UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UM ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DAS DISCIPLINAS DE ESCALONAMENTO WRR E WF^2Q NO SUPORTE À QoS EM AMBIENTES DE REDES DE ACESSO IEEE 802.16

Wyllian Bezerra da Silva

Março

2008

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UM ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DAS DISCIPLINAS DE ESCALONAMENTO WRR E WF^{2}Q NO SUPORTE À QoS EM AMBIENTES DE REDES DE ACESSO IEEE 802.16

Wyllian Bezerra da Silva

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, aprovada em 5 de março de 2008 pela banca examinadora:

Paulo Roberto Guardieiro, Dr. – Orientador (UFU)

Keiko Verônica Ono Fonseca, Dra. (UTFPR)

Jamil Salem Barbar, Dr. (UFU)

FICHA CATALOGRÁFICA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586e Silva, Wyllian Bezerra da, 1978-
Um estudo comparativo do desempenho das disciplinas de escalonamento WRR e WF²Q no suporte à QoS em ambientes de redes de acesso IEEE 802.16 / Wyllian Bezerra da Silva. - 2008.
128 f. : il.

Orientador: Paulo Roberto Guardieiro.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica.
Inclui bibliografia.

1. Sistemas de comunicação sem fio - Teses. I. Guardieiro, Paulo Roberto. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDU: 681.3.02

Elaborado pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

UM ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DAS DISCIPLINAS DE ESCALONAMENTO WRR E WF^{2}Q NO SUPORTE À QoS EM AMBIENTES DE REDES DE ACESSO IEEE 802.16

Wyllian Bezerra da Silva

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Prof. Paulo Roberto Guardieiro, Dr. Orientador	Prof. Darizon Alves de Andrade, Dr. Coordenador do curso de Pós-Graduação

Dedicatória

Aos meus pais Fátima e Walter,

À minha noiva Simone,

Aos meus irmãos Jean e Rodrigo

E aos meus tios Delci e Ângela,

pelo apoio e carinho na realização de mais uma etapa de minha vida.

"A imaginação é mais importante que o conhecimento."

(Albert Einstein)

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais Fátima e Walter, aos meus irmãos Jean e Rodrigo e aos meus tios Delci e Ângela pelo incentivo e apoio em minha educação. À minha noiva Simone pelo amor, carinho e compreensão mesmo nos momentos difíceis.

Ao meu orientador Professor Dr. Paulo Roberto Guardieiro pela primorosa orientação, sem a qual não seria possível a realização deste trabalho.

Ao meu amigo Anauto que sempre se dispôs a prestar-me ajuda nos bons momentos e em situações adversas. Aos professores, colegas e demais amigos da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Resumo

A incipiente tecnologia de redes de acesso sem fio do Padrão IEEE 802.16 agrega aos sistemas BWA inúmeras vantagens sobre as tecnologias concorrentes, tais como ampla cobertura do sinal de rádio, mesmo em regiões de difícil acesso ou carentes de infra-estrutura de rede convencional, como é o caso de algumas áreas urbanas e rurais brasileiras. Além disso, permite estabelecer a parte final da infra-estrutura de conexão de banda larga com altas taxas de transmissão, atendendo aos mais diversos requisitos das aplicações de dados, voz e vídeo a um menor custo em comparação com as outras alternativas disponíveis. Entretanto, o Padrão IEEE 802.16 não determina a forma como devem ser escalonados os pacotes ou fluxos de serviço na camada MAC desta tecnologia. Assim, neste trabalho compara-se a utilização de mecanismos de escalonamento que se aproximam do escalonador ideal GPS para o suporte à provisão de QoS em uma rede de acesso IEEE 802.16 PMP. Os estudos comparativos baseados em modelagem e simulação mostraram que os mecanismos WRR e WF^2Q conduzem a bons resultados no suporte à provisão de QoS nesta rede.

Palavras-chave: IEEE 802.16, BWA, QoS, escalonamento, WRR, WF^2Q.

Abstract

The incipient technology of wireless access networks of the IEEE 802.16 Standard aggregates to the BWA systems many advantages over concur technologies, such as radio signal wide coverage, even in difficult access regions or needy of conventional infrastructure of network, as the case of some urban and rural areas of Brazil. Moreover, enables access to the Internet in last mile with high transmission rates, attending to the more several requisites of the data, voice and video applications with minor cost in comparison to others available alternatives. Meanwhile, this technology not specifies how the packages or service flows should be the scheduled in the MAC layer. Thus, this study compares the use of mechanisms for scheduling that approximates the ideal GPS scheduler to support the provision of QoS on IEEE 802.16 PMP network. The modeling and simulation based results evidence that the considered mechanisms WRR and WF^2Q get good results in the support to the provision of QoS in this network.

Keywords: IEEE 802.16, BWA, QoS, scheduling, WRR, WF^2Q.

Sumário

1. INTRODUÇÃO 21

2. REDES DE BANDA LARGA SEM FIO 25

2.1. Introdução 25

2.2. Padrão IEEE 802.16 26

2.2.1. Modelo de Referência 28

2.2.2. Camada MAC 29

2.2.2.1. Subcamada de Convergência Específica 29

2.2.2.1.1. ATM CS 30

2.2.2.1.1.1. Supressão de Cabeçalho do Payload na ATM CS 32

2.2.2.1.2. CS de Pacote 33

2.2.2.1.2.1. Classificação da MAC SDU 34

2.2.2.1.2.2. Classificação dos Pacotes na CS 36

2.2.2.2. Subcamada da Parte Comum 37

2.2.2.2.1. Formato da PDU 39

2.2.3. Camada Física 42

2.3. Arquitetura de Rede 45

2.3.1. Arquitetura Ponto-Multiponto (PMP) 45

2.3.2. Arquitetura *Mesh* 47

2.4. Conclusão 48

3. PROVISÃO DE QUALIDADE DE SERVIÇO EM REDES IEEE 802.16 49

3.1. Introdução 49

3.2. Qualidade de Serviço 50

3.2.1. Especificação de QoS 51

3.2.2. QoS em Redes Sem Fio 53

3.3. QoS nas Redes IEEE 802.16 54

3.3.1. Teoria do Modelo de Objetos 58

3.3.2. Classes de Serviço 59

3.3.3. Fluxos de Serviço 62

3.3.3.1. Classificação dos Fluxos de Serviço 65

3.3.3.2. Mecanismo de Requisição e Alocação de Largura de Banda 67

3.3.3.3. MIB do Padrão IEEE 802.16 68

3.4. Disciplinas de Escalonamento 71

3.4.1. Fila de Prioridades 72

3.4.2. *Weighted Round-Robin* (WRR) 72

3.4.3. *Worst-case Fair Weighted Fair Queueing* (WF^2Q) 73

3.5. Escalonamento no Padrão IEEE 802.16 75

3.6. Conclusão 76

4. PROPOSTA DE MECANISMOS DE ESCALONAMENTO BASEADOS EM WRR E WF^2Q PARA REDES DE ACESSO IEEE 802.16 78

4.1. Introdução 78

4.2. Descrição do Problema 78

4.3. Solução Proposta 79

4.3.1. Descrição dos Mecanismos de Escalonamento Propostos 80

4.4. Trabalhos Relacionados 82

4.5. Conclusão 86

5. AVALIAÇÃO DOS MECANISMOS PROPOSTOS PARA A PROVISÃO DE QoS NAS REDES DE ACESSO IEEE 802.16 88

5.1. Introdução 88

5.2. Estudo Comparativo dos Mecanismos de Escalonamento WRR e WF^2Q 89

5.2.1. Modelagem e Simulação de uma Rede de Acesso IEEE 802.16 PMP 89

5.3. Ambiente de Rede e Parâmetros de Simulação 90

5.4. Apresentação e Análise dos Resultados 92

5.5. Conclusão 110

6. CONCLUSÕES GERAIS 111

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 115

8. TRABALHOS PUBLICADOS 126

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Modelo de Referência do Padrão IEEE 802.16 28

Figura 2.2: Formato da PDU da ATM CS 30

Figura 2.3: Formato da CS PDU para conexões ATM comutadas por VP. 32

Figura 2.4: Formato da CS PDU para conexões ATM comutadas por VC. 33

Figura 2.5: Formato da MAC SDU. 34

Figura 2.6: Classificação e mapeamento do CID no sentido BS-SS. 35

Figura 2.7: Classificação e mapeamento do CID no sentido SS-BS. 36

Figura 2.8: Formato genérico da MAC PDU 39

Figura 2.9: Múltiplas MAC SDUs formando um único PDU. 40

Figura 2.10: Formato do cabeçalho de requisição de banda no sentido *uplink*. 41

Figura 2.11: Formato das mensagens de gerenciamento 42

Figura 2.11: Perfis de rajada (*burst*) com associação dinâmica de técnicas de modulação [9]. 44

Figura 2.12: Arquitetura de rede Ponto-Multiponto (PMP) 46

Figura 2.14: Arquitetura de rede *mesh* 47

Figura 3.1: Arquitetura de QoS do Padrão IEEE 802.16 na direção *downlink* 55

Figura 3.2: Arquitetura de QoS do Padrão IEEE 802.16 na direção *uplink* 56

Figura 3.3: Arquitetura de QoS do Padrão IEEE 802.16 para a BS 57

Figura 3.4: Arquitetura de QoS do Padrão IEEE 802.16 para a SS 57

Figura 3.5: Teoria do Modelo de Objetos de Operação 58

Figura 3.6: Concessão de Privilégio de Acesso de Dados (*Data Grants*) e o fluxo de serviço UGS 60

Figura 3.7: Mecanismo de Provisão de QoS para Aplicações Multimídia 62

Figura 3.8: Modelo de Autorização Provisionado 64

Figura 3.9: Modelo de Autorização Dinâmico 64

Figura 3.10: Mecanismo de Classificação do Padrão IEEE 802.16 (*uplink*) 65

Figura 3.11: Mecanismo de Classificação do Padrão IEEE 802.16 (*downlink*) 66

Figura 3.12: Estrutura da MIB do Padrão IEEE 802.16 69

Figura 3.13: Tabelas da MIB no Padrão IEEE 802.16 70

Figura 3.14: Provisão do Fluxo de Serviço no Padrão IEEE 802.16 76

Figura 4.1: Esquema de escalonamento proposto para a disciplina WF^2Q 81

Figura 5.1: Relação entre o NS-2 e o módulo WiMAX 90

Figura 5.2: Ambiente de simulação de uma rede de acesso IEEE 802.16 PMP. 91

Figura 5.3: Atraso médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego BE. 94

Figura 5.4: *Jitter* médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego BE. 95

Figura 5.5: Vazão média (kbps), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego BE. 96

Figura 5.6: Atraso médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego ertPS. 97

Figura 5.7: *Jitter* médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego ertPS. 98

Figura 5.8: Vazão média (kbps), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego ertPS. 99

Figura 5.9: Atraso médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego nrtPS. 100

Figura 5.10: *Jitter* médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego nrtPS. 101

Figura 5.11: Vazão média (kbps), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego nrtPS. 102

Figura 5.12: Atraso médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego rtPS. 103

Figura 5.13: *Jitter* médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego rtPS. 104

Figura 5.14: Vazão média (kbps), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego rtPS. 105

Figura 5.15: Atraso médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego UGS. 106

Figura 5.16: *Jitter* médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego UGS. 107

Figura 5.17: Vazão média (kbps), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego UGS. 108

Lista de Tabelas

Tabela 2.1. Taxa de dados (Mbps) para o Padrão IEEE 802.16 (WirelessMAN-SC)..... 45

Tabela 5.1. Parâmetros de simulação dos agentes geradores de tráfego 90

Tabela 5.2. Parâmetros de simulação das camadas MAC e Física..... 91

Tabela 5.2. Comparação do parâmetro atraso médio (ms) nas disciplinas de escalonamento WRR e WF^2Q com intervalos de confiança ao nível de 95%. 109

Tabela 5.3. Comparação dos parâmetros *jitter* médio (ms) nas disciplinas de escalonamento WRR e WF^2Q com intervalos de confiança ao nível de 95%. 109

Tabela 5.4. Comparação dos parâmetros vazão média (kbps) nas disciplinas de escalonamento WRR e WF^2Q com intervalos de confiança ao nível de 95%. 109

Lista de Abreviaturas

4G	Quarta Geração
ACQPS	*ActiveQoSParamSet*
AP	*Access Point*
AQPS	*AdmittedQoSParamSet*
ARQ	*Automatic Repeat Request*
ATM	*Asynchronous Transfer Mode*
AWK	Aho, Weinberger and Kernighan
BE	*Best Effort*
bps	bit por segundo
BR	*Bandwidth Request*
BRAN	*Broadband Radio Access Networks*
BS	*Base Station*
BWA	*Broadband Wireless Access*
CAC	*Call Admission Control*
CBR	*Constant Bit Rate*
CI	*CRC Indicator*
CID	*Connection IDentifier*
CLP	*Cell Loss Priority*
CPS	*Commom Part sublayer*
CRC	*Cyclic Redundancy Check*
CS	*Convegence Sublayer*

DFPQ	*Deficit Fair Priority Queue*
DFS	*Dynamic Frequency Selection*
DHCP	*Dynamic Host Configuration*
DL-MAP	*downlink map*
DSA	*Dynamic Service Addition*
DSA-REQ	*Dynamic Service Addition Request*
DSL	*Digital Subscriber Lines*
E1	Tecnologia Européia de Transmissão
EC	*Encriptation Control*
EDF	*Earliest Deadline First*
EKS	*Encriptation Key Sequence*
e-mail	*Eletronic Mail*
ertPS	*extended real time Polling Service*
ETSI	*European Telecommunications Standards Institute*
FBWA	*Fixed Broadband Wireless Access*
FDD	*Frequency-Division Duplexing*
FEC	*Forward Error Correction*
FIFO	*First In First Out*
FTP	*File Transfer Protocol*
Gbps	Gigabits por segundo
GHz	Gigahertz
GPC	*Grant Per Connection*
GPS	*Generalized Processor Sharing*
GPSS	*Grant Per Subscriber Station*

HCS	*Header Check Sequence*
HEC	*Header Error Check*
HiperACCESS	*High Performance Radio Access*
HiperMAN	*High Performance Radio Metropolitan-Area Network*
HT	*Header Type*
HTTP	*HyperText Transfer Protocol*
IE	*Information Element*
IEEE	*Institute of Electrical and Electronics Engineers*
IFQ	*Interface Queue*
IP	*Internet Protocol*
IPv4	*Internet Protocol version 4*
ISM	*Industrial Scientific and Medical*
ITU	*International Telecommunication Union*
LAN	*Local Area Network*
LEN	*Lenght*
LL	*Link Layer*
LMDS	*Local Multipoint Distribution System*
LOS	*Line of Sight*
LSB	*Least Significant Bit*
kbps	Quilobit por segundo
MAC	*Medium Access Control*
Mbps	Megabit por segundo
MIB	*Management Information Base*
MIMO	*Multiple-Input Multiple-Output*

MMS	*Multimedia Messaging Service*
MPEG	*Motion Picture Expert Group*
ms	*milissegundo*
MSB	*Most Significant Bit*
NDSL	*Networks & Distributed Systems Laboratory*
NLOS	*Non Line Of Sight*
NNI	*Network Node Interface*
NOAH	*No Ad-Hoc routing agent*
nrtPS	*non-real time Polling Service*
NS-2	*Network Simulator-2*
OFDM	*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*
OFDMA	*Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*
PDA	*Portable Digital Assistants*
PDU	*Protocol Data Unit*
PHS	*Payload Header Suppression*
PHSI	*Payload Header Suppression Index*
PHY	*Physical Layer*
PM	*Poll-me*
PMP	*Point-to-Multipoint*
PPP	*Point-to-Point*
PQ	*Priority Queuing*
PQPS	*ProvisionedQoSParamSet*
PTI	*Payload Type Indicator*
QAM	*Quadrature Amplitude Modulation*

QoS	*Quality of Service*
QPSK	*Quadrature Phase Shift Keying*
RAs	*Radio Access*
RLC	*Radio Link Control*
RR	*Round-Robin*
RSV	*Reserved*
rtPS	*real time Polling Service*
SAP	*Service Access Point*
SC	*Single Carrier*
SCa	*Single Carrier access*
SDU	*Service Data Unit*
SEFF	*Smallest Eligible virtual Finish time First*
SFID	*Service Flow Identifier*
SMS	*Short Message Service*
SNMP	*Simple Network Management Protocol*
SNR	*Signal to Noise Ratio*
SS	*Subscriber Station*
T1	Tecnologia Americana de Transmissão
TDD	*Time Division Duplexing*
TDM	*Time Division Multiplexing*
TDMA	*Time Division Multiple Access*
TFTP	*Trivial File Transfer Protocol*
TGA	*Traffic Generating Agent*
TLV	*Type/Lenght/Value*

TM4	*Transmission and Multiplexing 4*
UGS	*Unsolicited Grant Service*
UID	*Unique packet Identifier*
UL-MAP	*Uplink Map*
UNI	*User Network Interface*
VC	*Virtual Circuit*
VCI	*Virtual Circuit Identifier*
VoIP	*Voice over Internet Protocol*
VP	*Virtual Path*
VPI	*Virtual Path Identifier*
WF^2Q	*Worst-case Fair Weighted Fair Queueing*
Wi-Fi	*Wireless Fidelity*
WiMAX	*Worldwide Interoperability for Microwave Access*
WirelessHUMAN	*Wireless High-Speed Unlicensed Metropolitan Area Networks*
WLAN	*Wireless Local Area Network*
WirelessMAN/WMAN	*Wireless Metropolitan Area Network*
WRR	*Weighted Round-Robin*
xDSL	*Various Digital Subscriber Line Technologies*

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Com o advento de padrões para a comunicação sem fio atendendo a uma gama de equipamentos, desde *hosts* fixos a *hosts* móveis, as redes sem fio adquiriram popularidade pela mobilidade que provêem aos seus usuários, assim como a facilidade de transferência de dados nesses ambientes de rede. A tecnologia sem fio, já conhecida na telefonia celular, obteve boa aceitação em redes de computadores, oferecendo mobilidade e praticidade na instalação, evitando, por exemplo, manuseio de cabos. O padrão para transmissão sem fio mais utilizado atualmente é o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) 802.11, também conhecido como Wi-Fi (*Wireless Fidelity*). Este padrão permite a comunicação a curtas distâncias com taxas típicas de transferência de dados que podem chegar a 54 Mbps [10]. Esta tecnologia oferece soluções para redes locais sem fio ou WLANs (*Wireless Local Area Networks*), utilizadas em centros de pesquisa, acesso residencial e aeroportos provendo acesso à Internet, dentro de sua área de cobertura.

Com o desenvolvimento de pesquisas na área das comunicações móveis, surgiu um novo padrão que além de atender a redes locais, também abrange áreas metropolitanas, também conhecidas como WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*).

Dessa forma, o padrão IEEE 802.16, ou popularmente conhecido como WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) despontou-se no cenário das comunicações sem fio. Neste padrão, o sinal de rádio atinge longas distâncias. A proposta

teórica de alcance é de até 50 quilômetros em áreas rurais, em torno de 10 quilômetros em áreas suburbanas e cerca de 5 quilômetros em densas áreas urbanas [1, 8, 102-104]. Esta tecnologia pode oferecer altas taxas de transmissão de dados, por volta de 100 Mbps. Além disso, permite operar em bandas de freqüências licenciadas e/ou não-licenciadas [1, 8, 103]. Todavia, este padrão não define como deve ser realizado o escalonamento de recursos no canal entre duas estações da rede de acesso.

Existem vários métodos propostos na literatura para o escalonamento de recursos em redes sem fio do Padrão IEEE 802.16. Os descritos em [27, 37, 40, 41, 44, 58-65, 71-73, 75-79, 81-83] não fazem um estudo comparativo do desempenho das disciplinas de escalonamento utilizadas para classificar e servir os pacotes ou fluxos de serviço na camada MAC (*Medium Access Control*) do padrão que define estas redes. Em vista disto, considerando os mecanismos de escalonamento WRR (*Weighted Round-Robin)* e WF^2Q (*Worst-case Fair Weighted Fair Queueing*) que se destacam na literatura [59, 61, 62, 64, 74, 76] pela eficiência e pela distribuição adequada dos recursos em redes de acesso IEEE 802.16, propõe-se nesta dissertação um estudo comparativo do desempenho destes mecanismos no suporte à provisão de QoS em um ambiente de rede IEEE 802.16 PMP (*Point-to-Multipoint*), caracterizado pelos diversos requisitos das aplicações de dados, voz e vídeo e pela dispersão geográfica das estações.

Assim, o objetivo deste trabalho é apresentar a evolução das redes sem fio do Padrão IEEE 802.16, bem como comparar, via modelagem e simulação, disciplinas de escalonamento que ofereçam suporte à provisão de QoS (*Quality of Service*) em redes de acesso IEEE 802.16, sobretudo, no sentido *downlink*. Para tanto, este estudo leva em conta a possibilidade de aplicação das redes de acesso IEEE 802.16 em regiões de difícil acesso ou carentes de infra-estrutura de rede, como é o caso de algumas áreas urbanas e rurais brasileiras e o melhor desempenho das aplicações típicas de dados, voz e vídeo.

Este trabalho está organizado da seguinte maneira:

No Capítulo 2 apresenta-se a evolução das redes sem fio até chegar às redes BWA (*Broadband Wireless Access*), especificamente ao Padrão IEEE 802.16, com a descrição do modelo de referência e as subcamadas MAC, responsáveis, dentre outras coisas, pela classificação das MAC SDUs (MAC *Service Data Unit*) e tratamento das PDUs (*Protocol Data Unit*). Além disso, aspectos relativos à camada física também são brevemente descritos, bem como as arquiteturas de rede PMP e *Mesh*.

No Capítulo 3 aborda-se a questão da QoS, desde suas bases teóricas até a provisão de QoS nas redes de acesso IEEE 802.16. Este capítulo contempla a teoria do modelo de objetos, as classes e fluxos de serviço, bem como a classificação destes. Também são apresentados os mecanismos de requisição e alocação de largura de banda e a MIB (*Management Information Base*) no Padrão IEEE 802.16. Além disso, como bases teóricas para a proposta deste trabalho são abordadas as disciplinas de escalonamento WRR e WF^2Q e os fluxos de serviço, associados aos sentidos *downlink* e *uplink* no escalonamento do Padrão IEEE 802.16.

O Capítulo 4 aborda o problema da QoS em redes de acesso IEEE 802.16 e propõem-se os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q no suporte à provisão de QoS nestas redes. Ainda neste capítulo, apresenta-se o funcionamento, características e contribuições dos mecanismos propostos. Além disso, discutem-se os trabalhos relacionados à proposta deste trabalho e futuras tendências no escalonamento dos fluxos de serviço em redes de acesso IEEE 802.16.

No Capítulo 5 detalham-se os procedimentos concernentes à avaliação e comparação dos mecanismos de escalonamento propostos. Este capítulo também abrange aspectos relativos à modelagem e simulação do ambiente de rede considerado. Na seqüência tem-se a apresentação e análise de resultados obtidos com os mecanismos propostos no ambiente de rede IEEE 802.16 PMP simulado.

E, por fim, apresentam-se as conclusões finais e os trabalhos futuros relativos ao tema abordado.

Capítulo 2

REDES DE BANDA LARGA SEM FIO

2.1. Introdução

A crescente demanda por serviços de dados e de multimídia de alta velocidade impulsionada por clientes domésticos e/ou comerciais revela que este mercado anseia por tecnologias inovadoras, capazes de oferecer acesso de banda larga para o usuário final ou de última milha (*last-mile*, trecho final percorrido pelo sinal de rádio) com qualidade de serviço e a um custo acessível, tanto na sua implementação quanto na sua manutenção. As tecnologias incipientes das redes de acesso de banda larga sem fio (BWA) oferecem grandes vantagens ao usuário final, pois podem atender extensas áreas geográficas e regiões de difícil acesso, nas quais inexiste infra-estrutura de rede, como é o caso das áreas rurais. Além disso, as redes BWA possuem menor custo de implementação e manutenção do que as redes cabeadas ou DSLs (*Digital Subscriber Lines*). Assim, a tecnologia WiMAX representa uma solução promissora para as redes de acesso em banda larga sem fio [5-8, 10].

