versões simuladas a uma velocidade pedestre de 3km/h é mostrado na Figura 4.24. Observa-se que o atraso médio é imutável em torno de 2,3 ms para todos os escalonadores quando o número de usuários é menor que 25. Entretanto, de acordo com todos os escalonadores abordados, o escalonador M-LWDF-MLB alcança o menor atraso quando o número de usuários excede 25 usuários. No entanto, o

resultado de simulação na Figura 4.25 nota-se que o atraso não apresenta maiores variações em torno de 2.3 ms para todos os escalonadores considerados. Por fim, na Figura 4.26 observa-se que quando o número de usuários excede a partir dos 25 usuários na célula o desempenho de atraso médio para o tráfego VoIP com algoritmo de escalonamento M-LWDF e suas versões aumenta consideravelmente em comparação com todos os algoritmos de escalonamento EXP/PF.

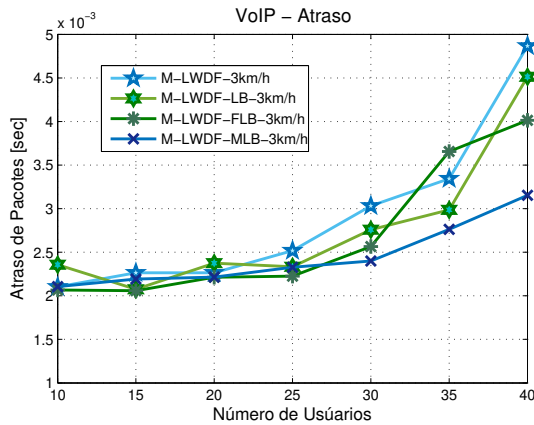


Figura 4.24: Atraso de pacotes para fluxos de VoIP com o escalonador M-LWDF

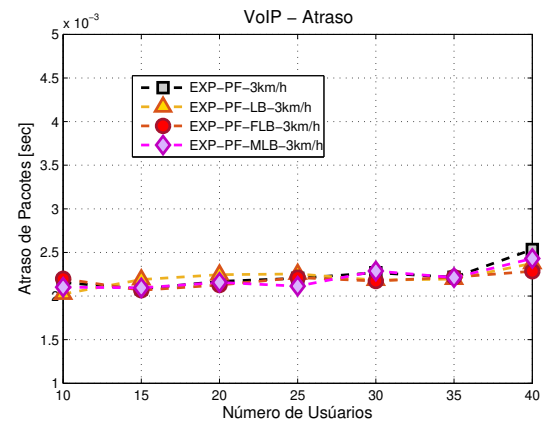


Figura 4.25: Atraso de pacotes para fluxos de VoIP com o escalonador EXP/PF

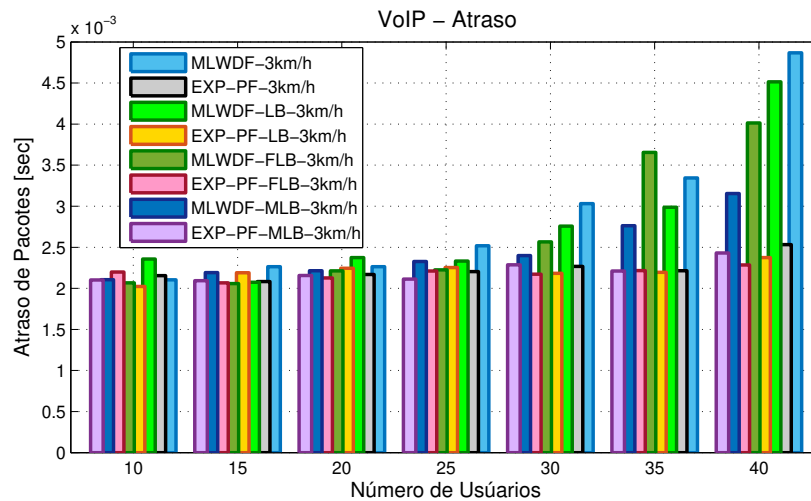


Figura 4.26: Atraso versus número de usuários para fluxos de VoIP com velocidade de 3km/h

Perda de Pacotes. As Figuras 4.27, 4.28 e 4.29 apresentam o resultado de simulação de perda de pacotes para o tráfego VoIP usando algoritmos de escalonadores M-LWDF e EXP/PF respectivamente, simulados a uma velocidade pedestre de 3km/h. Entretanto, nota-se em todas as Figuras mencionadas acima que não há diferença significativa na perda de pacotes para os dois escalonadores considerados.