O texto deste capítulo está organizado da seguinte forma: na Seção 2.2 apresenta-se o Padrão IEEE 802.16 com a descrição das camadas de controle de acesso ao meio (MAC) e física. Em seguida, na Seção 2.3 descrevem-se as arquiteturas de rede Ponto-Multiponto (PMP) e *Mesh*. A Seção 2.4 apresenta as conclusões finais acerca deste capítulo.

2.2. Padrão IEEE 802.16

Pode-se definir o Padrão IEEE 802.16 como sendo um padrão global em consonância com os padrões HiperACCESS (*High Performance Radio Access*) e HiperMAN (*High Performance Radio Metropolitan Area Network*) pertencentes ao Projeto BRAN (*Broadband Radio Access Networks*), além do grupo de trabalho de transmissão e multiplexagem TM4 (*Transmission and Multiplexing 4*), todos coordenados pelo ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*) e dos padrões do ITU (*International Telecommunication Union*) [1]. O padrão IEEE 802.16 especifica uma interface de rádio para FBWA (*Fixed Broadband Wireless Access*) que são sistemas fixos sem fio de acesso ponto a multiponto em banda larga, dentro de uma rede metropolitana sem fio (WMAN). O advento desta nova tecnologia de acesso sem fio possibilitou atender aos anseios das WMANs que necessitam de altas taxas de transmissão e precisam atender a uma grande quantidade de usuários em uma ampla área de cobertura do sinal de rádio.

Assim, em 2001 criou-se o WiMAX Forum [2] cujo objetivo é propiciar o desenvolvimento e distribuição das redes de acesso de banda larga sem fio com base no Padrão IEEE 802.16, promovendo a compatibilidade e a interoperabilidade dos equipamentos de acesso em redes de banda larga sem fio. Dessa forma, o WiMAX Forum é um órgão sem fins lucrativos composto por fabricantes de componentes e equipamentos que visa proporcionar o desenvolvimento de equipamentos compatíveis com o Padrão IEEE 802.16.

A família de padrões que compõe a tecnologia WiMAX está descrita sucintamente a seguir [1, 6, 10, 22]:

IEEE 802.16: projetado especificamente para padronizar implementações LMDS (*Local Multipoint Distribution System*), cuja utilização limita-se às freqüências de 10 a 66 GHz.

IEEE 802.16a: cobre as freqüências de operação de 2 a 11 GHz e tem o objetivo de competir com tecnologias que provêem acesso na "última milha", tais como *cable modems* e

xDSL (*Various Digital Subscriber Line Technologies*). Propõe oferecer taxas de transmissão de até 100 Mbps e alcance máximo teórico de 50 quilômetros, utilizando antenas fixas sem linha de visada ou NLOS (*Non Line Of Sight*).

IEEE 802.16b: lida com aspectos concernentes à QoS.

IEEE 802.16c: trata da interoperabilidade, protocolos e especificação de perfis de sistemas que operam em freqüências de 10 a 66 GHz.

IEEE 802.16d: apresenta uma revisão dos padrões 802.16a e 802.16c que se tornou o padrão base. Destaca-se pela provisão de suporte às antenas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), possibilitando confiabilidade quanto ao alcance em multipercurso. Além disso, possibilita facilidade quanto à instalação de antenas internas (*indoor*), quando o sinal é transmitido em ambientes fechados (máximo 300 metros, aproximadamente) sem a necessidade de visada direta entre as antenas, devido à presença de obstáculos, como por exemplo, em escritórios.

IEEE 802.16e: apresenta compatibilidade com as especificações do Padrão IEEE 802.16 e as especificações de mobilidade em WMANs. Este padrão inclui mobilidade com linha de visada direta ou LOS (*Line of Sight*) e NLOS, em freqüências de 10-66 GHz e 2-11 GHz, respectivamente. Além destas freqüências, o Padrão IEEE 802.16e também oferece suporte à mobilidade em freqüências entre 2 e 6 GHz.

IEEE 802.16f: apresenta uma introdução do conceito de redes WiMAX em malha (*mesh networks*).

IEEE 802.16g: descreve o suporte à mobilidade.

IEEE 802.16h: descreve o suporte à contenção de acesso ao meio que permite a operação em bandas ISM (*Industrial Scientific and Medical*) na faixa de 2,4 GHz e 5,8 GHz.

IEEE 802.16i: inclui o conceito de base de informações de gerência (MIB) que especifica quais variáveis são mantidas pelos elementos da rede.

IEEE 802.16j: especifica a operação em saltos múltiplos com retransmissão (*multihop relay specification*) e interoperabilidade entre estações retransmissoras (*relay stations*) e BSs (*Base Stations*).

IEEE 802.16k: propõe a união do Padrão IEEE 802.1D (padrão de *bridge* transparente) no reconhecimento da MAC do Padrão IEEE 802.16.

IEEE 802.16m: descreve a interface aérea avançada que permite a compatibilidade entre o Padrão IEEE 802.16d (nômade) e futuras redes de quarta geração (4G). Estão previstas cinco especificações de velocidades de transmissão. Uma para transferência de dados a 16 kbps. Outra especificação para a transferência de dados e multimídia a 144 kbps e três categorias de tráfego em multimídia com 2 Mbps, 30 Mbps e uma que pode alcançar até 1 Gbps.

2.2.1. Modelo de Referência

A Figura 2.1 ilustra o modelo de referência do Padrão IEEE 802.16 empregado na estação base (BS) e na estação do assinante (SS – *Subscriber Station*).

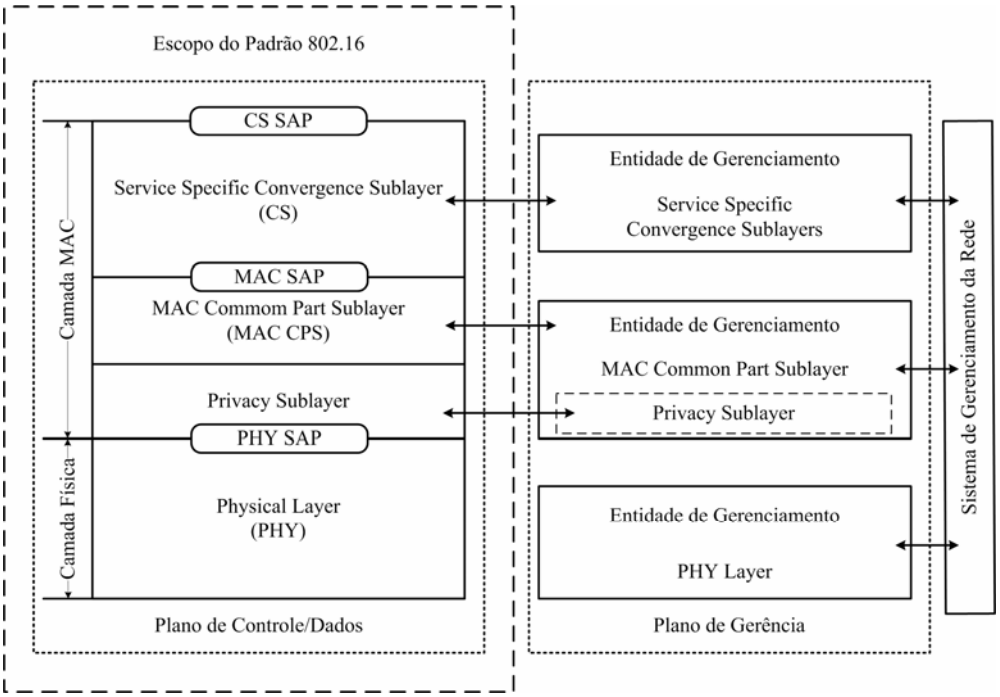

Figura 2.1: Modelo de Referência do Padrão IEEE 802.16 [1].

O padrão compreende três planos: plano do usuário, plano de controle/dados e o plano de gerência. A camada MAC possui três subcamadas: a Subcamada de Convergência Específica ou CS (*Convergence Sublayer*), a Subcamada de Convergência Comum ou CPS (*Common Part Sublayer*) e a Subcamada de Segurança (*Privacy Sublayer*) que proporciona a autenticação, troca de chaves seguras e a encriptação dos dados. A camada abaixo é a Camada Física ou PHY (*Physical Layer*). Entre uma subcamada e outra há a presença do Ponto de Acesso do Serviço ou SAP (*Service Access Point*).

2.2.2. Camada MAC

A camada MAC tem a função de controle de acesso ao meio (determina quais estações podem acessar a rede) e de garantia de QoS, através de mecanismos de alocação dinâmica de recursos e atribuição de prioridades de tráfego. Além disso, questões relativas à segurança, ajuste adaptativo de técnicas de transmissão, interoperabilidade (adaptação do tráfego proveniente de outras tecnologias), multiplexação dos fluxos de tráfego por conexão, escalonamento, suporte às topologias de rede, controle de acesso e transmissão de dados, constituem as principais funcionalidades desta camada no Padrão IEEE 802.16. O protocolo MAC lida com altas taxas de bits, tanto para *downlink* quanto para *uplink*. Os algoritmos de acesso e alocação de banda podem reservar centenas de terminais por canal, de modo que múltiplos usuários podem compartilhar um canal [3].

2.2.2.1. Subcamada de Convergência Específica

A Subcamada de Convergência Específica ou CS é responsável pelo mapeamento do tráfego proveniente das camadas superiores para a camada MAC. A CS recebe as PDUs da camada superior, realiza sua classificação e as envia ao SAP apropriado, transformando os

dados provenientes da rede externa em MAC SDUs e os transmite para a subcamada abaixo, através do ponto de acesso (CS SAP) [3]. As operações realizadas nesta subcamada abrangem a classificação das SDUs externas e sua correlação ao fluxo de serviço MAC e seu identificador de conexão (CID – *Connection IDentifier*) apropriado.

O Padrão 802.16 define atualmente duas especificações para a Subcamada de Convergência Específica: ATM CS (*Asynchronous Transfer Mode*) e CS de Pacote. O Padrão 802.16 deixa como opcional à CS executar a tarefa de supressão do cabeçalho da carga útil (*payload*, cujo formato interno na CS é único e transparente à subcamada inferior) para a especificação CS de Pacote [1].

2.2.2.1.1. ATM CS

Define-se a ATM CS como uma interface lógica que vincula serviços ATM distintos com o SAP da CPS. A ATM CS recebe e classifica células ATM da camada ATM e, se devidamente configurado, suprime o cabeçalho do *payload* (carga útil). Em seguida, transfere a CS PDU ao MAC SAP adequado.

A ATM CS foi desenvolvida especificamente para suportar a convergência das PDUs produzidas pela entidade da camada ATM. Como a geração dos fluxos de células ATM segue os princípios da tecnologia ATM, não é preciso explicitar as primitivas do serviço ATM CS. As PDUs da ATM CS constituem-se de um cabeçalho e um *payload* da PDU da ATM CS. Ambos os *payloads* da célula ATM e da PDU da ATM CS são semelhantes, conforme ilustrado na Figura 2.2.

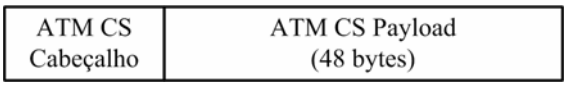

Figura 2.2: Formato da PDU da ATM CS [1].

Uma conexão ATM é caracterizada pela correspondência unívoca entre os pares de valores de uma VPI (*Virtual Path Identifier*) e uma VCI (*Virtual Circuit Identifier*). Uma conexão ATM é comutada através de um VP (*Virtual Path*) e/ou um VC (*Virtual Circuit*). O método de comutação por VP faz com que todos os VCIs agrupem-se em um único VPI de entrada, de modo que todos os VCIs sejam mapeados automaticamente em um VPI de saída. No método de comutação por VC, os valores dos pares VPI/VCI de entrada são mapeados singularmente em valores VPI/VCI de saída. Dessa maneira, na implementação do PHS (*Payload Header Suppression*), a CS do ATM distingue individualmente as duas conexões e procede a supressão apropriada.

A cada célula ATM que entra na ATM CS aplica-se um classificador, caracterizado por um conjunto de critérios, como uma relação de um CID para o VPI e VCI. Se a célula ATM estiver em conformidade com os critérios convencionados, será entregue ao MAC SAP e destinada à conexão vinculada ao CID.

No modo de comutação por VP, o campo VPI, composto por 12 bits na NNI (*Network Node Interface*) e por 8 bits na UNI (*User Network Interface*), será mapeado em um CID de 16 bits na conexão MAC em que o VPI é transmitido. O tratamento adequado do tráfego é garantido pela subcamada MAC, pois a categoria de serviço e seus parâmetros de QoS são definidos no estabelecimento da conexão com o mapeamento de um VPI para um CID.

No modo de comutação por VC, os campos VPI e VCI, ambos formando um total de 28 bits para a NNI e 24 bits na UNI, são mapeados num CID composto de 16 bits e, em seguida, transportados em uma conexão MAC. De maneira análoga à anterior, o tratamento adequado do tráfego é garantido pela subcamada MAC, pois a categoria de serviço e seus parâmetros de QoS são definidos no estabelecimento da conexão com o mapeamento dos VPIs e VCIs para um CID. Salienta-se que o total de combinações de VPIs e VCIs (limita-se em até 2^{28} na NNI e 2^{24} para a UNI) não pode ser utilizado concomitantemente neste método.

2.2.2.1.1.1. Supressão de Cabeçalho do *Payload* na ATM CS

Quando ocorre a supressão do cabeçalho do *payload* ou PHS, a parte que se repete no cabeçalho do *payload* da CS SDU é eliminada pela entidade de origem e recuperada pela entidade de destino. No canal *downlink*, a entidade de origem é a ATM CS da BS e a entidade de destino é a ATM CS da SS. No canal *uplink* as funções são inversas. Para adicionar mais largura de banda, múltiplas células ATM (ocorrendo ou não a supressão de cabeçalho) compartilham o mesmo CID e são empacotadas e transportadas por um único MAC CPS PDU. Vale salientar que se a PHS estiver desativada, nenhuma porção do cabeçalho das células ATM deverá ser suprimida, inclusive o campo de verificação de erro do cabeçalho ou HEC (*Header Error Check*). Este mecanismo proporciona uma opção de proteção da integridade do cabeçalho da célula. Se implementado ou não, a PHS estará aplicada no momento de criação da conexão ATM e será sinalizado em uma mensagem DSA-REQ (*Dynamic Service Addition Request*). Similarmente, o VPI, em conexões comutadas por VP, ou o VPI/VCI, em conexões comutadas por VC, são sinalizados nas configurações do classificador da mensagem DSA-REQ no momento em que a conexão é criada.

A Figura 2.3 ilustra uma CS PDU contendo uma única célula ATM comutada por VP com o cabeçalho suprimido e o formato do cabeçalho da ATM CS PDU para conexões ATM comutadas por VP [1].

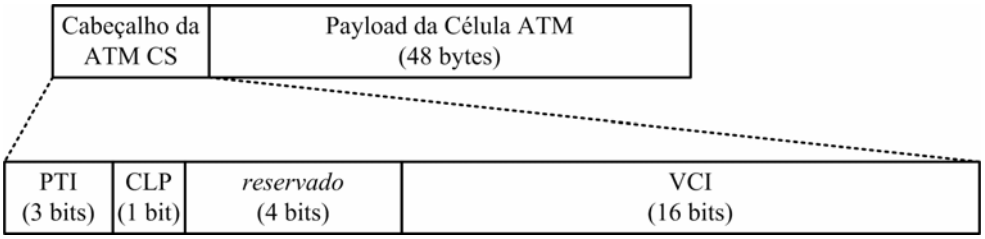

Figura 2.3: Formato da CS PDU para conexões ATM comutadas por VP.

No método de comutação por VP, o VPI é mapeado em um CID. Isto permite eliminar o cabeçalho da célula ATM, exceto para o VCI, cujo cabeçalho contém o indicador do tipo de *payload* ou PTI (*Payload Type Indicator*) e o campo de prioridade de perda de célula ou CLP (*Cell Loss Priority*). Estes campos são encapsulados no cabeçalho da CS PDU.

No método de comutação por VC, a combinação VPI/VCI é mapeada para um CID. Isto permite eliminar o cabeçalho da célula ATM, exceto o PTI e o campo CLP. Estes campos são encapsulados no cabeçalho da CS PDU. A Figura 2.4 descreve uma CS PDU contendo uma única célula ATM comutada por VC, com supressão de cabeçalho e o formato do cabeçalho da ATM CS PDU para conexões ATM comutadas por VC [1].

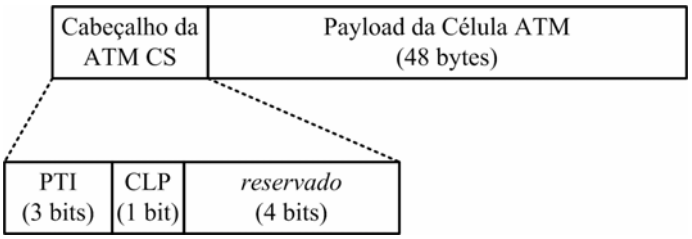

Figura 2.4: Formato da CS PDU para conexões ATM comutadas por VC.

2.2.2.1.2. CS de Pacote

A CS de Pacote (*Packet CS*) se localiza acima da MAC CPS. A subcamada CS utilizando-se dos serviços da MAC CPS implementa as seguintes funções:

- Classifica as PDUs do protocolo da camada acima na conexão apropriada;
- Suprime o cabeçalho do *payload*, sendo esta função opcional no Padrão IEEE 802.16;
- Entrega a CS PDU resultante associado com o fluxo de serviço ao MAC SAP da entidade par;
- Recebe a CS PDU da entidade par do MAC SAP e reconstrói toda a informação suprimida do cabeçalho do *payload* (função também opcional no Padrão IEEE 802.16).

A CS emissora é responsável pela entrega da MAC SDU ao MAC SAP da entidade par, conforme os requisitos de QoS, fragmentação, concatenação e demais funções de transporte associadas com as características do fluxo de serviço de uma conexão particular. Além disso, a CS de Pacote é utilizada para o transporte de todos os protocolos baseados em pacote, tais como IP (*Internet Protocol*), PPP (*Point-to-Point*) e Ethernet (Padrão IEEE 802.3).

As PDUs da camada superior são encapsuladas no formato da MAC SDU como descrito na Figura 2.5. Em alguns protocolos, cada *payload* consiste em 8 bits no campo de índice de supressão do cabeçalho do *payload* ou PHSI (*Payload Header Suppression Index*) seguido pelo campo de *payload*. Outros protocolos mapeiam a PDU da camada superior diretamente na MAC SDU. O valor 0 no PHSI indica que não existe supressão de cabeçalho do *payload* na PDU [1].

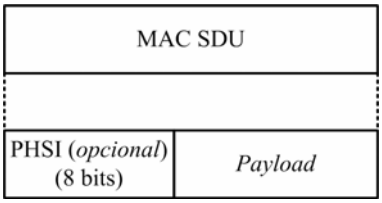

Figura 2.5: Formato da MAC SDU.

Entretanto, se o valor no PHSI for diferente de zero, o valor do índice determinará as regras de supressão. Este índice é mapeado tanto na BS quanto na SS para permitir a reconstrução da informação suprimida.

2.2.2.1.2.1. Classificação da MAC SDU

A classificação é um processo no qual uma MAC SDU é mapeada em uma conexão particular para a transmissão entre entidades MAC pares. O processo de mapeamento relaciona uma MAC SDU com uma conexão que cria uma associação com as características

do fluxo de serviço dessa conexão. Este processo facilita a entrega da MAC SDU com as características apropriadas de QoS. As Figuras 2.6 e 2.7 ilustram os mapeamentos supracitados, no sentido BS-SS e SS-BS, respectivamente [1].

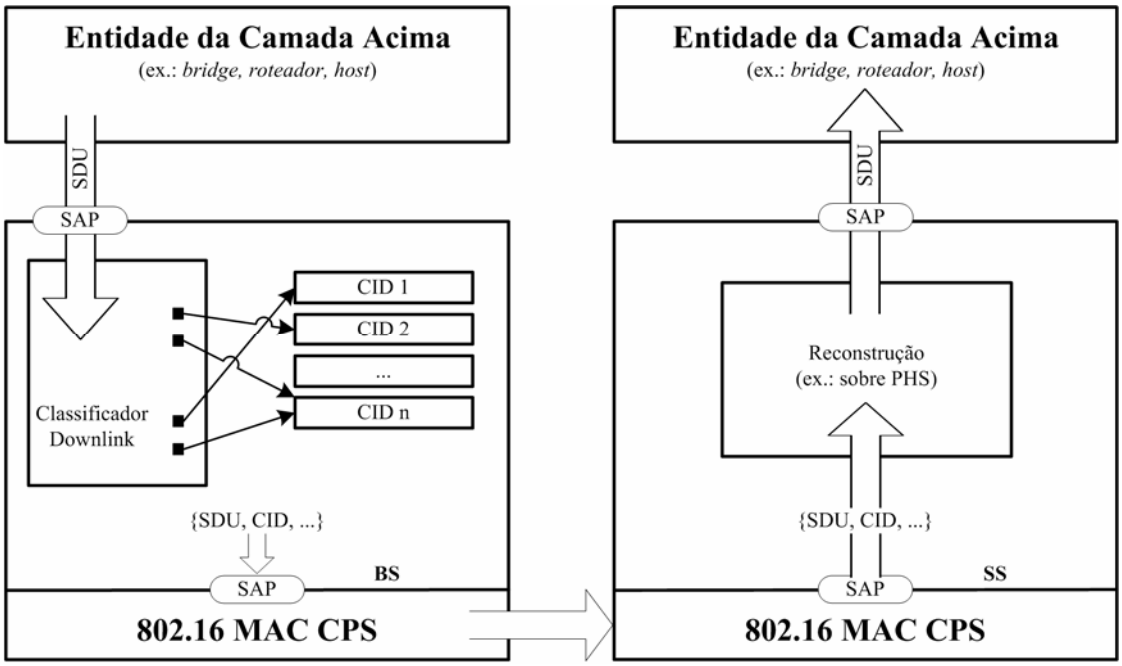

Figura 2.6: Classificação e mapeamento do CID no sentido BS-SS.

Um classificador possui um conjunto de critérios de mapeamento aplicados a cada pacote que entra na rede do Padrão IEEE 802.16. Este conjunto de critérios consiste no mapeamento de alguns campos específicos do pacote (como o endereço IP de destino; por exemplo) numa prioridade definida pelo classificador e a referência a um CID. Se um pacote estiver dentro dos critérios de mapeamento especificados, ele será entregue ao SAP e encaminhado na conexão definida pelo CID. A implementação de cada capacidade específica de classificação (como, classificação baseada no IPv4, por exemplo) é opcional. As características do fluxo de serviço da conexão fornecem a QoS para o pacote.

Diversos classificadores podem ser utilizados para o mesmo fluxo de serviço, cuja prioridade é usada para ordenar os classificadores de pacote. É necessário ordenar explicitamente, pois pode haver sobreposição dos modelos usados pelos classificadores. Contudo, a prioridade não precisa ser única, mas deve-se ter cuidado na definição das

prioridades dos classificadores, a fim de evitar ambigüidade na classificação. Os classificadores de *downlink* são aplicados pela BS aos pacotes transmitidos e os classificadores de *uplink* são aplicados nas SSs.

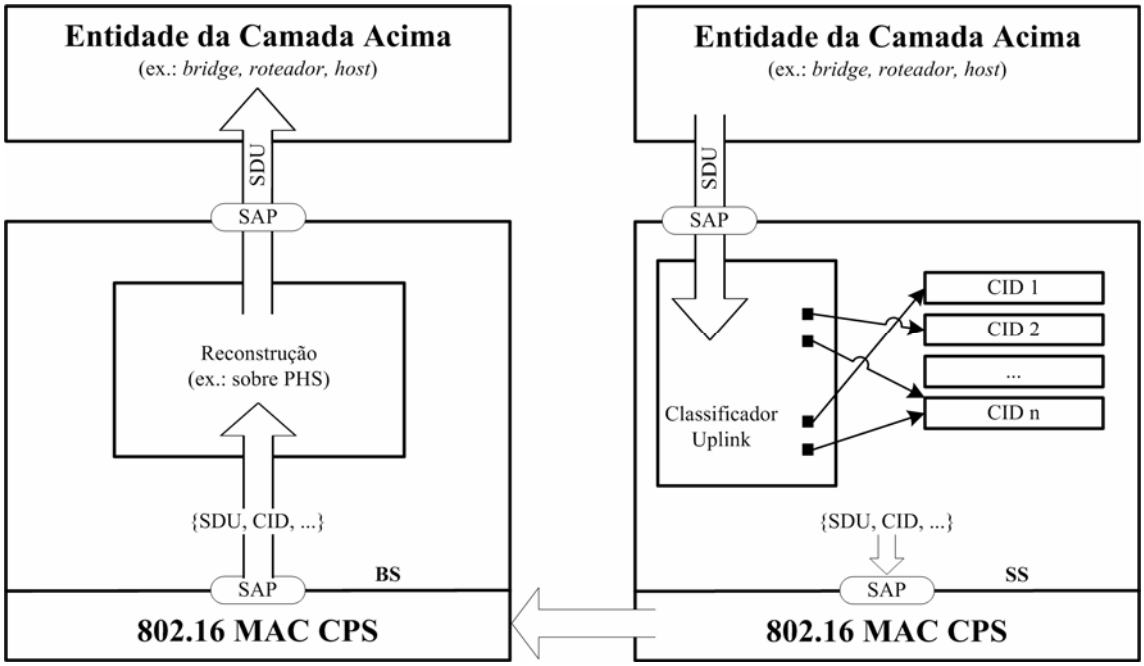

Figura 2.7: Classificação e mapeamento do CID no sentido SS-BS.

É possível que algum pacote não cumpra os critérios definidos nos classificadores. Neste caso, a CS pode associar o pacote com um valor padrão do CID ou descartar o pacote.

2.2.2.1.2.2. Classificação dos Pacotes na CS

O processo de classificação dos pacotes na BS e SS utiliza classificadores múltiplos. Cada classificador detém um campo de prioridade que determina a ordem da busca pelo classificador. O classificador que tiver a prioridade mais elevada será aplicado em primeiro lugar. Se for encontrado um classificador cujos parâmetros correspondam ao pacote, o classificador enviará o pacote à conexão correspondente. Caso não seja encontrado nenhum classificador que contenha todos os parâmetros do pacote em conformidade com os critérios

definidos, o pacote será processado de acordo com regras específicas definidas pelo fabricante ou pelo operador de rede. Dessa forma, duas ações podem ser executadas: o pacote poderá ser entregue usando uma conexão padrão ou ele poderá ser descartado.

Tipicamente, um pacote de dados é enviado por um protocolo da camada superior para ser transmitido MAC. Nela, o pacote é comparado através de conjunto de classificadores e identificado por um fluxo de serviço através do SFID (*Service Flow Identifier*). Caso haja mais de um classificador correspondente ao pacote, será escolhido o classificador com maior prioridade.

2.2.2.2. Subcamada da Parte Comum

A Subcamada da Parte Comum ou CPS independe do mecanismo de transporte e nela faz-se a fragmentação e segmentação das MAC SDUs contidas nas MAC PDUs. As funcionalidades implementadas nesta subcamada visam à adaptação aos clientes da rede de acesso IEEE 802.16. Além disso, a CPS executa importantes funções, como a inicialização das estações, a duplexação, a canalização, o escalonamento, a retransmissão das MAC PDUs e o controle da QoS [3,5-6].

Todos os serviços na camada MAC do Padrão IEEE 802.16 são mapeados para uma conexão, caracterizando a CPS como orientada à conexão. Dessa forma, implementa-se um mecanismo de provisão para a requisição de largura de banda, vinculado a parâmetros de tráfego e QoS, cujos dados e ações relacionadas às condições de contrato de serviço são roteados e transportados à subcamada de convergência adequada. As conexões são associadas a CIDs contendo 16 bits e cada conexão pode requisitar garantia contínua de largura de banda ou largura de banda sob demanda [3].

Todas as SSs possuem um endereçamento MAC composto por 48 bits, cuja função principal é a identificação dos equipamentos, já que os primeiros endereços utilizados são os

CIDs. Quando uma SS entra na rede são atribuídas três conexões de gerenciamento para cada sentido. As três conexões refletem três condições distintas de QoS utilizadas em diferentes níveis de gerenciamento. A primeira conexão é a conexão básica, usada para transferir curtas mensagens MAC de tempo crítico e mensagens de controle do enlace de rádio ou RLC (*Radio Link Control*). A segunda conexão é a de gerenciamento primário, utilizada para a transferência de longas mensagens e são mais tolerantes a atraso, tais como aquelas usadas na configuração e autenticação da conexão. A terceira conexão é a de gerenciamento secundário, utilizada para a transferência de mensagens de gerenciamento baseadas em protocolos, como DHCP (*Dynamic Host Configuration Protocol*), TFTP (*Trivial File Transfer Protocol*) e SNMP (*Simple Network Management Protocol*). Além dessas três conexões de gerenciamento, também são alocadas conexões de transporte às SSs para os serviços contratados. As conexões de transporte são unidirecionais a fim de facilitar a distinção dos parâmetros de QoS nos tráfegos *uplink* e *downlink*. Tipicamente, estes parâmetros são designados para os pares de serviço [3].

Ademais, a camada MAC reserva conexões adicionais para outros propósitos. Dentre eles, a conexão reservada ao acesso inicial baseado em contenção e outra reservada para transmissão *downlink* por difusão (*broadcast*), bem como para sinalização *broadcast* de *polling* (método que estabelece a comunicação entre a antena central controladora e as estações dos assinantes), com base na contenção das SSs que necessitam de largura de banda. Conexões adicionais são reservadas para a transmissão *multicast* (utilizada quando um nó envia a mesma informação que será replicada a vários nós pertencentes a um grupo de destino [4]), preferencialmente em *broadcast*, para o *polling* baseado em contenção. As SSs podem receber instruções para se juntarem a grupos de *polling multicast* associados com as conexões de *polling multicast* [3].

2.2.2.2.1. Formato da PDU

A PDU da camada MAC é responsável pela troca de dados entre as camadas MAC da BS e da SS. A MAC PDU, cujo tamanho máximo é de 2048 bytes, é composta por um cabeçalho de tamanho fixo (6 bytes), um *payload* (opcional) de tamanho variável e um código de redundância cíclica ou CRC (*Cyclic Redundancy Check*) também opcional, composto por 4 bytes. O *payload* pode ser preenchido com subcabeçalhos, MAC SDU ou fragmentos de MAC SDUs ou ainda pode estar vazio. Existem dois formatos de cabeçalho, distinguidos pelo campo HT (*Header Type*) [1, 3, 7]. O cabeçalho genérico, descrito na Figura 2.8, indicado pelo campo HT igual a zero. As siglas MSB e LSB referem-se ao *bit* mais significativo (*Most Significant Bit)* e menos significativo (*Least Significant Bit*), respectivamente.

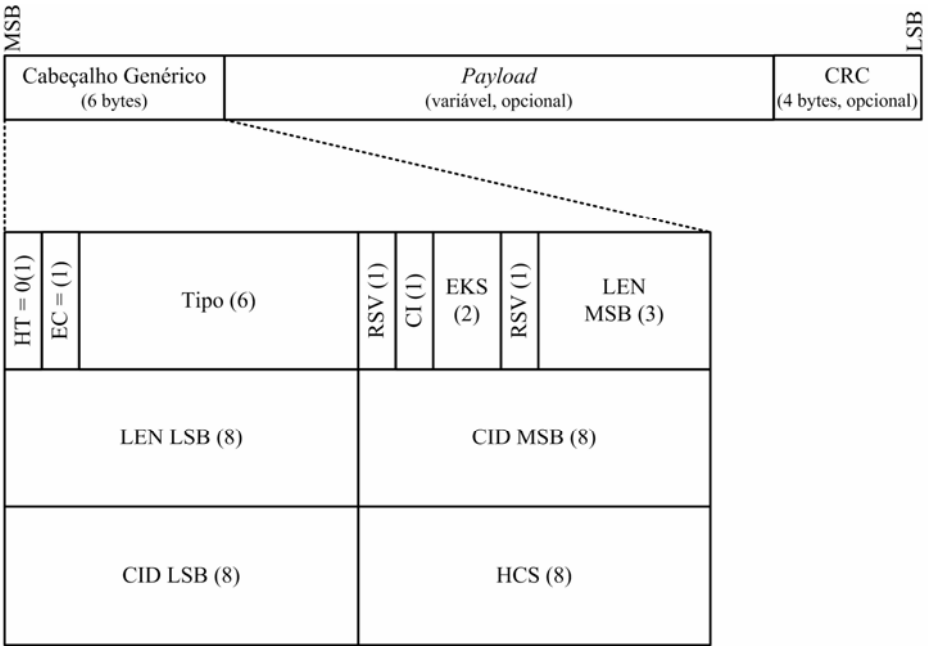

Figura 2.8: Formato genérico da MAC PDU [1].

O cabeçalho possui o campo EC (*Encriptation Control*) de 1 bit para indicar se o *payload* será criptografado [1]. O campo Tipo (6 bits) informa que tipo de carga contém o *payload*. Se Tipo = 0, indica que o *payload* é composto por um subcabeçalho de gerenciamento de concessão, utilizado para transportar o pedido de largura de banda à BS. A

SS informa à BS suas necessidades de gerenciamento da largura de banda no sentido *uplink*. Assim, evita-se a transmissão de um quadro completo para solicitar largura de banda, trata-se de uma requisição do tipo *piggyback*, em que um quadro de dados é aproveitado para fazer a requisição. Se Tipo = 1, implica que o *payload* contém um subcabeçalho de empacotamento que tem a função de empacotar várias MAC SDUs em uma única MAC PDU.

Este processo também é conhecido como agregação de pacotes no nível MAC, conforme ilustrado na Figura 2.9 [1, 8].

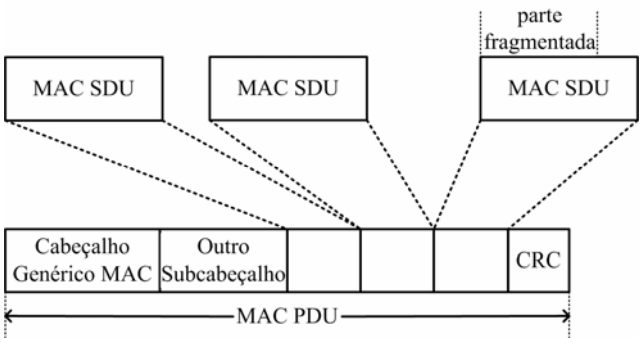

Figura 2.9: Múltiplas MAC SDUs formando um único PDU.

Ocorre tanto na BS quanto na SS. Se Tipo = 2, informa que existe um subcabeçalho de fragmentação, utilizado para controlar o processo de fragmentação de MAC SDUs no *payload*. Pois, a MAC SDU pode ser transmitida e fragmentada independentemente. A fragmentação pode correr tanto na BS, bem como na SS. Se Tipo = 3, compreende uma expansão do subcabeçalho de fragmentação ou de empacotamento no *payload*. Se Tipo = 4, indica que o *payload* detém informações concernentes à retransmissão de quadros (ARQ – *Automatic Repeat Request*). E, finalmente, se Tipo = 5, haverá um subcabeçalho *Mesh* no *payload*.

Voltando ao cabeçalho genérico, há dois campos RSV (*Reserved*) contendo 1 bit cada para usos futuros. O campo CI (CRC *Indicator*) informa se há (CI = 1) ou não (CI = 0) um código CRC no final da MAC PDU. O campo EKS (*Encriptation Key Sequence*) de 2 bits indica qual chave foi utilizada na criptografia. Sua ausência é denotada pelo campo EC = 0. O

campo LEN (*Lenght*) informa o tamanho total da MAC PDU (comprimento do quadro, incluindo CRC). O campo CID (16 bits) informa a que conexão pertence a MAC PDU. Utiliza-se o campo HCS (*Header Check Sequence*) de 8 bits para detectar erros presentes no cabeçalho [1, 3].

As MAC PDUs que utilizam o cabeçalho de requisição de banda, representado na Figura 2.10, cujo campo HT = 1, não contêm *payload* e são utilizadas exclusivamente para requisitar largura de banda *uplink* para uma determinada conexão. O cabeçalho possui o campo EC (1 bit) sempre setado em zero. O campo Tipo (3 bits) informa o tipo de requisição de banda. Se for setado em zero, implica que a requisição de banda será incremental e se for setada em 1, a requisição será agregada. O campo BR (*Bandwidth Request*) com 19 bits, expressa a quantidade de largura de banda requerida pela SS (no sentido *uplink*) para transmitir um número específico de bytes. O campo CID (16 bits) identifica a que conexão pertence a MAC PDU. O campo HCS (8 bits) detecta erros no cabeçalho [1, 3, 7].

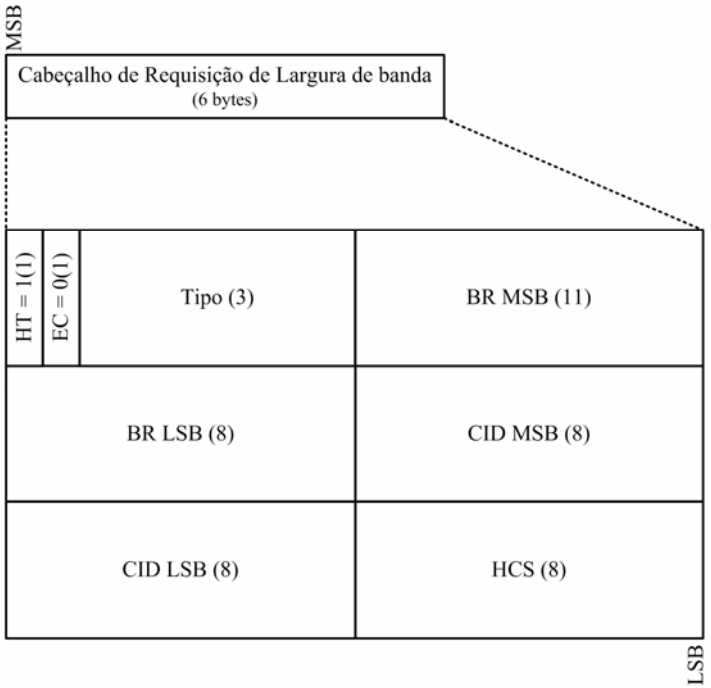

Figura 2.10: Formato do cabeçalho de requisição de banda no sentido *uplink* [1].

Além dos subcabeçalhos de fragmentação, de concessão e de empacotamento, há outros três subcabeçalhos presentes no *payload* da MAC PDU: *mesh*, retransmissão e *fast-feedback allocation*. O subcabeçalho *mesh* informa o *node* ID na topologia em malha (*mesh*). O subcabeçalho de retransmissão (ARQ) é usado em caso de erro de transmissão para requisitar a retransmissão de uma ou mais MAC SDUs. O subcabeçalho *fast-feedback allocation* é utilizado em conjunto com a camada física para acelerar a troca de dados nesta camada [1].

Os cabeçalhos e subcabeçalhos da MAC PDU já definidos conduzem a três tipos de quadros: quadro de dados, de gerenciamento e de requisição de largura de banda. O quadro de dados é utilizado no cabeçalho genérico, cujo campo HT = 0, pode conter subcabeçalhos agregados ao *payload* que são transmitidos nas conexões de dados. O quadro de gerenciamento é utilizado também no cabeçalho genérico (HT = 0). O *payload* deste quadro contém mensagens de gerenciamento MAC que são transmitidas nas conexões de gerenciamento. O formato genérico das mensagens de gerenciamento está ilustrado na Figura 2.11. As mensagens de gerenciamento utilizam codificação TLV (*Type/Lenght/Value*) e são especificadas em 47 tipos, conforme descreve o Padrão IEEE 802.16d-2004. O quadro de requisição de largura de banda apresenta o campo HT setado em 1, possui apenas cabeçalho, não há *payload*. Dessa forma, após o encaminhamento para a camada física, as MAC PDUs são armazenadas em PHY *bursts* para que sejam transmitidos.

Tipo de Mensagem de Gerenciamento	*Payload* da Mensagem de Gerenciamento

Figura 2.11: Formato das mensagens de gerenciamento [1].

2.2.3. Camada Física

Dentre as principais funções que a camada física desempenha no Padrão IEEE 802.16, pode-se destacar a transmissão das MAC PDUs; as definições: de espectro, das técnicas de

transmissão digital (modulação e codificação) e da técnica de duplexação; correção de erros e construção dos frames e subframes de transmissão.

Atualmente, o Padrão IEEE 802.16 opera em duas faixas, de 2-11 GHz e de 10-66 GHz. Na faixa de 2-11 GHz existem três especificações para WirelessMAN (WMAN) e uma para WirelessHUMAN (*Wireless High-Speed Unlicensed Metropolitan Area Networks*):

WirelessMAN-SCa: utiliza o formato de portadora única na modulação (SCa – *Single Carrier access*).

WirelessMAN-OFDM: usa a modulação OFDM sem linha de visada direta (NLOS) com uma transformada de 256 subportadoras. O controle de acesso ao meio é através da técnica TDMA (*Time Division Multiple Access*). Esta interface aérea é obrigatória em bandas não licenciadas [3].

WirelessHUMAN: utilizada em bandas não licenciadas com seleção dinâmica de freqüências (DFS – *Dynamic Frequency Selection*). A DFS detecta e evita interferências [3].

WirelessMAN-OFDMA: deriva da OFDM com acesso múltiplo (OFDMA – *Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access*) com uma transformada de 2048 subportadoras. O acesso múltiplo é disponibilizado por meio de um subconjunto de endereçamento de múltiplas portadoras para destinatários individuais [3].

Na faixa de 10-66 GHz, o Padrão IEEE 802.16 opera com propagação em linha de visada direta (LOS), pois nesta faixa de freqüência não há suporte à propagação sem linha de visada. Em virtude desta restrição foi escolhida a técnica de modulação SC (*Single Carrier*) com correção de erro FEC (*Forward Error Correction*). Dessa forma, chegou-se a especificação **WirelessMAN-SC** empregada na interface aérea. Em função da arquitetura PMP, a BS basicamente transmite um sinal TDM (*Time Division Multiplexing*) com alocação serial de *slots* de tempo a cada SS. O acesso no sentido *uplink* é realizado por TDMA. Após uma série de discussões a respeito da duplexação, foi selecionado um projeto para a rajada

(*burst*) que permitiu suporte em dois modos de operação: TDD (*Time Division Duplexing*) em que o *downlink* e o *uplink* compartilham um canal, mas não transmitem concomitantemente e FDD (*Frequency-Division Duplexing*) em que o *downlink* e o *uplink* operam em canais separados e às vezes simultaneamente. O suporte às SSs com FDD *half-duplex*, cujo custo é mais acessível do que na transmissão e recepção simultâneas, foi adicionado com pequena complexidade. Tanto na operação TDD quanto na FDD, há suporte a perfis adaptativos de tráfego em *bursts*.

A modulação e a codificação podem ser associadas dinamicamente rajada a rajada (*burst-by-burst*) [3]. Assim, a intensidade do sinal reduz à medida que a distância entre a BS e a SS aumenta, bem como a relação sinal/ruído também sofre atenuação. Por esse motivo, o Padrão IEEE 802.16 implementa três esquemas distintos de modulação, em função da distância BS-SS, como descrito na Figura 2.11.

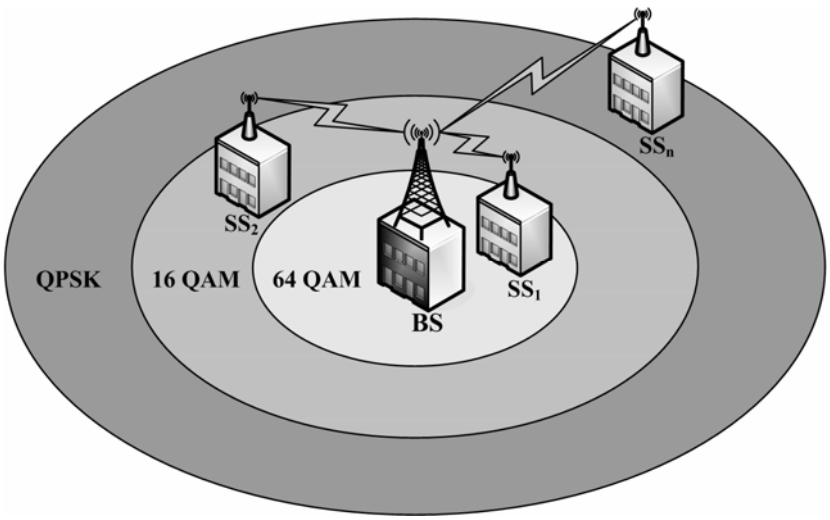

Figura 2.11: Perfis de rajada (*burst*) com associação dinâmica de técnicas de modulação [9].

Quanto maior for a distância entre os pares BS e SS, menor será a taxa de transmissão de dados. Para SSs próximas, utiliza-se o 64 QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) que transmite a uma taxa de 6 bits/baud. Para SSs localizadas a uma distância média, usa-se o esquema 16 QAM que transmite a uma taxa de 4 bits/baud. Para SSs mais distantes, utiliza-se

o QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) que transmite a uma taxa de 2 bits/baud. A Tabela 2.1 descreve as taxas de transmissão em função da largura de banda e modulações utilizadas.

Tabela 2.1. Taxa de dados (Mbps) para o Padrão IEEE 802.16 (WirelessMAN-SC) [1,10].

Largura de Banda do Canal (MHz)	QPSK	16 QAM	64 QAM
20	32	64	96
25	40	80	120
28	44.8	89.6	134.4

Desse modo, quanto maior for a largura de banda do canal, maior será a taxa de transmissão. Para uma largura de banda de 25 MHz é possível alcançar (teoricamente) até 120 Mbps.

2.3. Arquitetura de Rede

As WMANs são desenvolvidas para grandes extensões, como cidades inteiras com um grande número de WLANs e LANs (*Local Area Networks*). As WLANs provêem acesso *indoor* por meio de pontos de acesso (APs – *Access Points*) e podem ser conectadas à Internet através de tecnologias oferecidas pelas WMANs [10]. A topologia de rede tem papel fundamental na provisão de acesso à última milha. O Padrão IEEE 802.16 suporta várias arquiteturas de rede. A seguir são descritas duas arquiteturas: a arquitetura ponto-multiponto (PMP) e a *mesh*.

2.3.1. Arquitetura Ponto-Multiponto (PMP)

A arquitetura PMP permite que a rede alcance vários assinantes simultaneamente a partir de uma BS estrategicamente posicionada. Esta arquitetura, em comparação a outras como Ponto-a-Ponto, por exemplo, apresenta redução de custos e facilidade na adição de

novos usuários. Contudo, oferece menor taxa de transmissão do que na solução Ponto-a-Ponto. A Figura 2.12 descreve o funcionamento da arquitetura PMP.

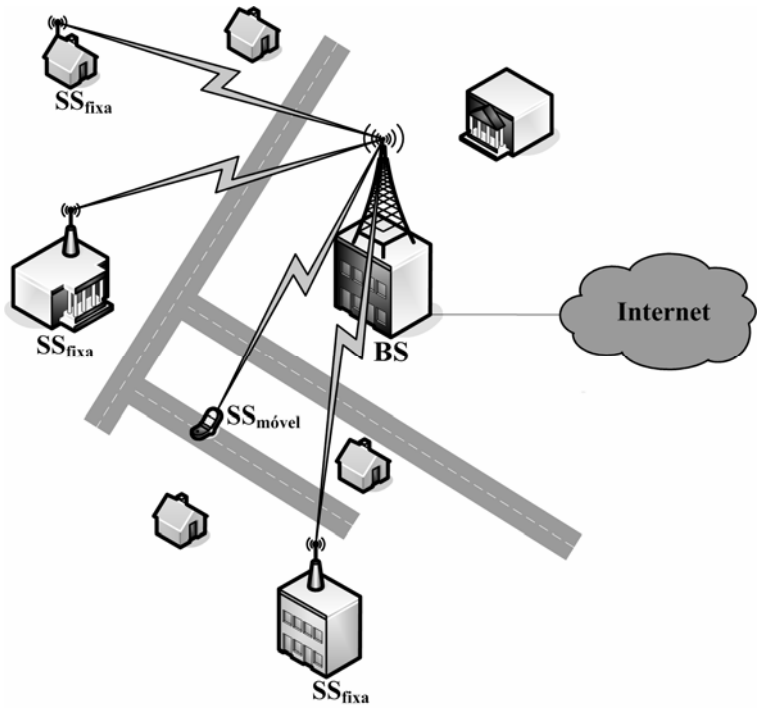

Figura 2.12: Arquitetura de rede Ponto-Multiponto (PMP) [10].