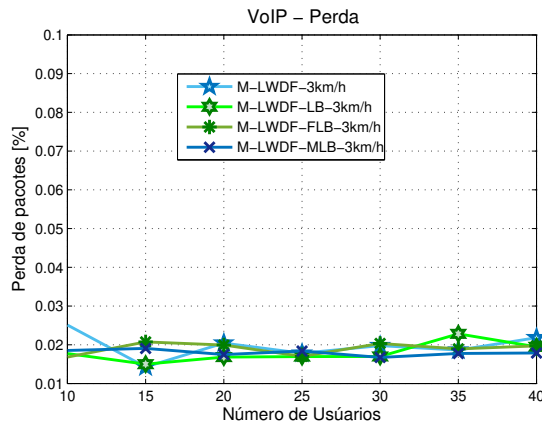


Figura 4.27: Perda de pacotes para fluxos de VoIP com o escalonador M-LWDF

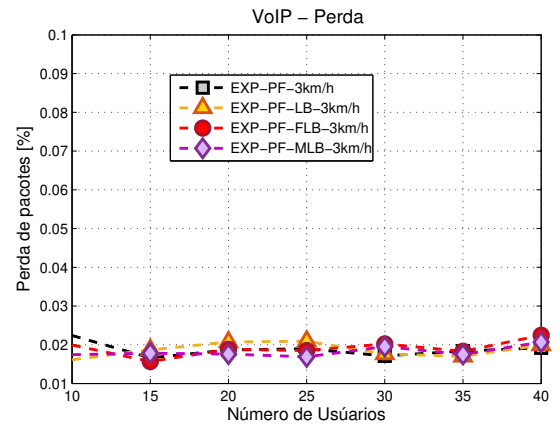


Figura 4.28: Perda de pacotes para fluxos de VoIP com o escalonador EXP/PF

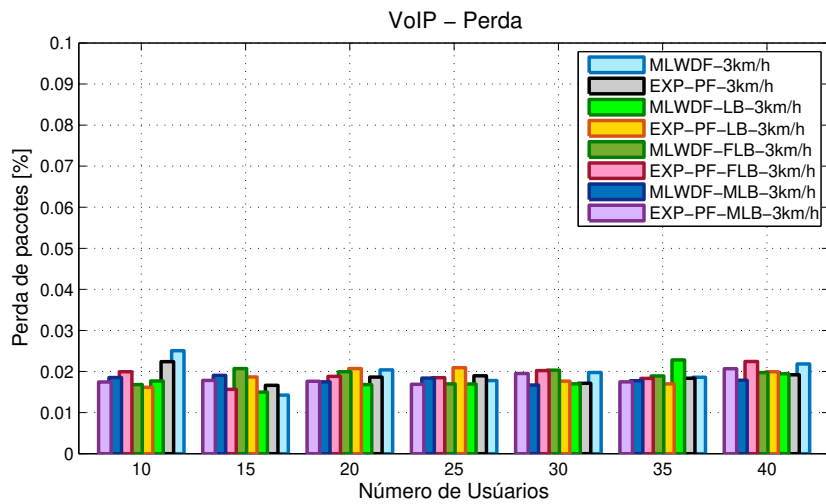


Figura 4.29: Perda de pacotes versus número de usuário para fluxos de VoIP com velocidade de 3km/h

Vazão Média. As Figuras 4.30, 4.31 e 4.32 mostram o resultado de simulação para vazão média de tráfego VoIP usando os algoritmos de escalonamento M-LWDF e EXP/PF respectivamente, simulado a uma velocidade pedestre de $3km/h$. Nota-se em todas as Figuras acima mencionadas que a vazão média é quase constante quando o número de usuários na célula é maior de 15 usuários para todos os escalonadores considerados. Uma possível explicação para essa não variação poderia ser a falta de natureza fractal no modelo de tráfego e os períodos de ativação/desativação utilizados na simulação.

4.6.2.2 Caso B - Usuários com velocidade veicular de $120km/h$

Atraso Médio. As Figuras 4.33, 4.34 e 4.35 mostram o resultado de simulação para atraso de tráfego VoIP usando algoritmos de escalonamento M-LWDF e EXP/PF respectivamente simulado a uma velocidade veicular constante de $120km/h$. Nota-se na Figura 4.33 o escalonador M-LWDF-MLB alcança o menor atraso e invariável em torno