As SSs podem estar em edifícios (para o acesso fixo) ou com usuários nômades ou ainda em veículos (acesso móvel). Em ambientes rurais, o acesso é tipicamente com LOS entre a BS e a SS. Porém, em áreas urbanas as SSs são conectadas com a BS sem linha de visada direta (NLOS). Geralmente, a transmissão de uma SS consiste em um agregado de transmissões de usuários locais. Dessa forma, as WMANs agregam várias transmissões com características similares, como por exemplo, transmissões de diferentes usuários em uma LAN, mas com requisitos de QoS similares reunidos em uma única conexão [10].

2.3.2. Arquitetura *Mesh*

A arquitetura *mesh* se difere da arquitetura PMP no modo de operação. A Figura 2.14 ilustra o funcionamento de uma rede *mesh*.

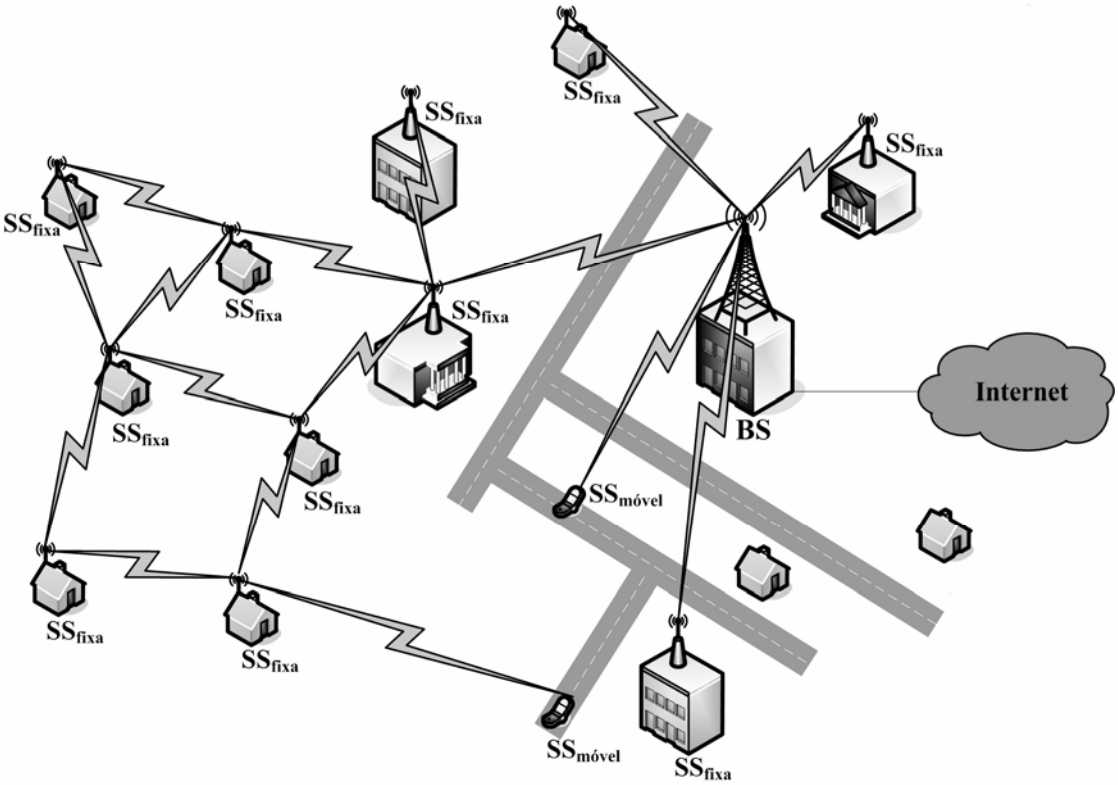

Figura 2.14: Arquitetura de rede *mesh* [10].

Enquanto o tráfego na arquitetura PMP flui da BS para a SS e vice-versa, na arquitetura *mesh* o tráfego pode ser roteado através de outras SSs. Além disso, as SSs podem se comunicar diretamente, caracterizando-as como estações ou nós repetidores. Dessa forma, várias rotas são possíveis dentro da rede *mesh*, tal condição evita pontos de congestionamento. Assim, a adição de novos usuários (SSs) aprimora o desempenho da rede, pois surgem novas alternativas de rotas, formando uma malha. A arquitetura *mesh* oferece maior confiabilidade e redundância (em caso de falha em algum nó da rede, o restante se reconectará a outros nós automaticamente). Contudo, este tipo de arquitetura apresenta custos adicionais, uma vez que em cada SS (nó repetidor) será necessário implementar um roteador.

Dessa forma, a arquitetura *mesh* provê acesso de forma mais robusta, eliminando pontos de falha e permite a comunicação direta entre SSs [11]. As SSs podem rotear suas transmissões através de outras SSs na rede *mesh*, caso não seja possível conectar-se diretamente à BS. Geralmente, a conectividade das redes *mesh* é a melhor opção para usuários móveis em comparação à conectividade da arquitetura PMP [10].

2.4. Conclusão

Neste capítulo apresentou-se uma visão geral das redes de acesso de banda larga sem fio (BWA) com foco nas redes de acesso WiMAX. Além disso, descreveu-se a família de padrões IEEE 802.16 e seu modelo de referência.

Detalhes do funcionamento da camada MAC no Padrão IEEE 802.16 também foram apresentados com a descrição das subcamadas de Convergência Específica e da Parte Comum. A camada MAC é de fundamental importância nas redes IEEE 802.16, pois é nesta camada que se implementa o suporte à provisão de QoS que serão discutidos com detalhes nas seções seguintes. Alguns aspectos da camada Física do Padrão IEEE 802.16 também formaram a composição deste capítulo, como a questão da propagação sem linha de visada e com linha de visada e os esquemas de modulação utilizados no Padrão IEEE 802.16. Encerrando o capítulo, foram apresentadas duas arquiteturas das redes de acesso do Padrão IEEE 802.16. A arquitetura PMP e a arquitetura de rede *mesh*.

Capítulo 3

PROVISÃO DE QUALIDADE DE SERVIÇO EM REDES IEEE 802.16

3.1. Introdução

A Qualidade de Serviço (QoS) pode ser definida como a qualidade da transmissão em redes de comunicação. A QoS caracteriza-se através de um conjunto de parâmetros estabelecidos nos contratos de nível de serviço que expressam a expectativa do usuário [13]. Estes parâmetros são definidos por meio de requisitos de desempenho que se traduzem em vazão, confiabilidade, atraso, *jitter* etc. Dessa forma, para gerenciar os recursos, a rede necessita de mecanismos para prover a QoS que o usuário anseia.

O desenvolvimento de pesquisas em torno da QoS em redes sem fio tem aumentando em função do crescimento no número de dispositivos móveis, como PDAs (*Portable Digital Assistants*), *laptops* e telefones celulares.

Em ambientes de redes sem fio, o suporte à QoS exige algoritmos que permitam adaptabilidade às condições do canal, gerenciamento da mobilidade, técnicas de escalonamento e protocolos MAC que tenham garantias mínimas dos requisitos de QoS, tais como atraso e *jitter* máximo tolerado, vazão mínima e menor probabilidade de erros e/ou perdas de dados.

Neste capítulo será realizada uma revisão dos principais conceitos relativos à QoS nas redes sem fio, mais especificamente, em redes do Padrão IEEE 802.16. Além disso, apresentam-se alguns aspectos concernentes às disciplinas de escalonamento no suporte à QoS.

3.2. Qualidade de Serviço

A QoS tem relação com as características de transporte dos fluxos de dados que exercem influência sobre a percepção do usuário. As principais características que permitem a provisão de QoS são [14]:

Disponibilidade do serviço: o serviço é disponibilizado imediatamente ou adiado por um tempo aceitável em função do *status* do usuário. A disponibilização é mais rápida para o usuário com prioridade mais alta do que outro com prioridade menor.

Qualidade da informação: a informação é recebida com baixa taxa de erros conforme os requisitos do tipo de serviço.

Entrega consistente: a informação será entregue com uma taxa e qualidade consistentes, garantindo que a percepção do usuário não seja alterada.

As aplicações multimídia e em tempo real contêm requisitos de QoS que necessitam ser traduzidos em parâmetros de desempenho da rede. Estes parâmetros são tipicamente relacionados ao tempo consumido nas transmissões dos fluxos de dados, à capacidade de transmissão e à confiabilidade. Alguns parâmetros geralmente utilizados [15-16] são descritos a seguir:

Taxa de transmissão: capacidade de transmissão de um determinado meio por unidade de tempo, expressa geralmente em bps (bits/s) ou em múltiplos desta unidade, como kbps e Mbps.

Vazão: quantidade de dados transmitidos (isentos de erros) por unidade de tempo, também expressa em bps ou por seus múltiplos: kbps, Mbps etc.

Atraso fim-a-fim: tempo oriundo da transmissão do fluxo de dados. O atraso na camada de aplicação é a diferença de tempo (fim-a-fim) decorrente da geração dos pacotes no *host* transmissor e a chegada destes no *host* receptor. Essa diferença de tempo é composta pelas quatro parcelas do atraso nodal total: atraso de processamento, transmissão, propagação e de fila.

Jitter (variação de atraso): variação no conjunto de valores de atraso para unidades de dados consecutivas.

Taxa de erros de bits: razão entre a quantidade de bits recebidos com erros e a quantidade de bits enviados.

3.2.1. Especificação de QoS

A especificação de QoS define os requisitos da QoS e as políticas de gerenciamento no nível de aplicação. Geralmente, cada camada do sistema é utilizada para manter e configurar os mecanismos de QoS presentes na rede e no sistema final. São ocultos no sistema final informações sobre níveis inferiores, como sincronização de fluxos de áudio e vídeo, taxa e tamanho dos fluxos. A especificação de QoS é explícita, as aplicações especificam os requisitos ao invés de realizá-los através de mecanismos de suporte à QoS. A especificação de QoS envolve [17, 27, 56-57]:

Desempenho do fluxo: caracteriza os requisitos de desempenho de fluxo do usuário. A capacidade de garantir taxas de vazão de tráfego, atraso, *jitter* e taxas de perda é particularmente importante nas comunicações em redes multimídia. Estas métricas com base em desempenho estão sujeitas a alterações de uma aplicação para outra. As estruturas de QoS

devem conhecer as características de tráfego relacionadas ao fluxo previamente à garantia dos recursos.

Nível de serviço: ao passo que o desempenho de fluxo permite que o usuário expresse as métricas de desempenho quantitativamente desejadas, o nível de serviço permite que esses requisitos sejam aperfeiçoados qualitativamente para possibilitar a distinção entre as garantias de desempenho de *software* e *hardware*. O nível de serviço exprime um grau de certeza com relação aos níveis de QoS requisitados durante o estabelecimento ou renegociação do fluxo.

Política de gerenciamento de QoS: exprime o grau de adaptação à QoS que o fluxo tolera e as decisões quando há ocorrência de violações na QoS contratada. Além disso, possibilita o estabelecimento de indicativos de QoS quando ocorrem violações na QoS requisitada e nas notificações periódicas da disponibilidade de QoS para a taxa de transmissão, atraso, *jitter* e perdas de pacotes.

Requisição e concessão de largura de banda: também conhecido como CAC (*Call Admission Control*) empregado pela BS no controle de admissão de chamadas. Este mecanismo controla as conexões das SSs contendo requisitos de parâmetros de QoS. Dessa maneira, se a rede não tiver recursos disponíveis, as requisições das SSs serão rejeitadas. Contudo, se a rede tiver recursos disponíveis, a BS verifica se a SS está autorizada para utilizar os recursos. Após a confirmação da autorização, a BS irá garantir os serviços durante a conexão.

Moldagem de tráfego: método também conhecido por *traffic shapping* que regula a taxa média de transmissão de dados, de maneira análoga ao armazenamento em *buffers* através de um suavizador de tráfego (*traffic smoothing*). A moldagem de tráfego provê suporte ao controle de tráfego com a utilização de filtros como o *token bucket* que limita o tráfego *uplink* de uma interface a uma taxa específica conforme as regras pré-determinadas pela política de controle de tráfego (configurada na interface ou pelo administrador de rede). A moldagem de

tráfego pode ser utilizada para limitar o tráfego de rajada a fim de não prejudicar o tráfego prioritário, diminuindo o atraso ou ainda, havendo congestionamentos, limita um tipo específico de tráfego.

Política de escalonamento: um mecanismo de QoS tem múltiplas prioridades de filas para diferentes classes de serviço. A política de escalonamento determina quando e como são processados os pacotes nas filas de prioridades. A política de escalonamento pode utilizar o método de trabalho conservativo ou através de estratégias de escalonamento (combinação de várias disciplinas de escalonamento) para processar os pacotes em cada fila de prioridade e alocar adequadamente os recursos entre filas de alta e baixa prioridade. O Padrão IEEE 802.16 não exige o tipo ou a forma como são escalonados os fluxos de serviço (MAC SDUs) nas redes de acesso IEEE 802.16. Assim, soluções e implementações relacionadas ao escalonamento podem ser elaboradas por pesquisadores e por fabricantes destas redes.

Custo do serviço: descreve pormenorizadamente o preço que o usuário deve pagar por certo nível de serviço. Este fator tem importância na consideração da especificação da QoS. Caso não se tenha conhecimento do custo do serviço envolvido na especificação da QoS, o usuário não terá motivos para não selecionar o nível máximo de serviço.

Sincronização do fluxo: especifica o grau de sincronização entre fluxos correlatos, tais como fluxos de áudio e vídeo.

3.2.2. QoS em Redes Sem Fio

A provisão de QoS em redes sem fio impõe muitos desafios. A dinâmica do ambiente em função da mobilidade dos usuários e as interferências externas provocam variações na capacidade do canal e na taxa de erros. Ao inverso das redes cabeadas, um ambiente de rede sem fio não admite mecanismos de QoS baseados em topologias fixas ou em quantidades fixas de recursos alocados.

Várias técnicas já foram propostas para prover suporte ao tráfego multimídia nas diversas camadas da rede [18]. As aplicações de tempo real, na camada de aplicação, podem sofrer adaptações às condições da rede. Além disso, a reserva de recursos na camada de transporte pode ser realizada durante o estabelecimento da conexão para de garantir a QoS fim-a-fim.

3.3. QoS nas Redes IEEE 802.16

A QoS no Padrão IEEE 802.16 está associada a conceitos de classificação, escalonamento por fluxos de serviço e estabelecimento de serviço. As Figuras 3.1 e 3.2 ilustram a classificação e o escalonamento dos fluxos de serviço nos sentidos *downlink* e *uplink*, respectivamente.

As requisições de QoS são compostas por funções de configuração e registro pré-configuradas nas SSs baseadas na QoS dos fluxos de serviço e nos parâmetros de tráfego. As requisições de largura de banda no sentido *uplink* podem ser de quatro tipos:

Piggyback Request, efetuadas juntamente com os quadros de dados;

Implicit Request ou ***BW Request***, requisição que utiliza a PDU, cujos campos HT = 1 e EC = 0;

Unicast Polling, requisições realizadas pelas SSs em intervalos de tempo sem contenção;

Contention Based Polling, requisição em que as SSs enviam mensagens *BW Request* durante um intervalo de reserva, cuja contenção é realizada através do algoritmo *back-off*.

As mensagens DL-MAP (*downlink map*) e UL-MAP (*uplink map*) são utilizadas para indicar os *slots* físicos (*bursts*) sobre o tráfego *downlink* como pode ser visto na Figura 3.1 e a alocação da largura de banda e o perfil de rajada sobre o tráfego *uplink* apresentada na Figura 3.2. Além disso, as requisições de QoS podem conter funções de sinalização que estabelecem um fluxo dinâmico de serviço com base nos parâmetros de tráfego. O escalonamento para os

fluxos de serviço *uplink* e *downlink* são executados na camada MAC mediante a verificação dos parâmetros de QoS. As propriedades dos fluxos de serviço são agregadas em classes de serviço, dessa forma, as entidades das camadas superiores e as aplicações localizadas externamente podem requisitar os fluxos de serviço conforme os parâmetros de QoS solicitados.

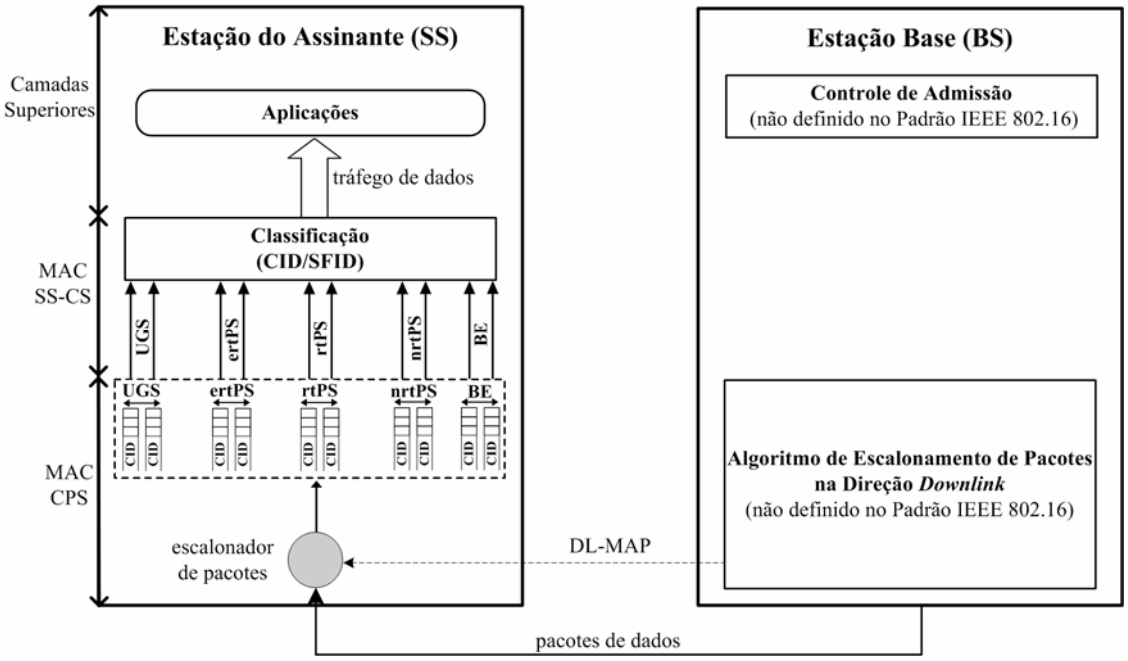

Figura 3.1: Arquitetura de QoS do Padrão IEEE 802.16 na direção *downlink* [19].

O fator limitante de recursos em redes de acesso do Padrão IEEE 802.16 está condicionado à largura de banda do canal que se relaciona diretamente com a capacidade de transmissão do canal (taxa de transmissão). Dessa forma, quando há concorrência de diversos tipos de fluxos de serviço, competindo por recursos limitados pela largura de banda, é necessário implementar um policiamento de QoS a fim de atribuir prioridades aos fluxos de serviço para que os requisitos das aplicações de dados e multimídia sejam atendidos satisfatoriamente. O policiamento de QoS depende das aplicações, caracterizadas pelo desempenho das métricas de QoS. Assim, para aplicações elásticas (*e-mail*, por exemplo), não há necessidade de garantias, exceto para o requisito taxa de entrega. Porém, para uma

aplicação VoIP, por exemplo, há necessidade de garantias de atrasos menores do que os atrasos admitidos pelas aplicações elásticas [27].

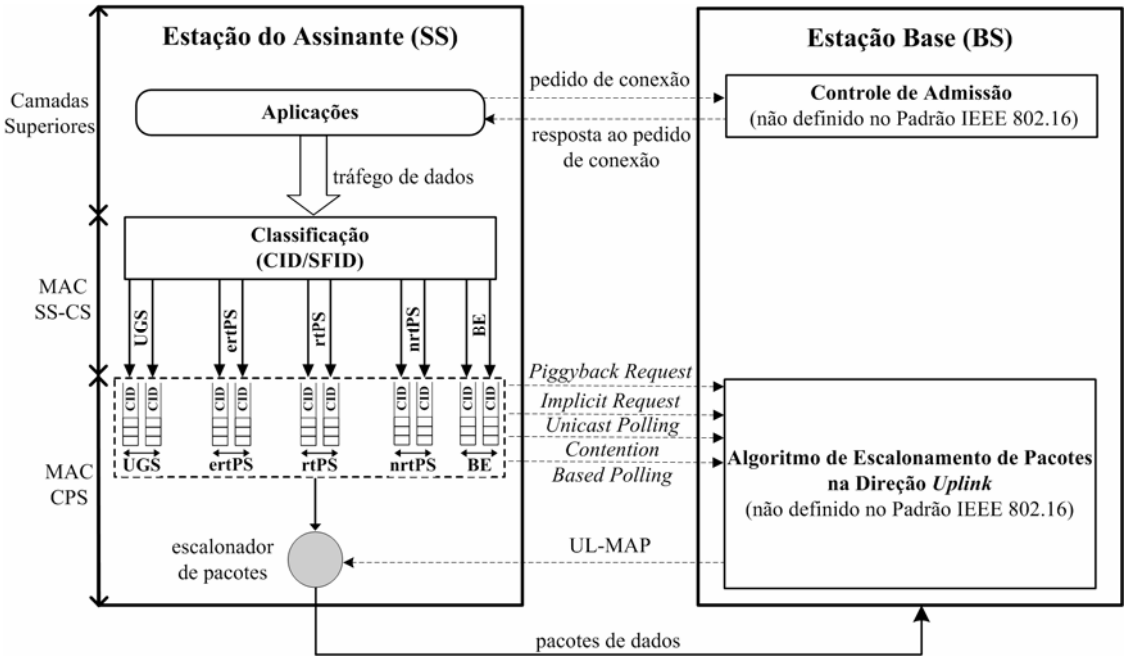

Figura 3.2: Arquitetura de QoS do Padrão IEEE 802.16 na direção *uplink* [19].

O mais importante mecanismo de provisão de QoS está relacionado com a transferência de pacotes da interface da camada MAC, por meio de um fluxo de serviço com identificação única: CID. O fluxo de serviço é definido por um fluxo de serviço unidirecional de pacotes associado a um nível de QoS específico. A SS e a BS garantem a QoS conforme o conjunto de parâmetros de QoS caracterizados no fluxo.

A Figura 3.3 descreve uma arquitetura de QoS do Padrão IEEE 802.16 para a BS. Nesta arquitetura, a Subcamada de Convergência Específica (CS) contém um gerenciamento de configuração determinado por mecanismos externos, tipicamente pelo sistema de gerenciamento de rede. Além disso, a Subcamada de Convergência Específica também é responsável pela classificação dos pacotes no sentido *downlink* e pela remontagem dos pacotes no sentido *uplink*. A Subcamada da Parte Comum (CPS) é responsável pelo controle de admissão de chamadas (CAC) e pelo escalonamento dos fluxos de serviço no sentido

downlink. Além disso, a Subcamada da Parte Comum é responsável por funções de gerenciamento do enlace, segurança, retransmissão dos quadros (ARQ) e processamento da rajada *uplink*.

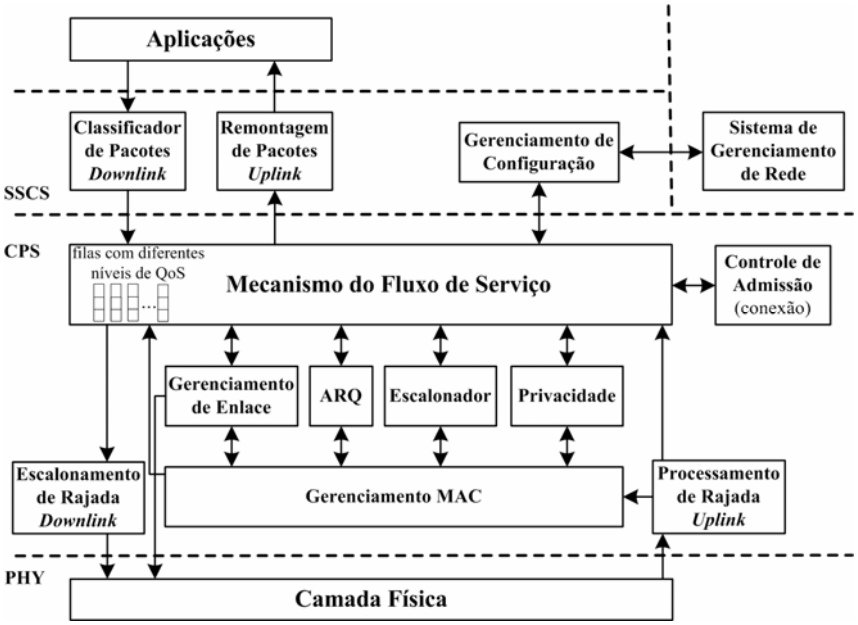

Figura 3.3: Arquitetura de QoS do Padrão IEEE 802.16 para a BS [20].