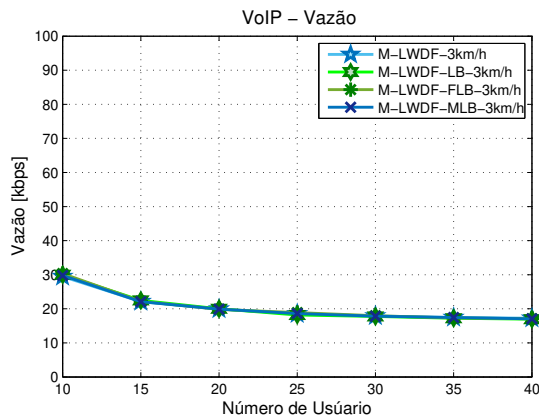


Figura 4.30: Vazão para fluxos de VoIP com o escalonador M-LWDF

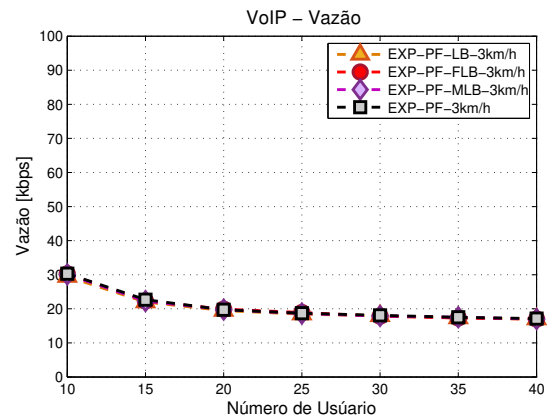


Figura 4.31: Vazão para fluxos de VoIP com o escalonador EXP/PF

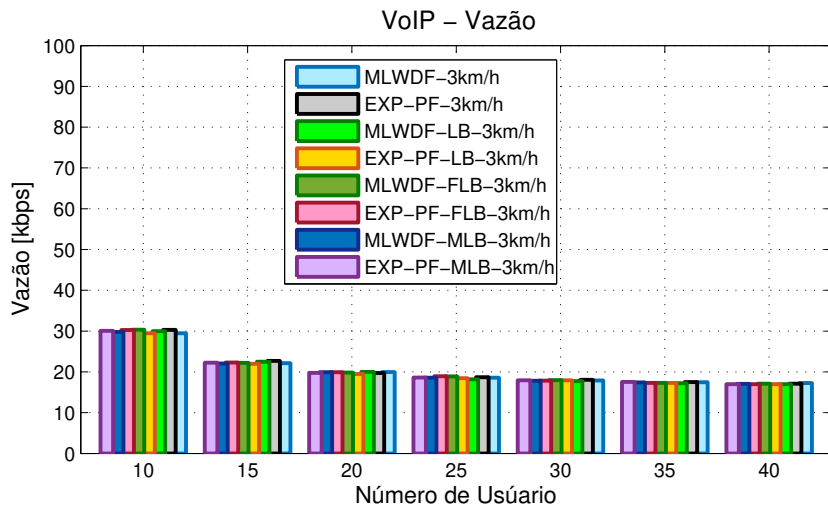


Figura 4.32: Vazão versus número de usuários para fluxos de VoIP com velocidade de 3km/h

de 2 ms para todos os escalonadores quando o número de usuários na célula é menor que 25. No entanto, o resultado de simulação na Figura 4.34 nota-se que o atraso não apresenta variações ao incremento do número de usuários na célula mantendo um atraso em torno de 2ms para todos os escalonadores EXP/PF considerados. Por fim, a Figura 4.35 observa-se que quando o número de usuários excede a partir dos 30 usuários na célula o desempenho de atraso médio para o tráfego VoIP com algoritmo de escalonamento M-LWDF e suas versões aumenta consideravelmente em comparação com todos os algoritmos de escalonamento EXP/PF.

Perda de Pacotes. As Figuras 4.36, 4.37 e 4.38 mostram o resultado de simulação da taxa de perda de pacotes para o tráfego VoIP usando os algoritmos de escalonamentos M-LWDF e EXP/PF respectivamente, simulado a uma velocidade veicular constante de 12km/h. Nota-se na Figura 4.36 que a taxa de perda permanece estável para todos os escalonadores M-LWDF e suas versões quando o número de usuário na célula é menor de 25. Além disso, o escalonador M-LWDF-MLB garante a menor taxa de perda em comparação com os demais escalonadores considerados. Porém, na Figura 4.37 não existe diferença

significativa na perda de pacotes para todos os escalonadores EXP/PF consideradas. Por fim, na Figura 4.38 o resultado da simulação da taxa de perda acontece quando o número dos usuários na célula é maior de 30 usuários para todos os escalonadores M-LWDF consideradas.

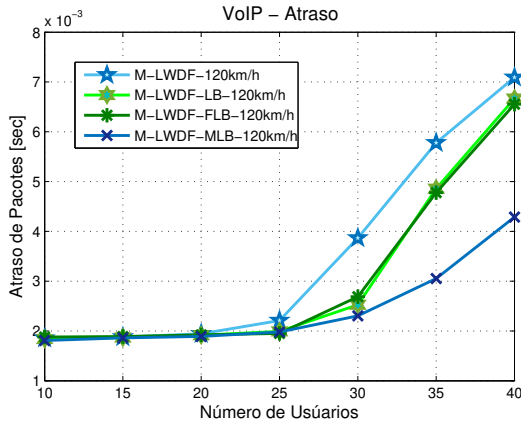


Figura 4.33: Atrazo de pacotes para fluxos de VoIP com o escalonador M-LWDF

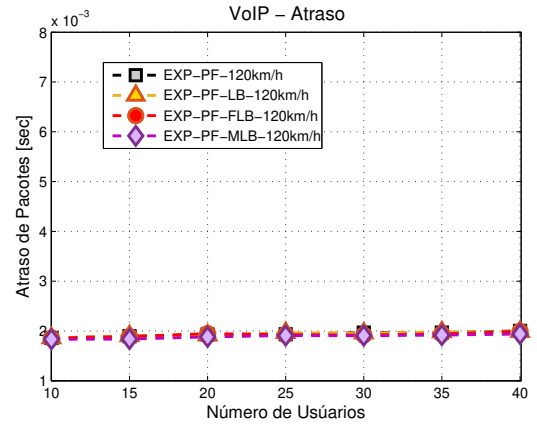


Figura 4.34: Atrazo de pacotes para fluxos de VoIP com o escalonador EXP/PF

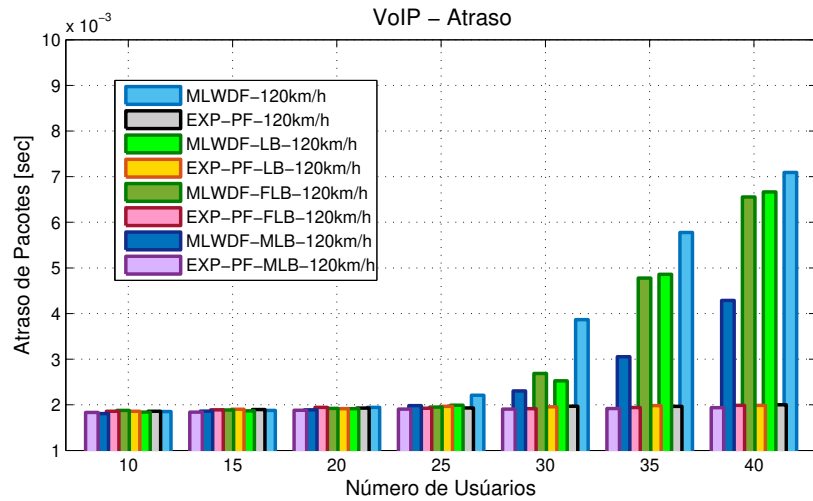


Figura 4.35: Atrazo versus número de pacotes para fluxos de VoIP com velocidade de 120km/h

Vazão Média. As Figuras 4.39, 4.40 e 4.41 mostram o resultado de simulação para vazão média de tráfego VoIP usando os algoritmos de escalonamento M-LWDF e EXP/PF respetivamente. Nota-se que em todas as Figuras acima mencionadas a vazão média é quase constante quando o número de usuários na célula é maior de 15 usuários para todos os escalonadores considerados. Uma possível explicação para essa não variação poderia ser a falta de natureza fractal no modelo de tráfego e os períodos de ativação/desativação utilizados na simulação.

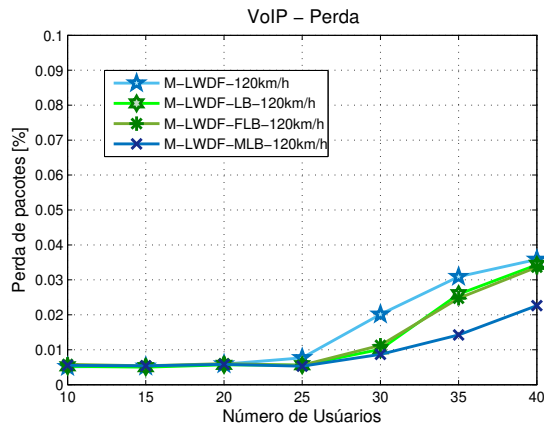


Figura 4.36: Perda de pacotes para fluxos de VoIP com o escalonador M-LWDF

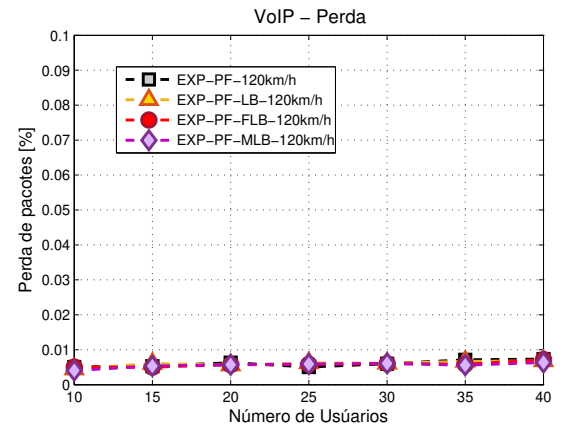


Figura 4.37: Perda de pacotes para fluxos de VoIP com o escalonador EXP/PF

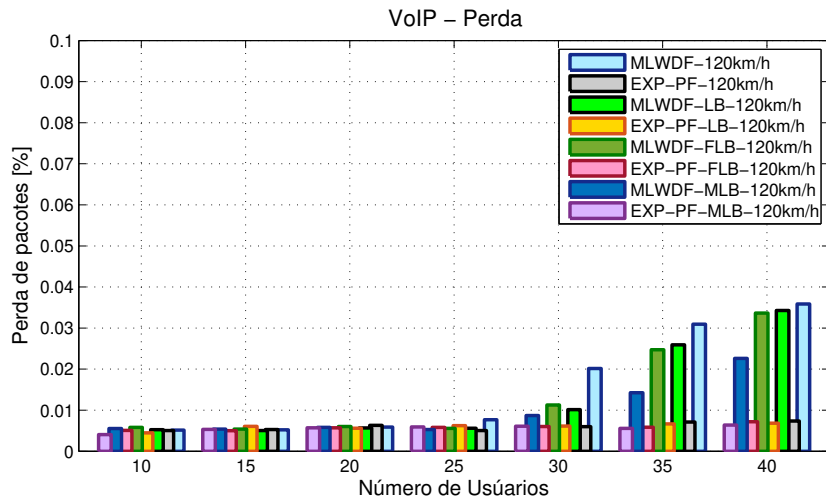


Figura 4.38: Perda de Pacotes versus número de usuários para fluxos de VoIP com velocidade de 120km/h