A Figura 3.4 apresenta uma arquitetura de QoS para a SS. O escalonamento dos fluxos de serviço é realizado na CPS, onde são estabelecidas as filas com prioridades distintas de QoS.

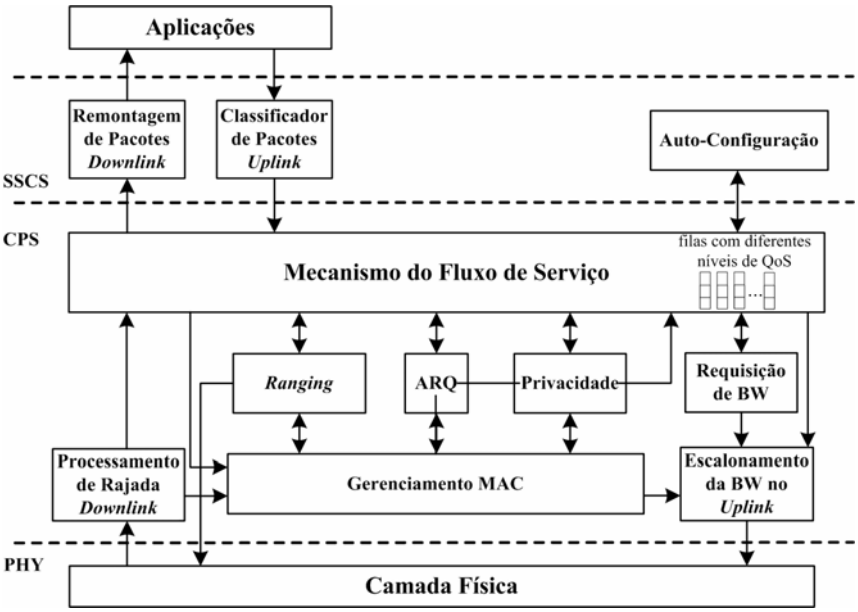

Figura 3.4: Arquitetura de QoS do Padrão IEEE 802.16 para a SS [20].

A CS nessa arquitetura é responsável pela classificação dos pacotes no sentido *uplink* e pela remontagem dos pacotes no sentido *downlink*. A CPS nessa arquitetura é responsável pela retransmissão dos quadros, segurança dos dados, ajuste de parâmetros locais, como potência de transmissão (*ranging*) da SS, escalonamento e requisição de largura de banda no sentido *uplink*.

3.3.1. Teoria do Modelo de Objetos

O Padrão IEEE 802.16 possui objetos que compõem a arquitetura de provisão de QoS. A Figura 3.5 ilustra os principais objetos desta arquitetura.

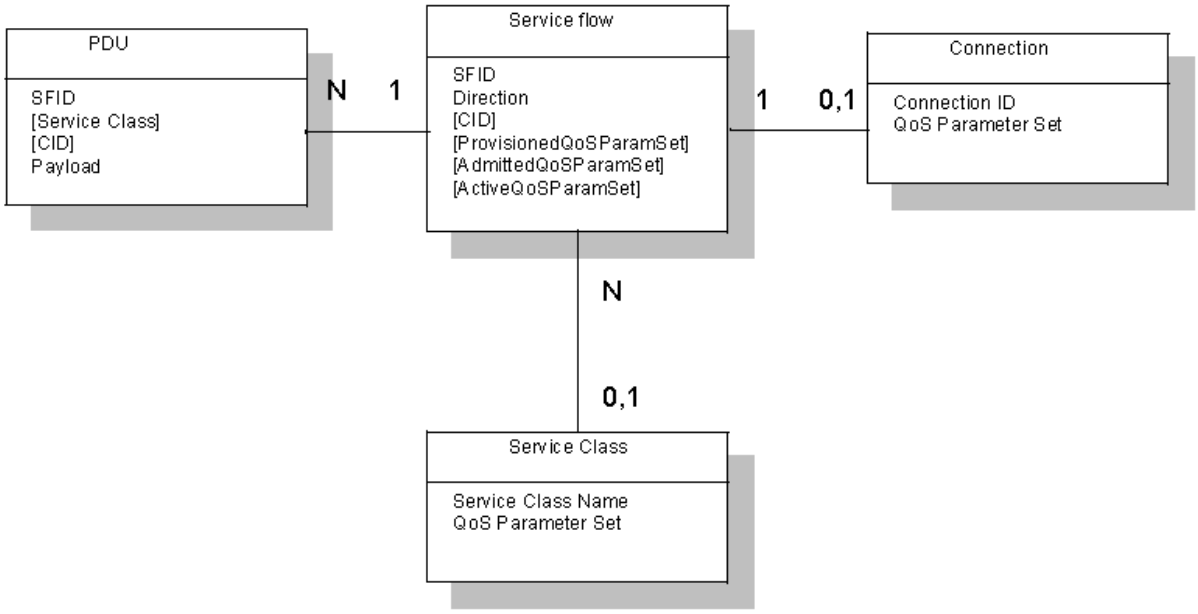

Figura 3.5: Teoria do Modelo de Objetos de Operação [1].

Os atributos (SFID, CID e *Service Class Name*) identificam de maneira única os objetos aos quais pertencem. Os atributos opcionais estão entre colchetes. A relação entre o número de objetos é indicada no final de cada linha associada ao atributo. Assim, por exemplo, uma PDU está associada somente a um fluxo de serviço. Contudo, um fluxo de serviço pode se

associar com 0 ou N PDUs. O conceito fundamental da camada MAC está relacionado ao fluxo de serviço, cuja identificação é única, por meio de um SFID e o sentido associado (*uplink* ou *downlink)*. Se o fluxo de serviço é admitido, ocorre um mapeamento pelo CID desses fluxos de serviço.

3.3.2. Classes de Serviço

O Padrão IEEE 802.16 define cinco classes ou categorias de serviço que são manipuladas diferentemente por mecanismos de escalonamento na camada MAC (Subcamada da Parte Comum). As cinco classes de serviço do Padrão IEEE 802.16 estão relacionadas à provisão da QoS na rede de acesso [1, 27, 32-53]:

UGS (*Unsolicited Grant Service*): projetada para o suporte aos fluxos de serviço de tempo real com pacotes gerados em tamanho fixo a intervalos periódicos, como no tráfego CBR (*Constant Bit Rate*). Esta classe de serviço pode ser utilizada pelo tráfego gerado por emulação de circuitos E1/T1 e na transmissão de voz sem compressão. A classe UGS oferece periodicamente concessões não-solicitadas para transmissão de dados. Dessa forma, diminui-se o *overhead* e o atraso das requisições das SSs no envio de pedidos de transmissão. A SS no UGS não é autorizada a requisitar qualquer tipo de requisição por contenção e a BS não oferece oportunidades de requisição *unicast* às SSs. Além disso, requisições *piggyback* não são permitidas no UGS.

Os parâmetros *Unsolicited Grant Size*, *Grants Per Interval*, *Nominal Grant Interval* e *Tolerated Grant Jitter* são os mais importantes nos fluxos de serviço UGS [35-43]. A Figura 3.6 ilustra a concessão de privilégio de acesso para os fluxos de serviço UGS. Para assegurar os parâmetros ou especificações de QoS, como taxa de tráfego mínima reservada e máximo atraso e *jitter* tolerados, o escalonamento define o tempo de referência t_0, com os tempos desejados de transmissão, onde $t_i = t_0 + i*interval$, onde termo *interval* equivale ao parâmetro

Nominal Grant Interval. O tempo atual de concessão (t'_i) deve estar contido no intervalo $t_i \leq t'_i \leq t_i$ + *jitter*, o termo *jitter* está relacionado ao parâmetro *Tolerated Grant Jitter*. Assim, quando há múltiplas concessões solicitadas por intervalo de tempo, estas devem estar contidas no intervalo do *jitter*.

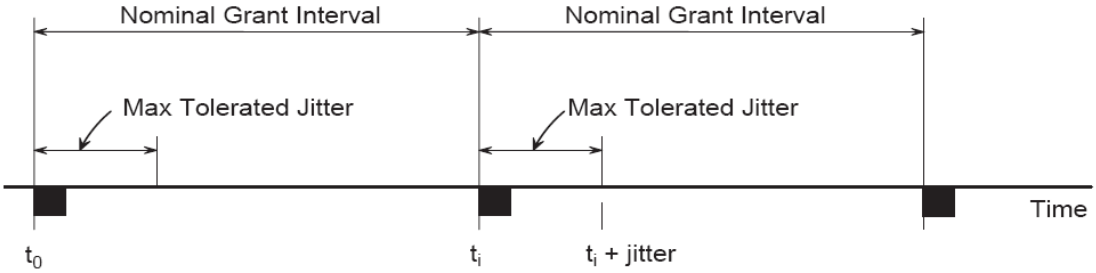

Figura 3.6: Concessão de Privilégio de Acesso de Dados (*Data Grants*) e o fluxo de serviço UGS [23].

rtPS (*real time Polling Service*): projetada para o suporte aos fluxos de serviço de tempo real com pacotes de tamanho variável, gerados em intervalos periódicos, tais como tráfego multimídia no formato MPEG (*Motion Picture Expert Group*). Este tipo de classe de serviço oferece periodicamente oportunidades de requisição *unicast*, tais condições atendem satisfatoriamente as necessidades dos fluxos de tempo real (largura de banda e atraso), permitindo que as SSs especifiquem o tamanho da concessão almejada. Não é permitido às SSs utilizarem qualquer forma de requisição de contenção ou de *piggyback*. Os parâmetros *Minimum Reserved Traffic Rate*, *Nominal Polling Interval* e *Tolerated Poll Jitter* são as principais especificações de QoS para esta classe de serviço [35-43]. Para garantir estes parâmetros, o esquema de escalonamento é bastante similar ao definido para o UGS.

ertPS (*extended real time Polling Service*): classe de serviço similar ao UGS, porém não há nenhum mecanismo de requisição de largura banda. Esta classe de serviço foi projetada para ser utilizada em fluxos de serviço de tempo real com pacotes de tamanho variável, como VoIP com supressão de silêncio. De maneira análoga ao rtPS, no ertPS a BS é responsável

pela alocação da largura de banda por conexão. A conexão ertPS pode decrementar ou incrementar a alocação de banda com base no tráfego. Os parâmetros de QoS dos fluxos de serviço ertPS são os mesmos da classe rtPS [10, 22, 35-43].

nrtPS (*non-real time Polling Service*): projetada para o suporte aos fluxos de serviço de tempo não real com pacotes de tamanho variável em intervalos de tempos periódicos, tais como em aplicações FTP (*File Transfer Protocol*), *e-mail*, SMS (*Short Message Service*), *multicast* e *broadcast*, MMS (*Multimedia Messaging Service*) etc. Nesta classe de serviço há oferta periódica de oportunidades de requisição *unicast* (*polls*) com intervalos de tempo mais espaçados do que na classe rtPS. Tal condição assegura que o fluxo seja recebido em oportunidades de requisição mesmo ocorrendo congestionamentos na rede. Além disso, as SSs podem empregar oportunidades de requisição de contenção e de *piggyback*. Os parâmetros *Nominal Polling Interval*, *Minimum Reserved Traffic Rate* e *Traffic Priority* são as principais especificações de QoS desta classe de serviço [35-43].

BE (*Best Effort*): serviço típico oferecido pela Internet para o tráfego *Web*. Nesta classe de serviço as SSs podem empregar oportunidades de requisição de contenção e de *piggyback*, porém não podem utilizar *polls* periódicos e não é permitido enviar concessões periódicas para a transmissão de dados pela BS. Os parâmetros *Minimum Reserved Traffic Rate* e *Traffic Priority* são as principais especificações de QoS da classe BE [35-43].

A Figura 3.7 ilustra o funcionamento do mecanismo de provisão de QoS no Padrão IEEE 802.16 com suporte ao tráfego multimídia, como voz, VoIP, *e-mail*, TFTP e HTTP (*HyperText Transfer Protocol*). O Padrão IEEE 802.16 especifica que a BS deve usar o parâmetro *Traffic Priority* nas classes nrtPS e BE para determinar a precedência na requisição do serviço e na geração de concessão para que os dados sejam transmitidos.

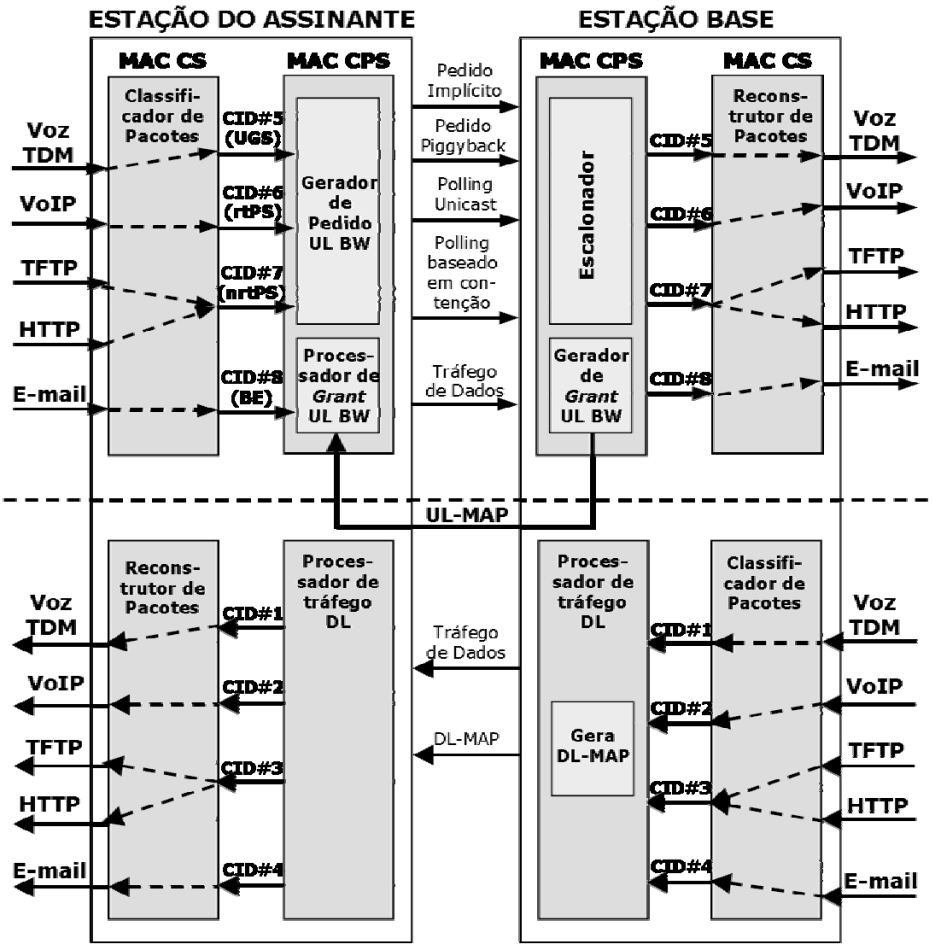

Figura 3.7: Mecanismo de Provisão de QoS para Aplicações Multimídia [21, 52].

Quando os pacotes são classificados na Subcamada de Convergência Específica da MAC, cada conexão da SS para a BS é associada a uma classe de serviço. A escolha da conexão à qual o fluxo se enquadra é baseada no tipo de garantias de QoS requisitadas pela aplicação.

3.3.3. Fluxos de Serviço

O fluxo de serviço é um serviço de transporte disponível na camada MAC que fornece um transporte unidirecional dos pacotes oriundos da SS (sentido *uplink*) ou da BS (sentido *downlink*). Um fluxo de serviço é caracterizado por um conjunto de parâmetros ou atributos de QoS, tais como atraso e *jitter* máximos tolerados e taxa de tráfego mínima reservada. A

fim de padronizar as operações entre SSs e BSs, os parâmetros incluem detalhes de como as SSs podem requisitar *slots uplink* e o comportamento esperado do escalonador *uplink* da BS. Dessa forma, um fluxo de serviço é parcialmente caracterizado pelos seguintes atributos [1, 10, 27, 52-55]:

SFID: identificador do fluxo de serviço que é atribuído a todos os fluxos de serviço existentes. O SFID é o principal identificador na SS e na BS para o fluxo de serviço. Um fluxo de serviço tem pelo menos um SFID e um sentido associado.

CID: identificador da conexão que realiza o mapeamento para um SFID existente, somente quando a conexão tiver um fluxo de serviço admitido.

PQPS (*ProvisionedQoSParamSet*): conjunto de parâmetros de QoS provisionado através de meios externos aos definidos no Padrão IEEE 802.16, tal como o sistema de gerenciamento de rede.

AQPS (*AdmittedQoSParamSet*): conjunto de parâmetros de QoS para os quais a BS, e possivelmente a SS, reservam recursos. Dentre estes recursos, o principal é a largura de banda, porém outros recursos também podem ser reservados, tal como espaço em *buffer* para viabilizar a ativação do fluxo.

ACQPS (*ActiveQoSParamSet*): conjunto de parâmetros de QoS que define o serviço que está efetivamente sendo provido ao fluxo de serviço. Somente um fluxo de serviço ativo pode enviar pacotes.

Authorization Module: módulo de autorização que é uma função lógica na BS que aprova ou rejeita qualquer mudança nos parâmetros e classificadores de QoS relacionados a um fluxo de serviço. Dessa maneira, é definido um "envelope" que limita os possíveis valores dos conjuntos de parâmetros AQPS e ACQPS.

A relação entre os conjuntos de parâmetros de QoS está ilustrada nas Figuras 3.8 e 3.9. O ACQPS é sempre um subconjunto do AQPS, que por sua vez, é sempre um subconjunto do

“envelope” de autorização. No modelo de autorização provisionado, descrito na Figura 3.8, o envelope de autorização é determinado pelo PQPS.

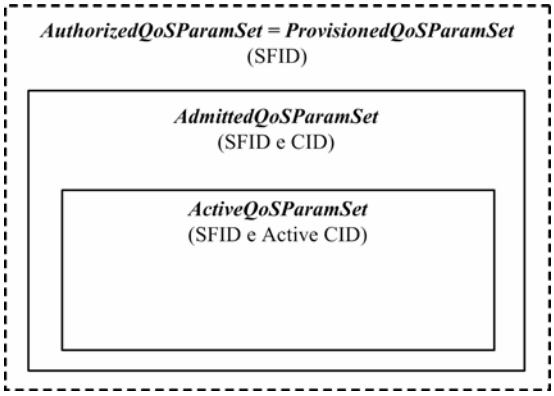

Figura 3.8: Modelo de Autorização Provisionado [1].

No modelo de autorização dinâmico, representado pela Figura 3.9, o envelope de autorização é determinado pelo *Authorization Module*, identificado como AQPS.

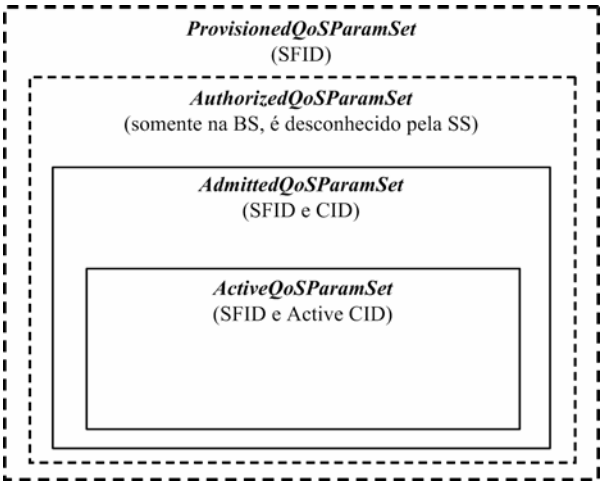

Figura 3.9: Modelo de Autorização Dinâmico [1].

Os fluxos de serviço são classificados em três estados [1, 10, 27, 52-55]:

Provisionado: fluxo de serviço conhecido pela provisão, como por exemplo, através do sistema de gerenciamento de rede. Os conjuntos de parâmetros AQPS e ACQPS para esse fluxo são ambos nulos.

Admitido: fluxo de serviço com recursos reservados pela BS para o seu conjunto de parâmetros AQPS, porém esses parâmetros não estão ativos (ACQPS nulo). Os fluxos de serviço admitidos podem ter sido provisionados ou sinalizados por outro mecanismo.

Ativo: fluxo de serviço com recursos atribuídos pela BS para o seu conjunto de parâmetros ACQPS. Assim, por exemplo, a BS pode enviar mapas contendo concessões não-solicitadas para a transmissão de fluxo de serviço UGS. O conjunto de parâmetros ACQPS não é nulo.

3.3.3.1. Classificação dos Fluxos de Serviço

O principal mecanismo de provisão de QoS no Padrão IEEE 802.16 associa os pacotes a um fluxo de serviço. Este mecanismo de classificação está representado na Figura 3.10 (sentido *uplink*) e na Figura 3.11 (sentido *downlink*).

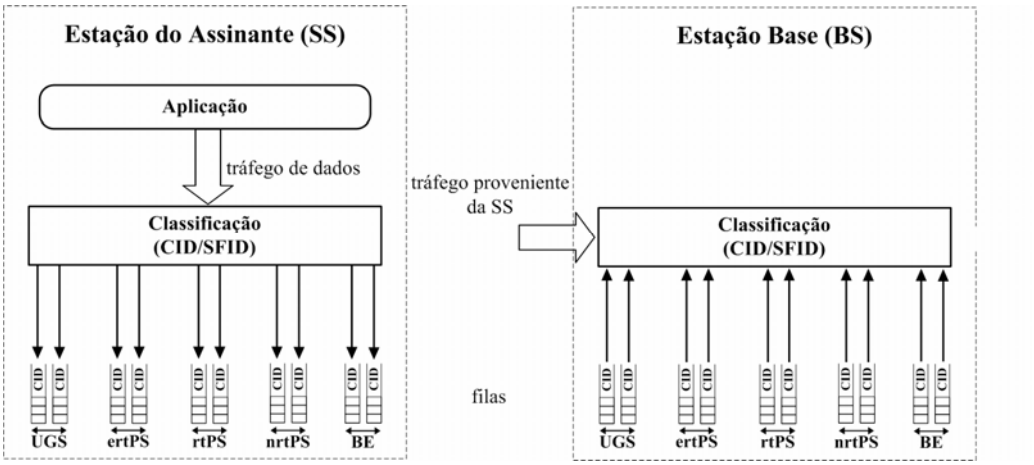

Figura 3.10: Mecanismo de Classificação do Padrão IEEE 802.16 (*uplink*) [1].

Depois que a aplicação efetua seu registro na rede, ocorrerá uma associação da aplicação a um fluxo de serviço através da atribuição de um identificador único ou um SFID. Cada pacote é rotulado com a atribuição de um SFID, de modo que a rede possa prover a QoS adequada. Ao enviar pacotes, as aplicações solicitam o estabelecimento de uma conexão com

a rede e recebe um identificador de conexão ou um CID. A classificação das MAC SDUs e a atribuição de SFIDs/CIDs são realizadas na Subcamada de Convergência Específica da MAC (MAC-CS). Portanto, os pacotes da rede de acesso IEEE 802.16 incluem dois identificadores, por fluxo e por conexão, tornando a camada MAC do Padrão IEEE 802.16 orientada à conexão [52].

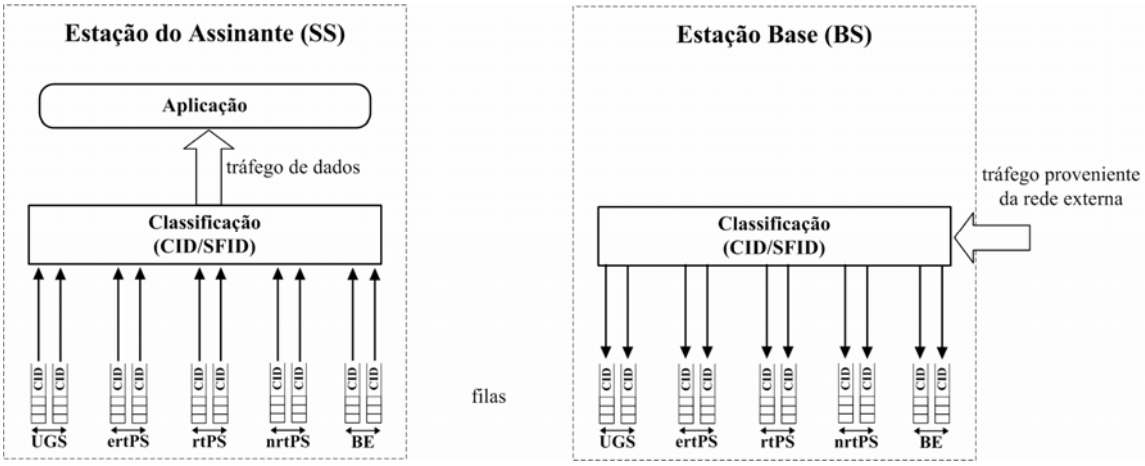

Figura 3.11: Mecanismo de Classificação do Padrão IEEE 802.16 (*downlink*) [1].

O grupo de ferramentas que oferecem suporte à provisão de QoS para tráfegos *downlink* e *uplink* incluem:

- Funções de configuração e registro dos fluxos de serviço;
- Sinalização para o estabelecimento dinâmico de QoS com base nos fluxos de serviço e nos parâmetros de tráfego;
- Escalonamento e parâmetros de tráfego para fluxos de serviço *downlink* e *uplink*;
- Agrupamento de propriedades do fluxo de serviço em classes de serviço a fim de agregar requisições.

O canal de acesso do Padrão IEEE 802.16 utiliza TDM no sentido *downlink* e TDMA no sentido *uplink*. O módulo de escalonamento de pacotes aloca largura de banda para conexões em função do número de *slots* alocados por conexão pelo canal TDM. Este módulo também

determina quando uma conexão terá permissão para transmitir, caracterizando a conexão como ativa ou inativa.

O módulo de escalonamento de pacotes no sentido *uplink* tem maior complexidade devido à existência de filas distribuídas entre as SSs. A estrutura do fluxo *uplink* será abordada em detalhes em seção posterior.

3.3.3.2. Mecanismo de Requisição e Alocação de Largura de Banda

A requisição de largura de banda caracteriza-se por ser um processo em que a SS solicita à BS alocação de uma determinada quantidade de largura de banda. A requisição pode ser isolada, através de MAC PDU (cabeçalho de requisição de banda) ou *inband*, por meio de requisições de subcabeçalho *piggyback* [31]. Dessa forma, há duas formas de requisitar largura de banda: a incremental, na qual se adiciona certa quantidade de largura de banda ou de forma agregada, contendo a largura de banda total necessária.

A requisição de largura de banda pode ser iniciada diretamente pela conexão, através do mecanismo GPC (*Grant Per Connection*) ou em resposta ao recebimento de uma mensagem na BS, contendo um *polling*, processo pelo qual a BS aloca ou concede banda para SSs específicas para que elas possam fazer suas requisições. Este mecanismo é chamado de GPSS (*Grant Per Subscriber Station*). Logo, a alocação de banda pode ser para SSs específicas ou para grupos de SSs.

O mecanismo de alocação de largura de banda por conexão (GPC) é indicado para ambientes com poucas SSs, onde a BS aloca recursos para SS por fluxo. Embora este mecanismo proporcione simplicidade de implementação nas SSs, ocasiona sobrecarga no processamento na BS.

O mecanismo de alocação de largura de banda por SS (GPSS) é adequado para ambientes com muitas SSs, pois permite ajustes mais refinados, conforme os requisitos de

QoS das aplicações. Neste mecanismo, a BS aloca recursos à SS, de modo que a SS possa redistribuir a largura de banda entre suas conexões, conservando a QoS conforme o nível de serviço acordado. Embora este mecanismo proporcione menor sobrecarga de processamento na BS, exige SSs mais sofisticadas. Tal condição implica em maiores custos de implementação do GPSS em comparação ao GPC. O Padrão IEEE 802.16 determina que o GPSS seja obrigatório na especificação de sua camada física na faixa de freqüência de 10 a 66 GHz.

A fim de assegurar que as requisições das SSs sejam atendidas, a BS aloca largura de banda antes que as SSs efetuem suas requisições. Esse procedimento é designado de *polling*. Há duas formas de *polling* na BS:

Contention Based Polling: método de contenção de *polling* baseado na SS ou na conexão. As alocações de largura de banda podem ser individuais (*multicast*) ou em grupos de SSs (*broadcast*) que disputam por oportunidades de enviar suas requisições de largura de banda. A alocação não é realizada sob a forma de uma mensagem explícita, mas sob a forma de uma série de IEs (*Information Elements*) contidos nos UL-MAPs.

Unicast: método em que a BS solicita informação à SS sobre sua necessidade de transmitir para o meio. Neste caso, a BS permite a alocação de largura de banda para o envio de mensagens de requisição. Neste método, utiliza-se o bit PM (*Poll-me*) para requisitar um *polling*.

3.3.3.3. MIB do Padrão IEEE 802.16

O gerenciamento da rede de acesso no Padrão IEEE 802.16 é composto por um módulo de gerência, pelos nós submetidos ao gerenciamento (BSs e SSs) e por uma base de dados sobre o fluxo de serviço. O Padrão IEEE 802.16 define a estrutura do formato da MIB (*wmanIfMib)* utilizada pelas BSs e SSs na coleta e armazenamento de informações a respeito

dos objetos gerenciados [24]. A Figura 3.12 descreve a estrutura da MIB para o Padrão IEEE 802.16. As informações sobre a QoS associada ao fluxo estão contidas na base de dados do fluxo de serviço. As informações de QoS relacionadas ao fluxo de serviço permitem orientar a BS e a SS quando as conexões de transporte são criadas na provisão de um serviço ou quando uma SS participa da rede.

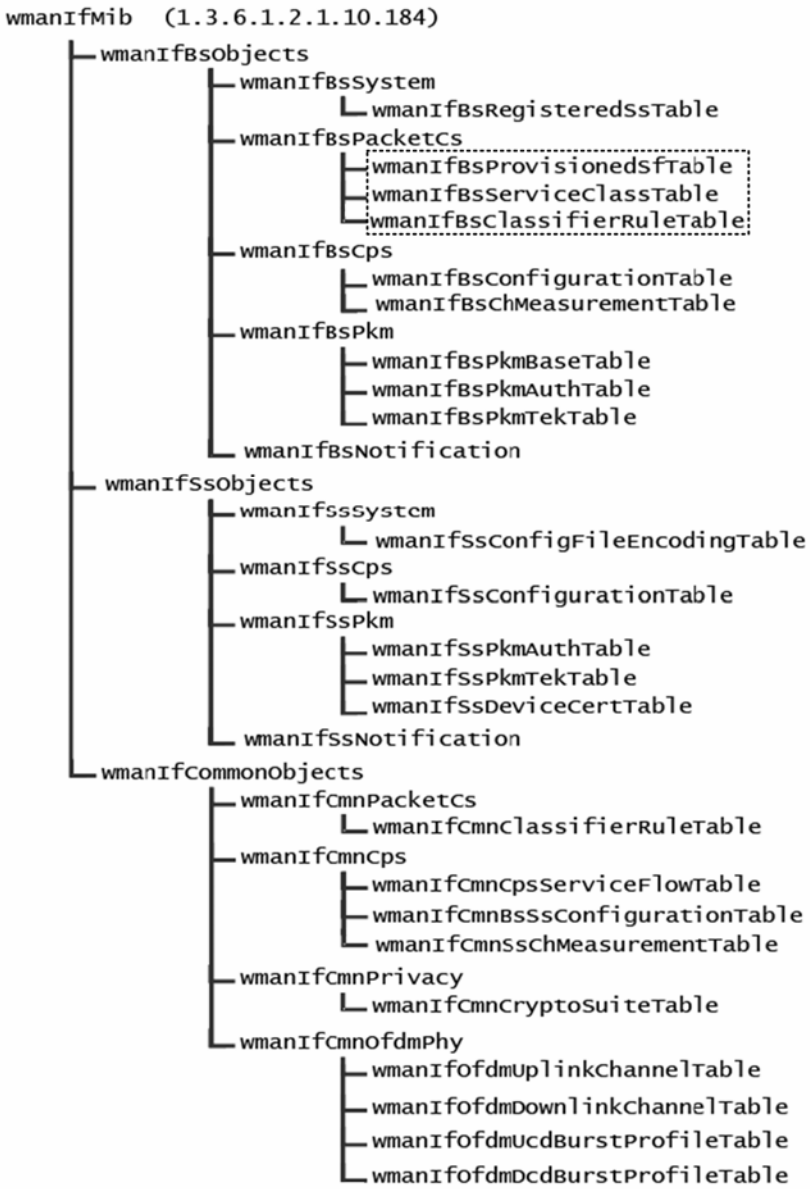

Figura 3.12: Estrutura da MIB do Padrão IEEE 802.16 [24].

As tabelas destacadas no topo da Figura 3.12 oferecem suporte à provisão de QoS para o fluxo de serviço da rede de acesso do Padrão IEEE 802.16. A tabela *wmanIfBsProvisionedSfTable* contém informações relativas ao fluxo de serviço provisionado antecipadamente para ser utilizado na criação de conexões (quando um usuário entra na rede). A tabela *wmanIfBsServiceClassTable* contém os parâmetros de QoS vinculados aos fluxos de serviço. Dentre os principais parâmetros destacam-se: prioridade de tráfego, taxa de pico, tráfego máximo de rajada, taxa mínima reservada, *jitter* máximo tolerado e atraso máximo. A tabela *wmanIfBsClassifierRuleTable* possui as diretrizes para que o classificador faça o mapeamento dos pacotes *downlink* e *uplink* para o fluxo de serviço.

A Figura 3.13 descreve um exemplo de utilização das informações contidas na MIB sobre o fluxo de serviço. As Tabelas A, B e C informam que as SSs com endereços MAC 0x123ab54 e 0x45feda1 têm informações sobre o fluxo de serviço pré-provisionadas.

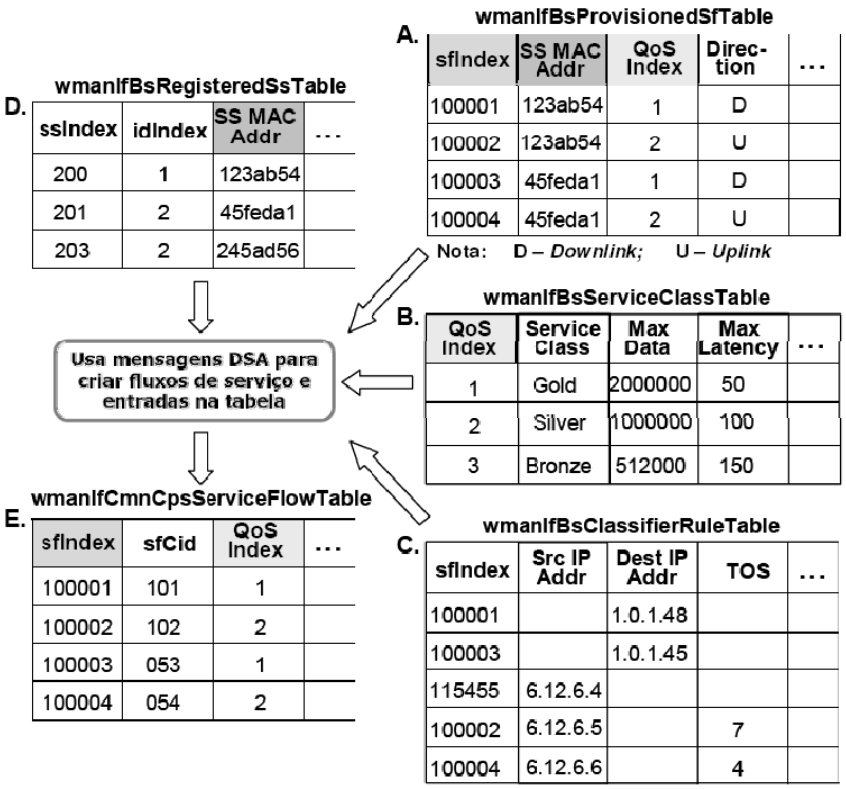

Figura 3.13: Tabelas da MIB no Padrão IEEE 802.16 [21].

As SSs possuem uma dupla de fluxos de serviços, denotados por um *sfIndex* contendo os parâmetros de QoS (*QoSIndex*) identificados pelos valores 1 (*downlink*) e 2 (*uplink*). O campo *QoSIndex* indica que há uma entrada de QoS na Tabela B (*wmanIfBsServiceClassTable*) contendo três categorias de QoS: *Gold*, *Silver* e *Bronze*. O campo *sfIndex* indica uma entrada na Tabela C (*wmanIfBsClassifierRuleTable*) que contém as diretrizes utilizadas na classificação dos pacotes de um determinado fluxo de serviço.

Ao efetuar o registro na BS, a SS (MAC 0x123ab54) gera uma entrada na Tabela D (*wmanIfBsRegisteredTable*). Assim, a BS através do endereço MAC localiza a informação a respeito do fluxo de serviço provisionado antecipadamente nas Tabelas A, B e C e utiliza uma mensagem DSA (*Dynamic Service Addition*) para criar os fluxos de serviço, identificados pelo *sfIndex* 100001 e 100002. Em seguida, são geradas duas entradas na Tabela E (*wmanIfCmnCpsServiceFlowTable*) para que os fluxos de serviço estejam disponíveis para que o usuário envie seu tráfego de dados.

3.4. Disciplinas de Escalonamento

As disciplinas de escalonamento definem a política de classificação e enfileiramento dos pacotes escolhidos para a transmissão na interface de saída da BS ou da SS. No caso das redes de acesso IEEE 802.16, sua implementação é realizada na camada MAC, cujo controle de escalonamento é realizado pela BS.

As Seções 3.4.1, 3.4.2 e 3.4.3 descrevem os mecanismos de escalonamento de fila de prioridades, WRR e WF^2Q, respectivamente.

3.4.1. Fila de Prioridades

Na fila de Prioridades ou PQ (*Priority Queuing)* há diferentes filas para cada classe. Quando os pacotes chegam à BS ou SS passam por uma classificação e são encaminhados a uma fila e tratados conforme sua prioridade. A disciplina de escalonamento PQ serve as filas não vazias de acordo com sua prioridade e transmite os pacotes das classes com maior prioridade em primeiro lugar. Havendo pacotes com mesma prioridade a escolha será realizada através do método FIFO [92].

A disciplina de escalonamento PQ é do tipo não-preemptiva, ou seja, quando um pacote de menor prioridade é transmido ele não é interrompido, caso ocorra a chegada de outro pacote com prioridade maior. Assim, percebe-se um pequeno atraso nos pacotes que esperam na fila para serem servidos, enquanto os pacotes de menor prioridade são transmitidos. A utilização da disciplina PQ é aproveitada quando se deseja ter uma garantia do atraso fim-a-fim máximo a um tipo específico de tráfego.

O evento "inanição" (*starvation*) pode ocorrer na utilização da disciplina PQ, pois havendo pacotes de menor prioridade na fila de espera, estes não poderão ser encaminhados enquanto houver pacotes de maior prioridade. Para evitar este problema, recomenda-se que após efetuar a classificação, o tráfego seja policiado para não permitir que o tráfego prioritário ocupe toda a largura de banda.

3.4.2. *Weighted Round-Robin* (WRR)

A disciplina de escalonamento WRR define várias filas de espera com prioridades distintas, cujos fluxos de serviço são classificados e destinados a uma determinada fila de espera. O tráfego é selecionado de forma rotativa com pesos. De modo que se houver N

conexões com uma fila de peso (φ_i) e tamanho médio dos pacotes em L_i, cuja capacidade do canal equivale a Ω, a fila terá acesso a uma largura de banda (Ψ) [84-85], dada por:

$$\Psi = \frac{\phi_i L_i(\Omega)}{\sum_{i=1}^{i=N} \phi_i L_i} \tag{1}$$

Dessa forma, em contraste com a disciplina de escalonamento RR (*Round-Robin*) que favorece fluxos com pacotes de maior comprimento, o WRR serve a pacotes de tamanho variável sem prejudicar os pacotes de menor tamanho e atribui uma melhor distribuição da largura de banda a cada fila de espera. Contudo, esta disciplina de escalonamento apresenta algumas desvantagens quanto à "justiça" em curtas escalas de tempo com menor prioridade (menor peso) ou quando há um grande número de conexões ativas. Além disso, esta disciplina de escalonamento pressupõe o conhecimento do tamanho médio dos pacotes. Esta informação é imprevisível em algumas situações, devido às características dos dados que trafegam em uma rede de acesso. Dessa forma, nessas situações, esta disciplina de escalonamento impede que o critério *max-min-fairness* seja obedecido [105], impossibilitando uma distribuição equitativa dos recursos na rede de acesso IEEE 802.16.

Assim, caso o ambiente de rede em que será empregada a disciplina de escalonamento WRR não apresente os problemas anteriormente relacionados, poderá oferecer bom desempenho no escalonamento dos pacotes. Além disso, esta disciplina de escalonamento possui facilidade de implementação e apresenta menor sobrecarga de processamento computacional na BS.

3.4.3. *Worst-case Fair Weighted Fair Queueing* (WF^{2}Q)

A disciplina de escalonamento WF^{2}Q desenvolvida por Bennet e Zhang [89] provê serviços de forma análoga à disciplina de escalonamento GPS (*Generalized Processor Sharing*) [90] com diferença máxima equivalente ao tamanho de um pacote em termos de bits

servidos em uma seção. Além disso, Bennet e Zhang provaram que o WF^{2}Q possui as mesmas propriedades de divisão justa no pior caso (*worst-case fairness*) e de atraso máximo (*bounded-delay*) previstas no GPS. Conforme [91], o WF^{2}Q é classificado como uma disciplina de escalonamento com divisão justa e conservativa (*work-conserving fair-share scheduler*). Dessa forma, se houver pacotes aguardando pelo serviço, pelo menos um pacote será servido a cada *slot* de serviço no escalonador.

O WF^{2}Q considera várias conexões, representadas por B_{t_k} e que são servidas concomitantemente no instante t_k. Em cada conexão i atribui-se um peso, designado por ϕ_i que representa a porção de serviço atribuída à conexão i. Tal qual em um GPS, pacotes são servidos em cada conexão a uma taxa instantânea de serviço (r_i), descrita por:

$$r_i = \frac{\phi_i}{\sum_{j \in B_{t_k}} \phi_j} r \tag{2}$$

onde:

ϕ_i e ϕ_j, referem-se ao peso conexão i e j, respectivamente;

r, corresponde à taxa total disponível;

B_{t_k}, representa o número de conexões servidas concomitantemente no tempo t_k.

Temporizações virtuais são utilizadas no WF^{2}Q [90] com o propósito de simular o GPS, cuja escolha da ordem de serviço dos pacotes é selecionada no escalonador. Assim, quando um pacote de comprimento $L^i_{t_k}$ *bits*, pertencente à conexão i, chega ao escalonador no tempo t_k atribui-se um tempo virtual geral (V_{t_k}) denotado por:

$$V_{t_k} = V_{t_{k-1}} + \frac{(t_k - t_{k-1})}{\sum_{j \in B_{t_k}} \phi_j} \tag{3}$$

onde:

$V_{t_{k-1}}$, refere-se ao tempo virtual geral no tempo t_{k-1};

Quando o tempo virtual geral é atualizado, calcula-se o tempo virtual de início de serviço ($S_{t_k}^i$) e o tempo virtual de final de serviço ($F_{t_k}^i$). As temporizações virtuais de início de serviço ($S_{t_k}^i$) e de final de serviço ($F_{t_k}^i$) são calculadas conforme a expressão:

$$S_{t_k}^i = max\{F_{k-1}^i, V_{t_k}\} \tag{4}$$

e

$$F_k^i = S_{t_k}^i + \frac{L_{t_k}^i}{\phi_i} \tag{6}$$

onde:

$F_{t_k-1}^i$, corresponde ao tempo virtual de final de serviço anterior.

A ordem de atendimento dos pacotes está relacionada à temporização virtual de início e de final de serviço. Assim, serve-se primeiramente o pacote com menor tempo virtual de final de serviço ($F_{t_k}^i$), cujo tempo virtual de início de serviço ($S_{t_k}^i$) apresente menor valor do que o tempo de serviço do pacote. O tempo de serviço (t_s) equivale ao tempo real de atendimento do pacote no escalonador. Portanto, o WF^2Q pertence ao método de menor tempo virtual de final de serviço elegível primeiro ou SEFF (*Smallest Eligible virtual Finish time First*) que escolhe dentre os pacotes elegíveis ($S_{t_k}^i < t_s$) aquele com menor valor de tempo virtual de final de serviço ($F_{t_k}^i$).

3.5. Escalonamento no Padrão IEEE 802.16

Um fluxo de serviço com os parâmetros de QoS é gerado quando uma requisição de conexão é concedida. O escalonamento de serviços é manipulado por mecanismos de suporte ao escalonador localizado na camada MAC e atua no transporte de dados em uma conexão. A

BS controla o escalonamento no sentido *downlink* e *uplink*, conforme ilustrado na Figura 3.14, cujo método é similar à referência [30].

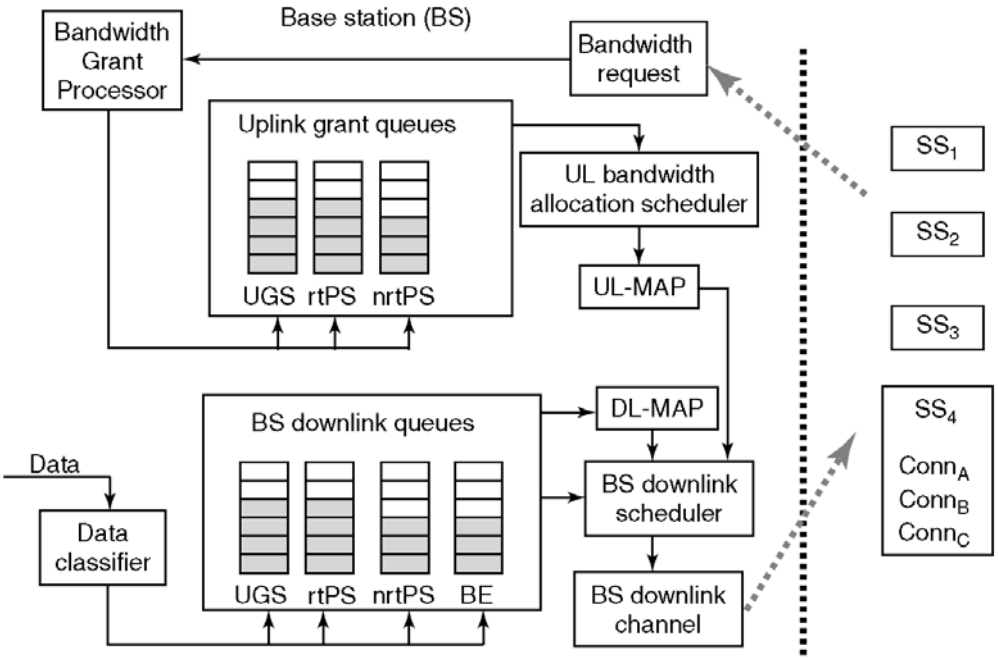

Figura 3.14: Provisão do Fluxo de Serviço no Padrão IEEE 802.16 [21].

O escalonador calcula os requisitos de atraso e vazão para o tráfego *downlink* e *uplink* e provê as concessões e *polls* em intervalos de tempos adequadamente. O tráfego *downlink* é realizado através de *broadcast*, onde o escalonador monta e enfileira as rajadas de acordo com os parâmetros de QoS dos quadros. O escalonamento no sentido *uplink* utiliza um esquema de concessão e *polls* mais complexo do que o anterior, pois exige coordenação entre a BS e cada SS individualmente.

3.6. Conclusão

Neste capítulo foram descritos aspectos relativos à QoS nas redes de acesso IEEE 802.16. Apresentou-se o modelo de objetos, as classes e fluxos de serviço, bem como os

procedimentos de classificação destes fluxos de serviço. Também foram apresentados os mecanismos de requisição e alocação de largura de banda e a MIB do Padrão IEEE 802.16.