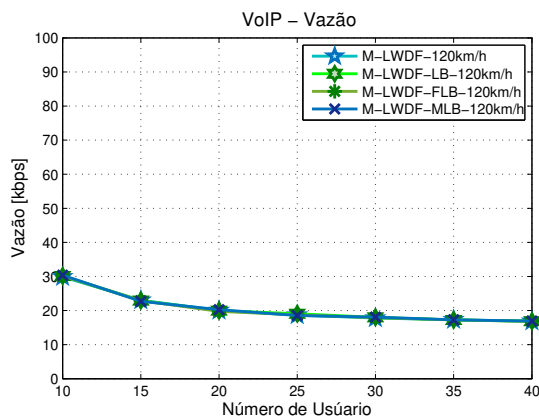


Figura 4.39: Vazão para fluxos de VoIP com o escalonador M-LWDF

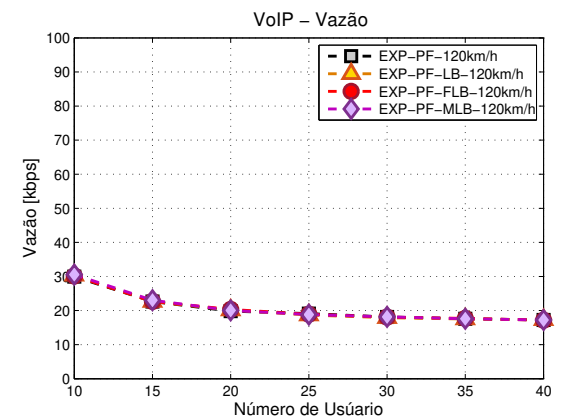


Figura 4.40: Vazão para fluxos de VoIP com o escalonador EXP/PF

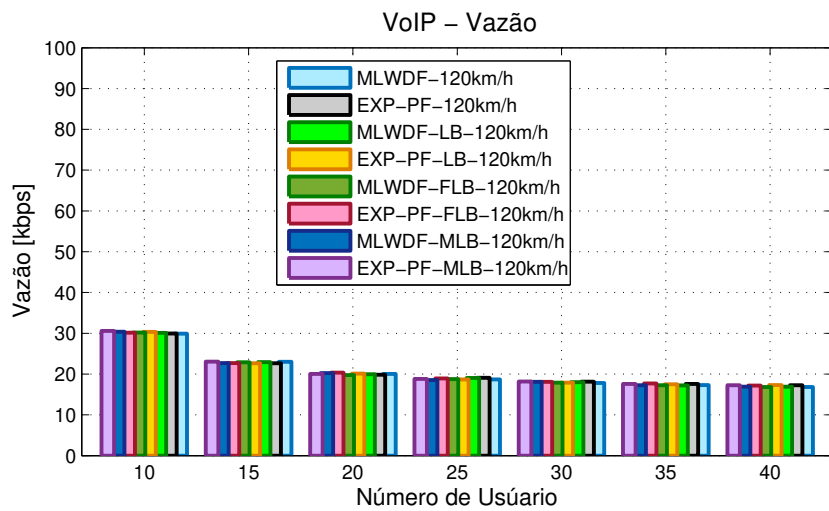


Figura 4.41: Vazão versus número de usuários para fluxos de VoIP com velocidade de 120km/h

Capítulo 5

Conclusões e Perspectivas

Nesta dissertação, apresenta-se o desempenho de dois algoritmos de escalonadores de pacotes para serviço em tempo real no sistema LTE downlink, quando incorporando algoritmos de policiamento de tráfego, conhecidos como reguladores de Balde Furado (do inglês, Leaky Bucket).

Inicialmente foi apresentada a tecnologia LTE que é considerada atualmente o sistema de telecomunicações global mais promissor. O LTE fornece suportes da QoS para classes de tráfegos heterogêneas com diferentes requisitos de QoS. Nesta dissertação, focamos nossa atenção na qualidade de serviço para sistema LTE *downlink*.

Começamos nosso trabalho, destacando as limitações de soluções existentes para técnicas de escalonamento de pacotes no sistema *downlink*. Posteriormente, abordamos conceitos fundamentais e principais características da rede LTE, Além disso, apresentamos o estado da arte dos mecanismos de alocação de recursos do sistema LTE *downlink*. Apresentamos os conceitos fundamentais de algoritmos de policiamento de tráfego presentes na literatura.

Posteriormente, como objetivo desta dissertação propusemos um esquema de alocação de recursos especificamente focado em serviços de tempo real com tráfegos de vídeo e VoIP. Nosso esquema combina os algoritmos de policiamento de tráfego com os escalonadores M-LWDF e EXP/PF convencionais. Este esquema melhora a QoS para fluxos de vídeo e mantém uma boa QoS para fluxos de VoIP, minimizando o atraso e perda de pacotes.

O tratamento dos tráfegos com os algoritmos de policiamento foram feitos usando os algoritmos de processos envelopes de balde furado (do inglês, Leaky Bucket - LB), balde furado fractal (do inglês, Fractal Leaky Bucket - LBF) e por último balde furado multifractal (do inglês, Multifractal Leaky Bucket -MLB), sendo que cada processo usa seu parâmetro característico, o parâmetro de *Hurst* para balde furado fractal (LBF) e o expoente *Hölder* para balde furado multifractal (MLB). Além disso, foi simulado o comportamento de todos os algoritmos de processos envelopes considerados, destacando o comportamento dos pacotes descartados ou considerados de baixa prioridade (denotado por J_n).

Observa-se que, quando o fluxo de tráfego é policiado com o algoritmo de processo envelope multifractal (MLB), não há muito descarte de pacotes e o processo envelope do tráfego é bem próximo ao tráfego real. Este resultado demonstra a vantagem de usar a

modelagem multifractal para tráfego de rajada intenso.

Para avaliar o desempenho dos algoritmos de escalonamento convencionais (M-LWDF e EXP/PF) em combinação com o policiamento de tráfego, nós definimos dois cenários de simulação, implementados com ferramentas de simulação Matlab R2014a, e o simulador LTE-Sim de código aberto. Nos ambientes de simulação do cenário com tráfego de vídeo e cenário com tráfego VoIP foram considerados para cada cenário uma única célula com interferência, os usuários são distribuídos aleatoriamente na célula com velocidade pedestre de $3km/h$ e velocidade veicular de $120km/h$, com proporção de tipo de tráfego de 40% dos usuários usando tráfego de Vídeo, 40% dos usuários usando tráfego VoIP e 20% dos usuários usando tráfego *Best Effort* (BE). No parâmetro de simulação, três medidas de desempenho foram consideradas nominalmente: atraso de pacotes, taxa de perda de pacotes e vazão média.