Um dos aspectos mais relevantes no suporte à QoS das redes IEEE 802.16 está relacionado ao escalonamento dos serviços, questão que está em aberto para soluções e implementações de pesquisadores na área de redes BWA e fabricantes de equipamentos. Assim, com o intuito de fundamentar a proposta constante no próximo capítulo, foram apresentadas algumas disciplinas de escalonamento que fazem parte do método de trabalho conservativo: WRR e WF^2Q que serão utilizadas na proposta desta dissertação.

Capítulo 4

PROPOSTA DE MECANISMOS DE ESCALONAMENTO BASEADOS EM WRR E WF^2Q PARA REDES DE ACESSO IEEE 802.16

4.1. Introdução

O Padrão IEEE 802.16 não define um mecanismo específico para o escalonamento dos fluxos de serviço nas redes de acesso IEEE 802.16. Assim, neste capítulo apresenta-se uma proposta de utilização de mecanismos de escalonamento baseados em WRR e WF^2Q.

A Seção 4.2 descreve o problema abordado. A Seção 4.3 discute a solução e os objetivos dos mecanismos de escalonamento propostos. A Seção 4.4 apresenta os trabalhos relacionados e a Seção 4.5 contempla as conclusões deste capítulo.

4.2. Descrição do Problema

O padrão que define a tecnologia das redes de acesso IEEE 802.16 não determina a forma como devem ser escalonados os pacotes ou os fluxos de serviço nestas redes de acesso. Dessa maneira, soluções de suporte à provisão de QoS, concernentes ao escalonamento nessas redes, constituem amplo espaço de pesquisa científica em redes BWA.

Portanto, torna-se necessário selecionar e avaliar mecanismos de escalonamento eficientes na camada MAC do Padrão IEEE 802.16, para que se obtenha um desempenho otimizado no suporte à provisão de QoS com a classificação adequada dos pacotes ou fluxos de serviço, conforme as necessidades dos usuários ou requisitos das aplicações utilizadas na rede de acesso IEEE 802.16. Além disso, aspectos relativos às características da rede de acesso devem ser considerados na escolha do mecanismo de escalonamento que melhor se adapte às condições desses ambientes de rede.

4.3. Solução Proposta

A partir de um extenso levantamento bibliográfico [27, 37, 40, 41, 44, 58-65, 71-73, 75-79, 81-83], verificou-se que a maioria dos trabalhos descritos na literatura não faz um estudo comparativo das disciplinas de escalonamento utilizadas para classificar e servir os pacotes e/ou fluxos de serviço na camada MAC do padrão IEEE 802.16. Dentre os mecanismos de escalonamento estudados, foram considerados os mecanismos WRR e WF^2Q que se destacam na literatura pela eficiência e pela distribuição adequada dos recursos em redes de acesso IEEE 802.16. Dessa forma, propõe-se nesta dissertação um estudo comparativo do desempenho destes mecanismos no suporte à provisão de QoS no sentido *downlink* de um ambiente de rede IEEE 802.16 PMP, tipicamente brasileiro, caracterizado pelos diversos requisitos das aplicações de dados, voz e vídeo e pela dispersão geográfica das estações.

Nesse sentido, a literatura [30, 105] aponta que o mecanismo WRR apresenta menor custo computacional e bom desempenho, desde que se conheça previamente o tamanho médio dos pacotes e não ocorram curtas escalas de tempo com prioridade mais baixa e/ou a rede de acesso não apresente um grande número de conexões ativas. Dessa forma, levando-se em consideração estas características, o mecanismo de escalonamento WRR atenderá ao critério *max-min-fairness*, permitindo uma distribuição equitativa dos recursos na rede de acesso.

Todavia, a literatura [105] revela que o conhecimento prévio do tamanho médio dos pacotes pode ser imprevisível. Assim, o mecanismo de escalonamento WF^2Q não necessita conhecer previamente o tamanho médio destes pacotes, embora apresente maior complexidade do que o anterior, mesmo ocorrendo curtas escalas de tempo com baixa prioridade e um grande número de conexões ativas, esse mecanismo atenderá ao critério *max-min-fairness* na rede de acesso IEEE 802.16.

Portanto, a escolha do mecanismo de escalonamento estará vinculada a fatores como características dos tráfegos que transitam na rede de acesso, bem como o número e ciclos de conexões ativas ou ainda o tamanho médio dos pacotes que trafegam na rede. Assim, diferentemente dos trabalhos descritos na literatura, os quais não realizam uma comparação entre estes dois mecanismos de escalonamento, o trabalho aqui apresentado, com base no desempenho observado na literatura, tanto para a disciplina de escalonamento WRR quanto para a disciplina WF^2Q, propõe um estudo comparativo do desempenho destes mecanismos na provisão de suporte à QoS na rede de acesso. Este estudo comparativo será realizado através de modelagem e simulação em uma rede de acesso IEEE 802.16 PMP, no sentido *downlink* com diversos requisitos de QoS para os tráfegos de dados, voz e vídeo.

4.3.1. Descrição dos Mecanismos de Escalonamento Propostos

O funcionamento dos mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q que representam a modelagem utilizada nesta dissertação obedece ao descrito na Seção 3.4.3 e 3.4.4, respectivamente.

O mecanismo de escalonamento WRR classifica pacotes e/ou fluxos de serviço e os encaminha para uma determinada fila de espera, a qual possui uma prioridade de acesso aos recursos da rede de acesso IEEE 802.16. Assim, para cada classe de serviço há uma prioridade de acesso que é servida rotativamente, conforme o peso atribuído à fila de espera.

O mecanismo de escalonamento WF^{2}Q proposto neste trabalho obedece ao esquema da Figura 4.1.

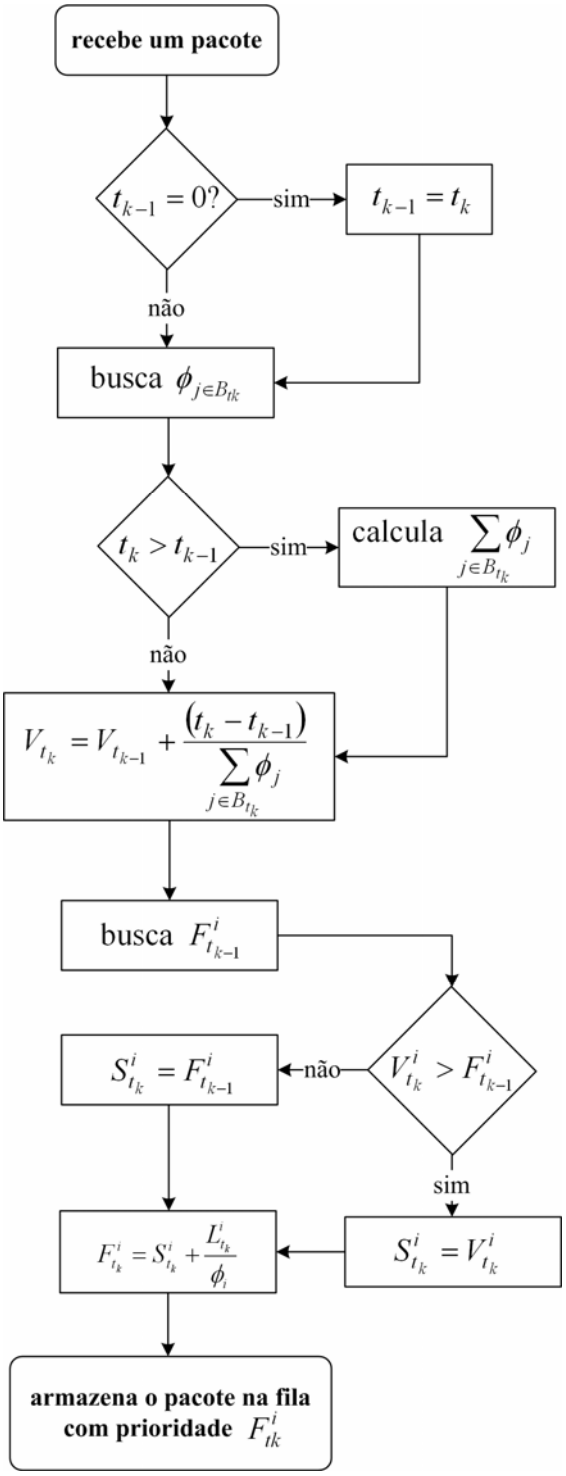

Figura 4.1: Esquema de escalonamento proposto para a disciplina WF^{2}Q [87].

Conforme pode ser observado, o mecanismo WF^{2}Q proposto verifica o tempo de chegada do pacote ao escalonador e aplica o peso correspondente ao mesmo, denotado por ϕ_j,

pertencente a uma dada conexão, representada por B_{t_k} e calcula o somatório dos pesos das conexões ativas que estão sendo atendidas no escalonador, através da expressão $\sum_{j \in B_{t_k}} \phi_j$. O próximo passo consiste em calcular os tempos virtuais geral, inicial e final de serviço, representados por V_{t_k}, $S_{t_k}^i$ e $F_{t_k}^i$, respectivamente.

4.4. Trabalhos Relacionados

Os autores em [58] propõem um algoritmo de escalonamento com base no endereçamento com capacidade de prover o controle das conexões e o nível de QoS em diversas condições do canal de uma rede de acesso IEEE 802.16 PMP. Esta solução embora seja aplicada sobre um ambiente de rede PMP, tal qual no Capítulo 5 deste trabalho, não compara a utilização da proposta com outras disciplinas de escalonamento. Além disso, os parâmetros de QoS foram mensurados na camada física, inviabilizando uma análise de QoS mais ampla, tal qual a proposta deste trabalho que colheu as informações dos parâmetros de QoS no SAP da camada MAC do Padrão IEEE 802.16.

Em [59, 64] são analisados mecanismos para o suporte à QoS em redes IEEE 802.16 PMP apenas nomádicas e consideram o escalonamento DRR (*Deficit Round-Robin*) no sentido *downlink* e WRR no sentido *uplink*. As simulações mostram que conforme se aumenta a carga de tráfego e o número de SSs, diminui-se a vazão no sentido *uplink*. Embora, estes algoritmos façam parte do método conservativo, constituem uma variação do mecanismo de escalonamento RR. Essas disciplinas de escalonamento não oferecem "justiça", tal qual o mecanismo WF^2Q proposto no presente trabalho. No sentido *downlink*, o DRR acumula déficits que são acrescidos nos *quanta* das próximas rodadas. Este mecanismo não provê limites de atraso rígidos, de modo que em situações de intensa carga de tráfego submetida à

rede de acesso, poderá implicar em degradação nos níveis de QoS em aplicações sensíveis a atrasos, tais como as aplicações multimídia em tempo real.

As referências [60, 63] propõem soluções para o escalonamento na rede de acesso IEEE 802.16 PMP baseada na disciplina de escalonamento RR, cuja rapidez e facilidade de implementação são destacadas. Esta solução introduz parâmetros nas conexões, tais como requisito máximo e mínimo de largura de banda, prioridade de tráfego, tipo de classe, requisição de largura de banda ou tamanho de fila. Além disso, a proposta mostra como alocar *slots* livres entre as conexões e como controlar o valor máximo de *jitter*. A solução supracitada não foi comparada com outras disciplinas de escalonamento, a fim de verificar o desempenho da solução proposta. Embora tenha incorporado alguns atributos para melhorar a questão de "justiça" no mecanismo de escalonamento RR, em situações de intensa carga de tráfego submetida à rede de acesso não poderá oferecer suporte à provisão de QoS de maneira eficiente, como se comprava na literatura com mecanismos baseados em GPS, tal qual o mecanismo WF^2Q proposto no presente trabalho.

Em [61] os autores propõem um algoritmo de escalonamento no sentido *downlink* com garantias de QoS com base em classes e fluxos de tráfego. A disciplina de escalonamento escolhida foi a WF^2Q com adição de técnicas de compensação de erro no canal baseada no fluxo. O algoritmo de escalonamento proposto tem o objetivo de preservar a diferenciação de QoS e a justiça no tráfego *downlink*. Embora os autores tenham utilizado a melhor opção para a aproximação de um escalonador GPS, que é o WF^2Q, apenas foram empregadas 5 SSs no ambiente simulado com distâncias menores que 500 m. Esta dissertação utiliza 15 SSs com distâncias da BS às SSs que variam de 500 m a 20 km. Além disso, os autores não realizaram um estudo comparativo com outras disciplinas de escalonamento. Pois, devido às dimensões modestas do ambiente de rede simulado, em termos de quantidade de SSs e distâncias destas à BS, poderia também ser utilizada uma disciplina de escalonamento menos robusta do que a

WF^2Q para analisar o custo de processamento computacional na BS e dificuldade de implementação, tal qual foi avaliado o mecanismo de escalonamento WRR no Capítulo 5 do presente trabalho.

Em [62] os autores analisam a vazão e atraso na camada MAC de uma rede de acesso PMP com a implementação da disciplina de escalonamento WRR, cujos pesos são calculados automaticamente, conforme a demanda pela banda. Contudo, este trabalho não faz comparação do desempenho do mecanismo de escalonamento WRR com outras disciplinas de escalonamento. Além disso, os autores simularam uma rede de acesso IEEE 802.16 PMP com uma dimensão de 1000m x 1000m, diferentemente do trabalho aqui apresentado que propõe um cenário WMAN com dimensão de 20 km x 20 km. Os autores também não realizaram uma análise do parâmetro de QoS: *jitter*, para os tráfegos multimídia, tal qual no presente trabalho.

Em [74] os autores propõem uma técnica de alocação de pacotes para otimizar a distribuição do tráfego em redes sem fio com múltiplos acessos de rádio (RAs), cujo foco principal é sobre a agregação do enlace com a coexistência de redes WiMAX e Wi-Fi. A disciplina de escalonamento WRR é comparada com o esquema de alocação dinâmica de pacotes que se adapta às condições da taxa de distribuição do tráfego. A solução é comparada com a disciplina de escalonamento WRR e não com uma disciplina que simula um escalonador GPS, como o WF^2Q, tal qual fora realizado no presente trabalho. Além disso, o ambiente de rede simulado é muito simples. Os autores empregaram na simulação apenas uma BS atendendo a uma célula com uma SS, mantendo conexão com um *host* Wi-Fi. O tráfego é modelado a partir de uma fonte com uma distribuição uniforme, cujos pacotes variam entre 64 e 1460 bytes. Nesta dissertação modelam-se todas as fontes de tráfego possíveis em uma rede de acesso IEEE 802.16, com as classes de tráfego: BE, nrtPS, ertPS, rtPS e UGS.

Em [82] os autores propõem uma arquitetura de Qos para redes de acesso IEEE 802.16. A arquitetura proposta provê suporte à QoS para o tráfego em tempo real com alta prioridade, enquanto que para o tráfego de menor prioridade preserva níveis aceitáveis de vazão. A proposta da arquitetura de QoS prevê a utilização de policiamento do controle de admissão e alocação de banda no sentido *uplink*, cujas classes de serviço UGS e rtPS têm maior prioridade de acesso à largura de banda, enquanto que as classes nrtPS e BE disputam pelos recursos restantes. Apesar de ser uma das primeiras soluções para a questão do escalonamento em redes IEEE 802.16, esta não simula o sentido *downlink*, tal qual o presente trabalho que visa atender a redes de acesso em ambientes que não dispõem de infra-estrutura de rede convencional, como é o caso de algumas áreas rurais e/ou suburbanas brasileiras. Além disso, não compara o mecanismo de escalonamento com outros métodos, a fim de avaliar o desempenho da solução proposta, tal como fora realizado no presente trabalho que avaliou duas disciplinas de escalonamento do método conservativo.

As propostas de mecanismos de escalonamento em [65-80] são semelhantes, pois utilizam esquemas escalonamento híbridos. A maioria das propostas de escalonamento híbridas, como em [69-71] que utilizam o DFPQ, composto por disciplinas de escalonamento EDF para a classe de serviço rtPS, WFQ para a classe de serviço nrtPS e RR para a classe de serviço BE. Outros trabalhos, como em [72-73], atribuem à classe de serviço UGS largura de banda fixa. Em [76] o esquema de escalonamento também reserva largura de banda fixa à classe UGS e aplica a disciplina de escalonamento WRR às classes rtPS e nrtPS e à classe BE, utiliza-se a disciplina RR. Os resultados apresentados por estas estratégias de escalonamento proporcionam elevado desempenho quando combinadas com disciplinas de escalonamento pertencentes ao método de trabalho conservativo. Porém, estas soluções não contemplam a melhor opção para modelagem de um escalonador GPS, ou seja, não utilizam a disciplina de escalonamento WF^2Q nos escalonamentos híbridos.

A maioria dos trabalhos relacionados, constantes desta seção não realiza um estudo comparativo das disciplinas de escalonamento para classificar e servir os pacotes na camada MAC do Padrão IEEE 802.16. Nesta dissertação, ao contrário, consideram-se dois mecanismos de escalonamento amplamente destacados na literatura, WRR e WF^2Q, e apresenta-se uma comparação do desempenho dos mesmos. Além disso, avalia-se a utilização destes mecanismos em função das condições e características do ambiente de rede em que serão empregados.

Logo, a escolha de algum dos mecanismos propostos acima está vinculada às condições e características da rede, tais como quantidade de SSs e conexões ativas, além da intensidade da carga de tráfego submetida à rede de acesso. Em condições críticas podem ocorrer congestionamentos, levando à degradação dos níveis de QoS nesta rede. Assim, o mecanismo WF^2Q tem a tendência de preservar estes níveis nas classes de serviço com maior e menor prioridade. Assim, este mecanismo atende ao critério *max-min-fairness*, aplicando maior "justiça" aos pacotes escalonados. Todavia, o mecanismo WRR em condições críticas, tende a apresentar maior degradação dos níveis de QoS, tanto nas classes prioritárias, quanto naquelas com menor prioridade.

4.5. Conclusão

Neste capítulo apresentou-se o problema do suporte à QoS através de mecanismos de escalonamento que possam garantir os requisitos das aplicações de dados e multimídia em uma rede de acesso IEEE 802.16. Para isso, foi apresentada uma proposta de suporte à provisão de QoS, mediante a utilização de mecanismos de escalonamento baseados em trabalho conservativo: WRR e WF^2Q que são capazes de oferecer suporte à provisão de QoS em redes de acesso IEEE 802.16. Foram descritos o funcionamento dos mecanismos de

escalonamento propostos, características e contribuições presentes neste trabalho, bem como os trabalhos relacionados com os mecanismos propostos.

O levantamento bibliográfico realizado permitiu concluir que as disciplinas de escalonamento WRR e WF^2Q permitem suporte à provisão de QoS com relação ao escalonamento dos fluxos de serviço e à dinâmica dos cenários das redes de acesso IEEE 802.16. Também foi observado que há uma tendência em utilizar mecanismos de escalonamento híbridos, sob a forma de estratégias de escalonamento nessas redes.

No próximo capítulo será realizado um estudo comparativo do desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos, através de modelagem e simulação no sentido *downlink* de uma rede de acesso IEEE 802.16 PMP. Esta rede de acesso é caracterizada pelos diversos requisitos das aplicações de dados, voz e vídeo e pela dispersão geográfica das estações, num ambiente de rede carente de infra-estrutura e de difícil acesso, como é o caso de algumas áreas suburbanas e rurais tipicamente brasileiras.

Capítulo 5

AVALIAÇÃO DOS MECANISMOS PROPOSTOS PARA A PROVISÃO DE QoS NAS REDES DE ACESSO IEEE 802.16

5.1. Introdução

Neste capítulo compara-se por meio de modelagem e simulação o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos. Para isso, considera-se um cenário de rede típico de regiões suburbanas e rurais brasileiras desprovidas de outros recursos de rede acesso.

Na Seção 5.2 discute-se a avaliação de desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos. Na Seção 5.3 descreve-se o ambiente de rede, os parâmetros de simulação utilizados, bem como as características das fontes de tráfego. Os resultados de simulação para os parâmetros de QoS: atraso, *jitter* e vazão serão analisados e comparados com a utilização das disciplinas de escalonamento WRR e WF^2Q na Seção 5.4. Finalmente, a Seção 5.5 contempla as conclusões deste capítulo.

5.2. Estudo Comparativo dos Mecanismos de Escalonamento WRR e WF^2Q

A avaliação dos mecanismos de escalonamento propostos no Capítulo 4 será realizada através de modelagem e simulação. Assim, realizou-se neste trabalho um estudo comparativo do desempenho das disciplinas de escalonamento WRR e WF^2Q utilizadas no sentido *downlink* de uma rede de acesso IEEE 802.16 PMP.

5.2.1. Modelagem e Simulação de uma Rede de Acesso IEEE 802.16 PMP

Neste estudo, por meio de modelagem e simulação, pretende-se avaliar o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos no Capítulo 4, tendo em vista o suporte à provisão de QoS em uma rede de acesso IEEE 802.16 PMP no sentido *downlink*.

A ferramenta de simulação NS-2 [93] foi utilizada no estudo de desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos com a inserção do módulo WiMAX [62, 94] desenvolvido pelo NDSL (*Networks & Distributed Systems Laboratory*), cujo código foi modificado com o intuito de utilizar a disciplina de escalonamento WF^2Q com base em informações da literatura e nos algoritmos descritos em [61, 87-91]. A Figura 5.1 ilustra a relação entre o módulo desenvolvido para simular uma rede de acesso do Padrão IEEE 802.16 e o NS-2. No topo desta figura está o Agente Gerador de Tráfego (TGA – *Traffic Generating Agent*), seguido da camada de enlace (LL – *Link Layer*), da interface de fila (IFQ – *Interface Queue*), da camada de controle de acesso ao meio (MAC) e da camada física (*Channel*).

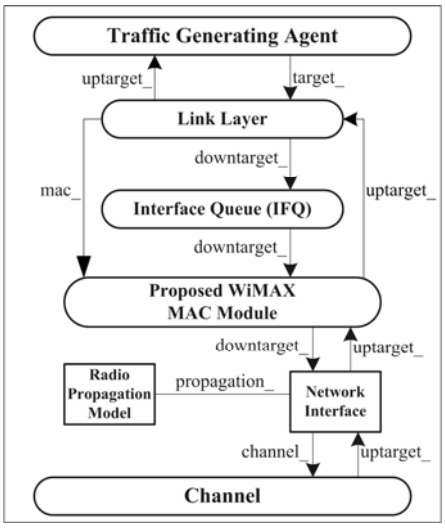

Figura 5.1: Relação entre o NS-2 [93] e o módulo WiMAX [62, 94].

5.3. Ambiente de Rede e Parâmetros de Simulação

O TGA foi utilizado para modelar as camadas superiores, sendo que na camada de aplicação considera-se o tráfego gerado pelas aplicações *web*, transferência de arquivos, VoIP e fluxo contínuo (*streaming*) de áudio ou vídeo. O tráfego gerado pelas aplicações concorrentes está caracterizado na Tabela 5.1. Os parâmetros de simulação concernentes à camada MAC e física estão descritos na Tabela 5.2. Para fins de análise do padrão IEEE 802.16 em termos de provisão de QoS, considerou-se um cenário com diferentes condições de tráfego na direção *downlink*, ou seja, o tráfego flui da BS com destino às SSs.

Tabela 5.1. Parâmetros de simulação dos agentes geradores de tráfego [62, 94].

Tráfego	Classe de Serviço	Taxa de Envio (kbps)		Tamanho dos pacotes (bytes)	Intervalo de envio (s)
		Mínima	Máxima		
UDP	UGS	64	64	200	t
	rtPS	512	1024	(200, 1000)*	t + (-0,5, 0,5)*
	ertPS	8	64	200	t
TCP	nrtPS	512	1024	(200, 1000)*	0,01
	BE	–	1024	(200, 1000)*	0,01

* distribuição uniforme;
t = 0,025.

Tabela 5.2. Parâmetros de simulação das camadas MAC e Física [62, 94].			
Camada MAC		Camada Física	
Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
Taxa DL/UL	3:2	Freqüência de operação	5,0 GHz
Número de símbolos OFDMA/quadro	49	Largura de banda (BW)	20 MHz
Número de subcanais	30	64 QAM ¾	-63 dBm
$CW_{mín}$	32 opps	16 QAM ¾	-69 dBm
CW_{max}	1024 opps	QPSK ¾	-76 dBm

No cenário de rede de acesso sem fio ilustrado na Figura 5.2, a BS ocupa o ponto central e, ao seu redor há 15 SSs distribuídas aleatoriamente. Considera-se um tempo de simulação de 50 segundos e um ambiente de rede limitado a uma área de 40 km x 40 km. As SSs estão circunscritas sob as modulações 64 QAM, 16 QAM e QPSK. Neste cenário representa-se um ambiente de rede dinâmico, caracterizado pela dispersão das estações dos assinantes, tal qual em áreas rurais e/ou suburbanas brasileiras.