Os resultados de simulação permitem as seguintes conclusões e comentários. O escalonador EXP/PF-MLB apresenta o melhor desempenho na simulação para fluxo de vídeo com velocidade pedestre de $3km/h$ com o número máximo de 40 usuários, exibindo o menor atraso, a maior vazão, seguido do escalonador M-LWDF-MLB que apresenta a menor perda de pacotes. Quando foram considerados as simulações de fluxo de vídeo com velocidade veicular de $120km/h$ o melhor desempenho foi fornecido pelo escalonador EXP/PF-MLB exibindo o menor atraso, a menor perda e a maior vazão média. Por outro lado, quando é considerado na simulação os fluxos de VoIP para 40 usuários com velocidade pedestre de $3km/h$, o melhor desempenho foi para o escalonador M-LWDF-MLB fornecendo o menor atraso, a menor perda e a maior vazão. No entanto, quando a velocidade foi de $120km/h$ o escalonador que teve melhor desempenho foi EXP/PF-MLB apresentando o menor atraso, o menor perda e a maior vazão.

Como conclusão final, pode-se afirmar que os escalonadores propostos em conjunção com o esquema de policiamento de tráfego comportam-se conforme o esperado nos dois cenários de simulação realizados para a avaliação dos métodos propostos. Consideramos este fato como um avanço importante para a QoS, para aplicações móveis envolvendo serviços multimídia e respostas em tempo real (do inglês, Real Time - RT). Acreditamos que nosso estudo também tenha contribuído no contexto de modelagem de tráfego de redes em sistemas LTE.

Perspectivas

Nesta dissertação apresentamos uma estratégia de alocação de recursos em serviços de tempo real na transmissão *downlink* usando algoritmos de policiamento de tráfego. Os resultados numéricos mostram a eficiência de nosso esquema proposto ao executar serviços em tempo real, no entanto, o desempenho para serviços de tempo não real é baixo. O trabalho futuro deve incluir estratégias de alocação de recursos para serviços de tempo não real. Em futuros trabalhos devemos considerar a possibilidade de usar outros tipos de algoritmos de policiamento de tráfego para alocação de recursos em redes LTE.

Bibliografia

- [1] 3GPP. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Quality of Service (QoS) concept and architecture (3GPP TS 23.107 version 12.0.0 Release 13).
- [2] 3GPP. 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Feasibility Study for Orthogonal frequency Division Multiplexing (OFDM)for UTRAN enhancement; TR 23.892 (Release 6), 2004.
- [3] 3GPP. Technical Specification Group Radio Access Network; Physical layer aspects for evolved Universal Terrestrial Radio Access (UTRA); TR 23.814, 2006.
- [4] 3GPP. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Requirements for Evolved UTRA (E-UTRA) and Evolved UTRAN (E-UTRAN) (3GPP TR 25.913 version 9.0.0 Release 9), 2010-2.
- [5] 3GPP. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); General on Terminal Adaptation Functions (TAF) for Mobile Stations (MS)(3GPP TS 27.001 version 11.0.0 Release 11), 2012.
- [6] 3GPP. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Frequency (RF) requirements for LTE pico Node B; (3GPP TR 36.931 version 11.0.0 Release 11), 2012-10.
- [7] 3GPP. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Link Control (RLC) protocol specification (3GPP TS 36.322 version 11.0.0 Release 11), 2012-10.
- [8] 3GPP. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Non-Access-Stratum (NAS) protocol for Evolved Packet System (EPS); Stage 3 (3GPP TS 24.301 version 11.7.0 Release 11), 2013-07.
- [9] 3GPP. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Services and service capabilities; (3GPP TS 22.105 version 12.1.0 Release 12), 2015-01.
- [10] 3GPP. LTE; Evolved Universal Terrestrial radio Access Network (E-UTRAN); S1 general aspects and principles; (3GPP TS 36.410 version 12.1.0 Release 12), 2015-2.

- [11] 3GPP. LTE; Evolved Universal Terrestrial radio Access Network (E-UTRAN); Architecture description (3GPP TS 36.401 version 12.2.0 release 12), 2015-4.
- [12] 3GPP. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2 (3GPP TS 36.300 version 13.2.0. Release 13), 2016-01.
- [13] 3GPP. Digital cellular telecommunications system (Phase 2+)(GSM); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Policy and charging control architecture (3GPP TS 23.203 version 13.6.0 Release 13), 2016-03.
- [14] 3GPP. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Packet Data Convergence Protocol (PDCP) specification (3GPP TS 36.323 version 13.2.1 Release 13), 2016-08.
- [15] 3GPP. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical channels and modulation (3GPP TS 36.211 version 14.2.0 Release 14), 2017-04.
- [16] 3GPP. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Medium Access Control (MAC) protocol specification (3GPP TS 36.321 version 14.2.1 Release 14), 2017-05.
- [17] 3GPP. LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Radio Resource Control (RRC); Protocol specification (3GPP TS 36.331 version 14.2.2 Release 14), 2017-05.
- [18] 3GPP. LTE; Evolved Universal Terrestrial radio Access Network (E-UTRAN); Stage 2 functional specification of User Equipment (UE) positioning in E-UTRAN; (3GPP TS 36.305 version 14.3.0 Release 14), 2017-10.
- [19] 3GPP. LTE; General Packet Radio Service (GPRS) enhancements for Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN) access; (3GPP TS 23.401 version 14.3.0 Release 14), 2017-5.
- [20] 3GPP. Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); LTE; Architecture enhancements for non-3GPP accesses; (3GPP TS 23.402 version 14.4.0 Release 14), 2017-7.
- [21] ABRAHAO, D. C., ET AL. Alocação de blocos de recurso em redes lte e utilizando logica fuzzy e estimacao adaptativa de banda efetiva.
- [22] AFROZ, F., SANDRASEGARAN, K., AND GHOSAL, P. Performance analysis of pf, m-lwdf and exp/pf packet scheduling algorithms in 3gpp lte downlink. In *Telecommunication Networks and Applications Conference (ATNAC), 2014 Australasian* (2014), IEEE, pp. 87–92.
- [23] AGUSTI COMES, R., BERNARDO ALVAREZ, F., CASADEVALL PALACIO, F.-J., FERRUS FERRE, R. A., PEREZ ROMERO, J., AND SALLENT ROIG, J. O. *LTE: Nuevas tendencias en comunicaciones móviles*. 2010.

- [24] AHMAD, A., BEG, M., AND AHMAD, S. Resource allocation algorithms in lte: A comparative analysis. In *2015 Annual IEEE India Conference (INDICON)* (2015), IEEE, pp. 1–6.
- [25] ALI-YAHIYA, T. *Understanding LTE and its Performance*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [26] AMEIGEIRAS, P., WIGARD, J., AND MOGENSEN, P. Performance of the m-lwdf scheduling algorithm for streaming services in hsdpa. In *Vehicular technology conference, 2004. VTC2004-Fall. 2004 IEEE 60th* (2004), vol. 2, IEEE, pp. 999–1003.
- [27] ANDREWS, M., KUMARAN, K., RAMANAN, K., STOLYAR, A., WHITING, P., AND VIJAYAKUMAR, R. Providing quality of service over a shared wireless link. *IEEE Communications magazine* 39, 2 (2001), 150–154.
- [28] ARAÚJO, F. G., ET AL. Uma proposta de algoritmo de escalonamento para o tráfego uplink em redes lte. *Universidade Federal de Uberlândia* (2014).
- [29] BASUKALA, R., RAMLI, H. M., AND SANDRASEGARAN, K. Performance analysis of exp/pf and m-lwdf in downlink 3gpp lte system. In *2009 First Asian Himalayas International Conference on Internet* (2009), IEEE, pp. 1–5.
- [30] BENDAOUD, F., ABDENNEBI, M., AND DIDI, F. Survey on scheduling and radio resources allocation in lte. *arXiv preprint arXiv:1404.2759* (2014).
- [31] BIERNACKI, A., AND TUTSCHKU, K. Comparative performance study of lte downlink schedulers. *Wireless personal communications* 74, 2 (2014), 585–599.
- [32] BREGNI, S., GIACOMAZZI, P., AND SADDEMI, G. Characterization of long-range dependent traffic regulated by leaky-bucket policers and shapers. *Computer Communications* 33, 6 (2010), 714–720.
- [33] CCORIMANYA, J. Q., AND LING, L. L. Algoritmo de escalonamento de pacote com policiamento de tráfego para alocação de recurso em redes lte downlink. *XXXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações e Processamento de Sinais-SBrT* (2017), 3–6.
- [34] CHOI, J.-G., AND BAHK, S. Cell-throughput analysis of the proportional fair scheduler in the single-cell environment. *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 56, 2 (2007), 766–778.
- [35] COX, C. *An introduction to LTE: LTE, LTE-advanced, SAE and 4G mobile communications*. John Wiley & Sons, 2012.
- [36] DAHLMAN, E., PARKVALL, S., AND SKOLD, J. *4G: LTE/LTE-advanced for mobile broadband*. Academic press, 2013.
- [37] DARDOURI, S., AND BOUALLEGUE, R. Comparative study of downlink packet scheduling for lte networks. *Wireless Personal Communications* 82, 3 (2015), 1405–1418.

- [38] FERREIRA, M. V. G., VIEIRA, F. H. T., AND COELHO, F. G. Algoritmo baseado em estimativa de retardo utilizando curva de servico para alocao dinamica de recursos em redes lte.
- [39] FONSECA, N. L., MAYOR, G. S., AND NETO, C. A. On the equivalent bandwidth of self-similar sources. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)* 10, 2 (2000), 104–124.
- [40] GUAN, N., ZHOU, Y., TIAN, L., SUN, G., AND SHI, J. Qos guaranteed resource block allocation algorithm for lte systems. In *2011 IEEE 7th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)* (2011), IEEE, pp. 307–312.
- [41] INTERNET. Traffic archive. [online] Available: <http://ita.ee.lbl.gov/> (2015).
- [42] ITURRALDE, M., WEI, A., ALI-YAHIYA, T., AND BEYLOT, A.-L. Resource allocation for real time services in lte networks: resource allocation using cooperative game theory and virtual token mechanism. *Wireless personal communications* 72, 2 (2013), 1415–1435.
- [43] JAKES, W. C., AND COX, D. C. *Microwave mobile communications*. Wiley-IEEE Press, 1994.
- [44] JUNIOR, J. A. S., AND VIEIRA, F. H. T. Estimation of backlog and delay in ofdm/tdma systems with traffic policing through network calculus. *IEEE Latin America Transactions* 13, 3 (2015), 796–803.
- [45] KITANOV, S., AND JANEVSKI, T. Performance evaluation of scheduling strategies for lte networks in downlink direction. In *Proceedings of International Conference ETAI IEEE* (2013).
- [46] KUMAR, P., KUMAR, S., AND DABAS, C. Comparative analysis of downlink scheduling algorithms for a cell affected by interference in lte network. *Annals of Data Science* (2016), 1–19.
- [47] KWAN, R., LEUNG, C., AND ZHANG, J. Proportional fair multiuser scheduling in lte. *IEEE Signal Processing Letters* 16, 6 (2009), 461–464.
- [48] LIU, B., TIAN, H., AND XU, L. An efficient downlink packet scheduling algorithm for real time traffics in lte systems. In *2013 IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)* (2013), IEEE, pp. 364–369.
- [49] LUCAS, R. D. P. *Estimação de Banda e parametros de QoS utilizando calculo de rede e Modelagem autossimilar*. PhD thesis, Universidade Federal de Goiás, 2014.
- [50] MAHFOUDI, M., EL BEKKALI, M., NAJD, A., EL GHAZI, M., AND MAZER, S. A new downlink scheduling algorithm proposed for real time traffic in lte system. *International Journal of Electronics and Telecommunications* 61, 4 (2015), 409–414.

- [51] MELO, C. A., AND DA FONSECA, N. L. An envelope process for multifractal traffic modeling. In *IEEE International Conference on Communications* (2004).
- [52] MELO PEREIRA, F., ET AL. *Modelagem, policiamento e escalonamento em redes Ethernet PON*. PhD thesis, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2006.
- [53] NASRALLA, M. M., AND MARTINI, M. G. A downlink scheduling approach for balancing qos in lte wireless networks. In *2013 IEEE 24th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)* (2013), IEEE, pp. 1571–1575.
- [54] NOTE, A. A. 3gpp long term evolution: System overview, product development, and test challenges. *Literature Number* (2009).
- [55] NURCAHYANI, I., MUSTIKA, I. W., ET AL. Performance analysis of packet scheduling algorithm for video service in downlink lte. In *Smart Green Technology in Electrical and Information Systems (ICSGTEIS), 2014 International Conference on* (2014), IEEE, pp. 52–57.
- [56] NWAWELE, U., ANI, C., AND AHANEKU, M. Comparative analysis of the performance of resource allocation algorithms in long term evolution networks. *Nigerian Journal of Technology* 36, 1 (2017), 163–171.
- [57] PAPOUSLIS, A. *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*. McGraw-Hill, New York. 3ra edição, 1991.
- [58] PEREIRA, F. D. M., FONSECA, N., AND ARANTES, D. S. Fractal traffic modeling and policing using envelope process. Tech. rep., Technical Report Campinas, SP, Brazil: State University of Campinas, 2006.
- [59] PIRO, G., GRIECO, L. A., BOGGIA, G., CAPOZZI, F., AND CAMARDA, P. Simulating lte cellular systems: an open-source framework. *IEEE transactions on vehicular technology* 60, 2 (2011), 498–513.
- [60] REISSLEIN, M. Video trace library. *Arizona State University*, [online] Available: <http://trace.eas.asu.edu> (2015).
- [61] ROCHA, F. G. C. *Modelagem Multifractal Aplicada à Estimação De Probabilidade De Perda De Dados E Ao Controle De Fluxos De Tráfego Em Redes*. PhD thesis, Universidade Federal de Goiás, 2011.
- [62] ROCHA, F. G. C. *Alocação de recursos em redes sem fio OFDM multiusuário utilizando modelagem multifractal adaptativa*. PhD thesis, Universidade Federal de Goiás, 2016.
- [63] SACLAY, I., AND TEAM, E. C. D. P. R. ?frac{lab} toolbox, 2014.

- [64] SAHOO, B. Performance comparison of packet scheduling algorithms for video traffic in lte cellular network. *arXiv preprint arXiv:1307.3144* (2013).
- [65] SAHOO, B., PUTHAL, D., SWAIN, S., AND MISHRA, S. A comparative analysis of packet scheduling schemes for multimedia services in lte networks. In *Computational Intelligence and Networks (CINE), 2015 International Conference on* (2015), IEEE, pp. 110–115.
- [66] SAMIA, D., AND RIDHA, B. A new scheduling algorithm for real-time communication in lte networks. In *Advanced Information Networking and Applications Workshops (WAINA), 2015 IEEE 29th International Conference on* (2015), IEEE, pp. 267–271.
- [67] SELFIS. The selfis tool,[online] <http://www.cs.ucr.edu/~tkarag/selfis/selfis.html>, ultimo acesso em Maio de 2015.
- [68] SESIA, S., TOUFIK, I., AND BAKER, M. *LTE-the UMTS long term evolution*. Wiley Online Library, 2015.
- [69] TAKADA, H. Design of high-speed networks considering monofractal and multifractal traffic models. *Séo José dos Campos* (2007).
- [70] TAKADA, H. H., AND ANZALONI, A. A sequential test approach for policing mechanisms to deal with monofractal and multifractal traffic. In *2006 2nd Conference on Next Generation Internet Design and Engineering, 2006. NGI'06.* (2006), IEEE, pp. 6–pp.
- [71] TANENBAUM, A. S. *Redes de computadoras*. Pearson Educación, 2003.
- [72] VIEIRA, F. H. T., ROCHA, F. G. C., AND DOS SANTOS JR, J. A. Loss probability estimation and control for ofdm/tdma wireless systems considering multifractal traffic characteristics. *Computer Communications* 35, 2 (2012), 263–271.
- [73] VIEIRA, F. H. T., SANTOS, J., AND CARDOSO, A. Estimation of backlog and delay in ofdm/tdma systems with traffic policing using network calculus. *Computers & Electrical Engineering* 39, 8 (2013), 2507–2520.
- [74] ZHAO, L., QIN, Y., MA, M., ZHONG, X., AND LI, L. Qos guaranteed resource block allocation algorithm in lte downlink. In *Communications and Networking in China (CHINACOM), 2012 7th International ICST Conference on* (2012), IEEE, pp. 425–429.