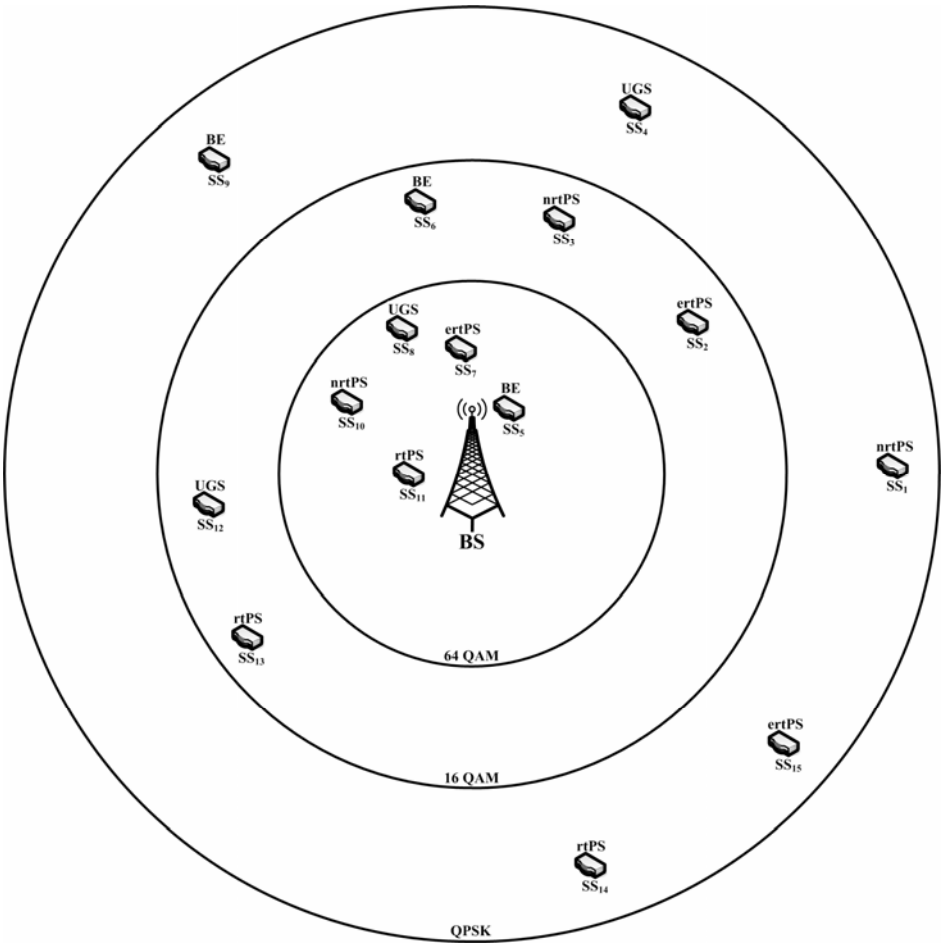

Figura 5.2: Ambiente de simulação de uma rede de acesso IEEE 802.16 PMP.

O tipo de antena modelada na simulação é a omnidirecional e o modelo de propagação utilizado é o de dois raios. A operação é no modo PMP, o que significa que a BS pode atender a múltiplas SSs móveis concorrentemente. O tipo de gerenciamento de fila adotado na simulação é o *DropTail*, as disciplinas de escalonamento utilizadas são WRR e WF^2Q cujas classes têm a seguinte ordem de prioridade: UGS > rtPS > ertPS > nrtPS > BE, com tamanho máximo de 50 pacotes presentes na fila. O protocolo de roteamento utilizado é o NOAH (*No Ad-Hoc routing agent*) [95]. O agente de roteamento NOAH implementado no NS-2 não gera mensagens de descoberta de rota e não promove o roteamento de pacotes, permite apenas a comunicação direta entre estações e não admite múltiplos saltos, característica própria das redes infra-estruturadas. A escolha deste agente de roteamento foi estimulada pelas condições que se aproximam da topologia PMP das redes de acesso IEEE 802.16. A multiplexação OFDMA foi considerada neste estudo. Os pesos (ϕ_i) atribuídos aos fluxos nas disciplinas de escalonamento WRR e WF^2Q são os seguintes: 0,25 para BE; 0,50 para nrtPS; 0,60 para ertPS; 0,70 para rtPS e 0,90 para a classe de serviço UGS.

5.4. Apresentação e Análise dos Resultados

Na simulação são considerados três fluxos de cada classe de tráfego (UGS, rtPS, ertPS, nrtPS e BE), sendo que cada conjunto de fluxos ficou circunscrito em uma técnica de modulação. Dessa forma, para cada modulação descrita na Figura 5.2 há cinco classes de tráfego do Padrão IEEE 802.16. As classes de tráfego UGS e ertPS são do tipo CBR, já as classes rtPS, nrtPS e BE contém taxa variável de bits (VBR). O ambiente de rede foi simulado utilizando os mecanismos de escalonamento propostos. Inicialmente, utilizou-se a disciplina de escalonamento WRR. Posteriormente, a disciplina de escalonamento WF^2Q foi utilizada sob as mesmas características definidas no ambiente simulado. O objetivo é comparar o

desempenho das disciplinas de escalonamento WRR e WF^2Q com relação aos parâmetros de QoS: atraso médio, *jitter* médio e vazão média no sentido *downlink* da rede de acesso acima descrita.

Os resultados de simulação foram manipulados através de programação em *script* AWK (Aho, Weinberger and Kernighan) [96] utilizando os algoritmos para o cálculo dos parâmetros de QoS, disponíveis em [97]. Estes resultados foram coletados no SAP da camada MAC do Padrão IEEE 802.16.

Além disso, a linguagem AWK auxiliou na correção de alguns erros de código no módulo WiMAX [62, 94] utilizado na simulação, os quais foram detectados no decorrer deste trabalho. Um dos erros encontrados relaciona-se à identificação única dos pacotes ou UID (*Unique packet ID*), a qual é aplicada aos pacotes na fonte por meio de um código, mas estes chegavam ao destino com a identificação nula. Outro erro constatado no código do módulo WiMAX vinculou-se ao tamanho dos pacotes que deixavam a fonte com um determinado comprimento e passavam por um processo de fragmentação na camada MAC, resultando em fragmentos com 108 bytes de comprimento, mas chegavam ao destino sem a remontagem, ou seja, os pacotes entregues possuíam 108 bytes. Dessa forma, os *scripts* AWK auxiliaram na correção destes erros e no cálculo dos parâmetros de QoS, como atraso médio, *jitter* médio e vazão média.

Descartes de pacotes não foram observados neste estudo, devido às características da tecnologia da rede de acesso IEEE 802.16 PMP, uma vez que esta apresenta um canal de alta capacidade, cujas perdas são mínimas ou inexistentes.

A ferramenta Gnuplot [98] também foi utilizada na manipulação dos resultados, sobretudo na geração dos gráficos que serão apresentados nas Figuras 5.3 a 5.17.

O tempo de simulação no cenário da Seção 5.3 foi de cinqüenta segundos (50 s). Esta configuração permite avaliar todos os tráfegos concorrentes, permitindo uma análise

comparativa do desempenho dos parâmetros de QoS, ilustrados pelas Figuras 5.3 a 5.17 com a utilização dos mecanismos de escalonamento propostos.

A Figura 5.3 descreve o comportamento do atraso médio (em milissegundos) para a classe de tráfego BE e compara o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos. Sendo que para a disciplina WRR esta classe de tráfego experimentou um atraso médio de aproximadamente 2,84 s enquanto que para a disciplina WF^2Q o atraso médio ficou em torno de 2,74 s. Em ambos os mecanismos, observa-se que o atraso médio cresce à medida que se aumenta a carga de tráfego, pois a classe BE tem o menor peso (ϕ_i) nos fluxos de serviço e menor prioridade de acesso aos recursos da rede. Todavia, esta classe produziu bom desempenho, dentro dos limites aceitáveis, conforme descrito em [99] para aplicações elásticas como *web* e correio eletrônico.

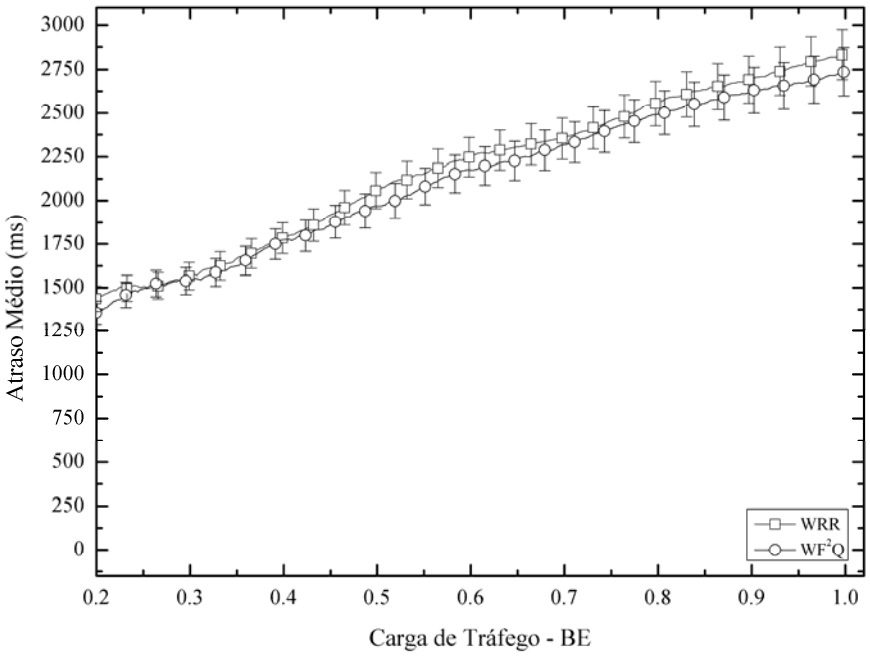

Figura 5.3: Atraso médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego BE.

A Figura 5.4 apresenta o comportamento do *jitter* médio (em milissegundos) para a classe de tráfego BE e compara o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos.

O mecanismo WRR, nesta classe de tráfego gerou um *jitter* médio de 833 ms, aproximadamente. O mecanismo WF^2Q produziu um *jitter* médio próximo a 825 ms. Tal qual foi constatado no atraso médio, nos dois mecanismos propostos, o *jitter* médio cresce à medida que se aumenta a carga de tráfego, pois a classe BE tendo o menor peso (ϕ_i) e menor prioridade de acesso, disputa pelas sobras de recursos da rede. Contudo, esta classe conduziu a um bom desempenho, embora não ocorra impacto do *jitter* médio sobre QoS na maioria das aplicações empregadas na classe BE [99-101].

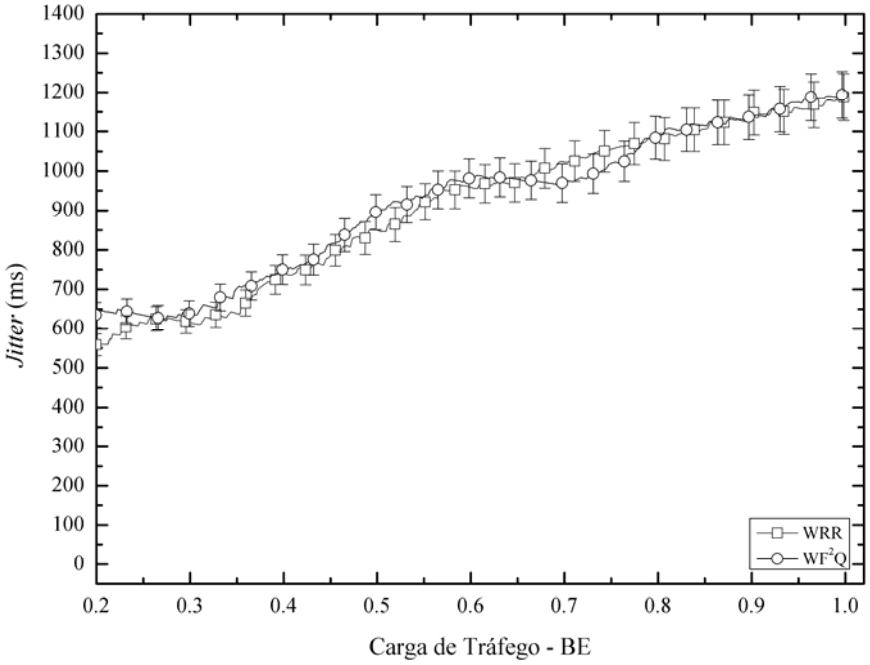

Figura 5.4: *Jitter* médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego BE.

A Figura 5.5 ilustra o comportamento da vazão média (em kbps) para a classe de tráfego BE e compara o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos. Sendo que para a disciplina WRR esta classe de tráfego produziu uma vazão média de aproximadamente 21 kbps enquanto que para a disciplina WF^2Q a vazão média ficou próxima a 39 kbps. Nos dois mecanismos propostos, a vazão média decresce inicialmente em função do aumento da carga de tráfego e estabiliza-se a partir da metade do total da intensidade da carga de tráfego. Este

comportamento é esperado, pois a classe BE tendo o menor peso (ϕ_i) nos fluxos de serviço e menor prioridade de acesso, disputa pelas sobras de recursos da rede. Todavia, esta classe produziu bom desempenho de vazão para aplicações elásticas como *web* e correio eletrônico.

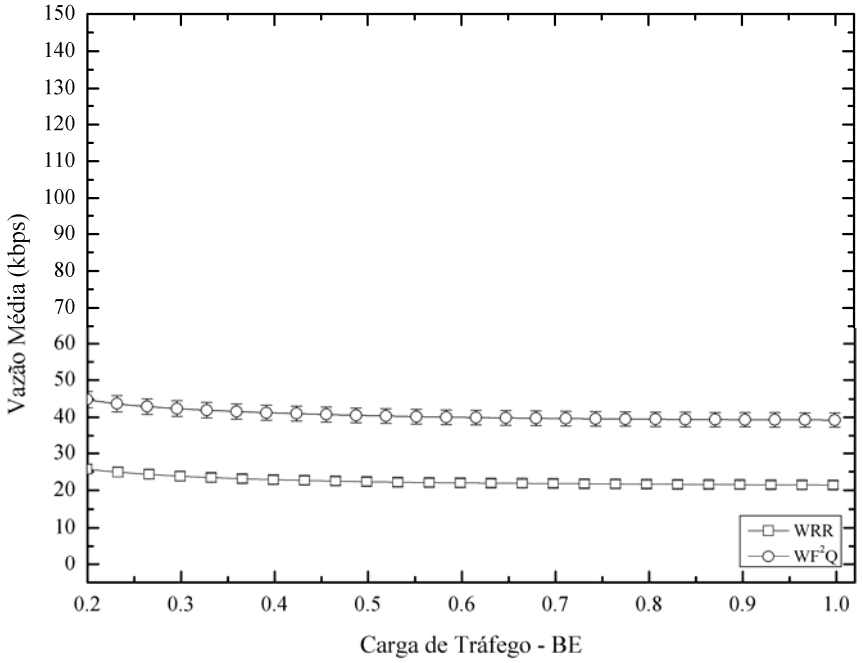

Figura 5.5: Vazão média (kbps), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego BE.

A Figura 5.6 descreve o comportamento do atraso médio (em milissegundos) para a classe de tráfego ertPS e compara o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos. Conforme pode ser observado, para esta classe de tráfego a disciplina WRR permitiu obter um atraso médio de aproximadamente 21 ms, enquanto que para a disciplina WF^2Q o atraso médio ficou em torno de 17 ms. No mecanismo de escalonamento WRR, o atraso médio aumenta a partir da metade do total da intensidade da carga de tráfego e no escalonamento WF^2Q a tendência é de estabilizar-se em torno de 17 ms. Este comportamento ocorre devido ao tratamento que a disciplina WF^2Q atribui à classe ertPS, pois utiliza o método SEFF com o cálculo dos tempos virtuais de final de serviço impeliu a um desempenho melhor do que a disciplina WRR. Portanto, o mecanismo WF^2Q proposto

contribui para um melhor desempenho para o tráfego em tempo real, conforme recomendações em [99-101].

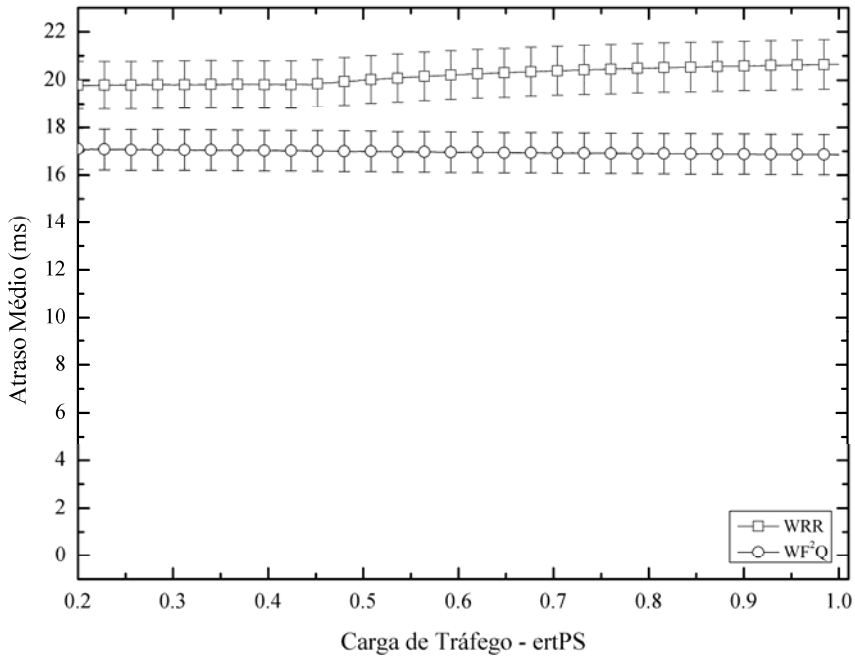

Figura 5.6: Atraso médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego ertPS.

A Figura 5.7 apresenta o comportamento do *jitter* médio (em milissegundos) para a classe de tráfego ertPS e compara o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos. Com a disciplina de escalonamento WRR, nesta classe de tráfego verificou-se um *jitter* de 12,6 ms, enquanto que na utilização da disciplina WF^2Q o *jitter* médio estabilizou-se em torno de 12,5 ms. Nos dois mecanismos propostos, o *jitter* se manteve constante ao longo dos 50 segundos de simulação. Tal comportamento permite concluir que ambas as disciplinas permitiram obter um bom desempenho para aplicações em tempo real, dentro dos limites estabelecidos em [99-101], tanto para o mecanismo de escalonamento WRR quanto para o WF^2Q.

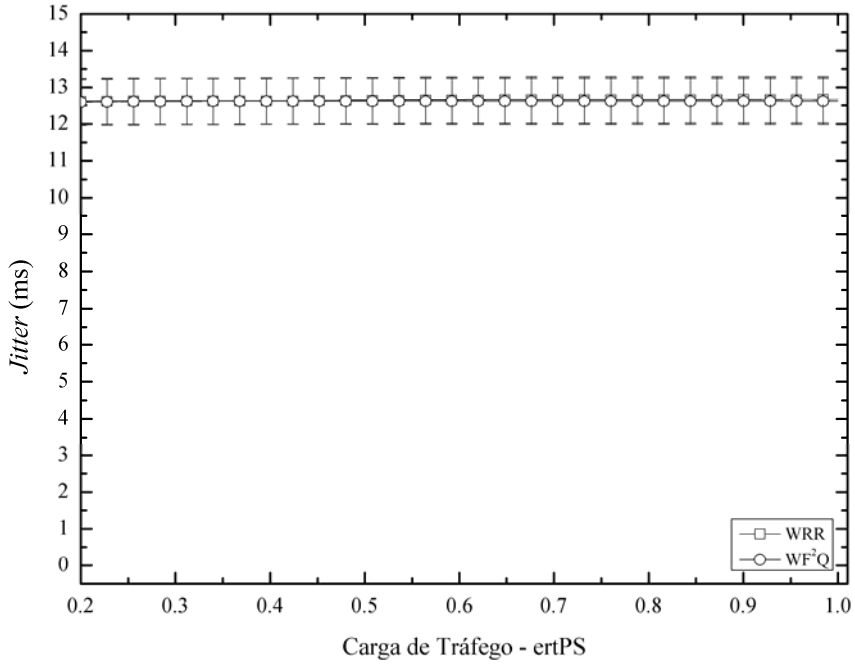

Figura 5.7: *Jitter* médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego ertPS.

A Figura 5.8 ilustra como se comportou a vazão média (em kbps) para a classe de tráfego ertPS e compara o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos. Assim, a disciplina WRR nesta classe de tráfego impeliu uma vazão média de aproximadamente 57 kbps enquanto que para a disciplina WF^2Q a vazão média ficou próxima a 63 kbps. Em ambos os mecanismos propostos, a vazão média inicialmente cresce até estabilizar-se, a partir 20% do total da intensidade da carga de tráfego submetida à rede de acesso. Este comportamento é esperado, pois os pacotes gerados na fonte da classe ertPS são de mesmo comprimento (200 bytes), caracterizando-a como CBR. Logo, durante o percurso da origem ao destino houve pouca degradação dos níveis de QoS, fato observado principalmente no mecanismo de escalonamento WF^2Q que preservou o nível de vazão próximo ao valor da taxa de envio de 64 kbps (Tabela 5.1). Tal comportamento proporcionou um bom desempenho da vazão para aplicações multimídia em tempo real.

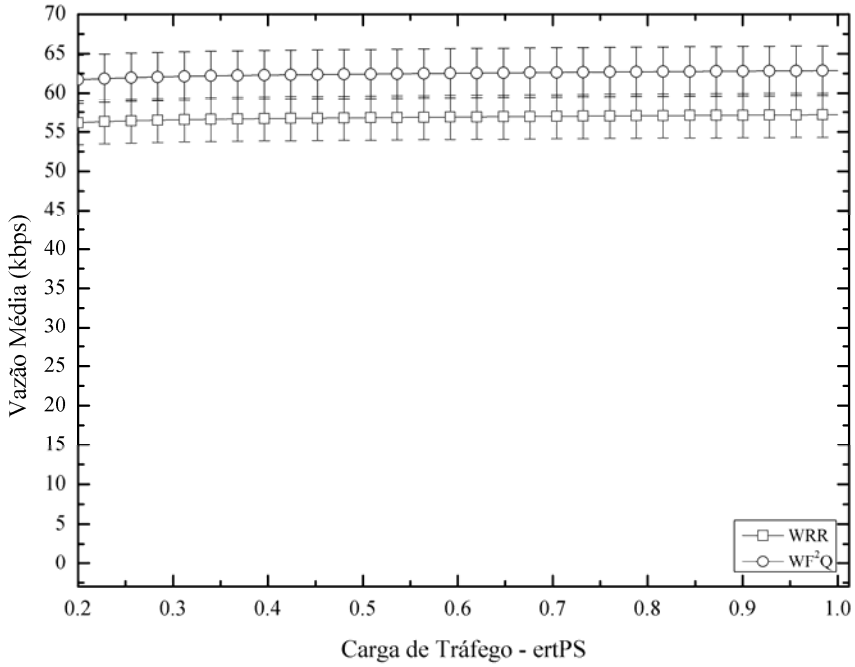

Figura 5.8: Vazão média (kbps), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego ertPS.

A Figura 5.9 revela o comportamento do atraso médio (em milissegundos) para a classe de tráfego nrtPS e compara o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos. Uma vez que a disciplina WRR nesta classe de tráfego proporcionou um atraso médio de aproximadamente 500 ms enquanto que para a disciplina WF^2Q o atraso médio ficou em torno de 433 ms. Observa-se que o atraso médio estabiliza-se nos dois mecanismos de escalonamento propostos. Assim, a classe nrtPS alcançou um bom desempenho, dentro dos limites estabelecidos em [100] para aplicações elásticas de tempo não real com taxa variável (VBR), tais como *web* e correio eletrônico. O mecanismo WF^2Q proposto, por ser mais complexo na simulação de um sistema GPS, contribui para um melhor desempenho para o tráfego em tempo não real. No entanto, o mecanismo de escalonamento WRR utilizado na simulação, apenas aplica os pesos às classes de tráfego e as serve conforme sua prioridade dentro da rede de acesso.

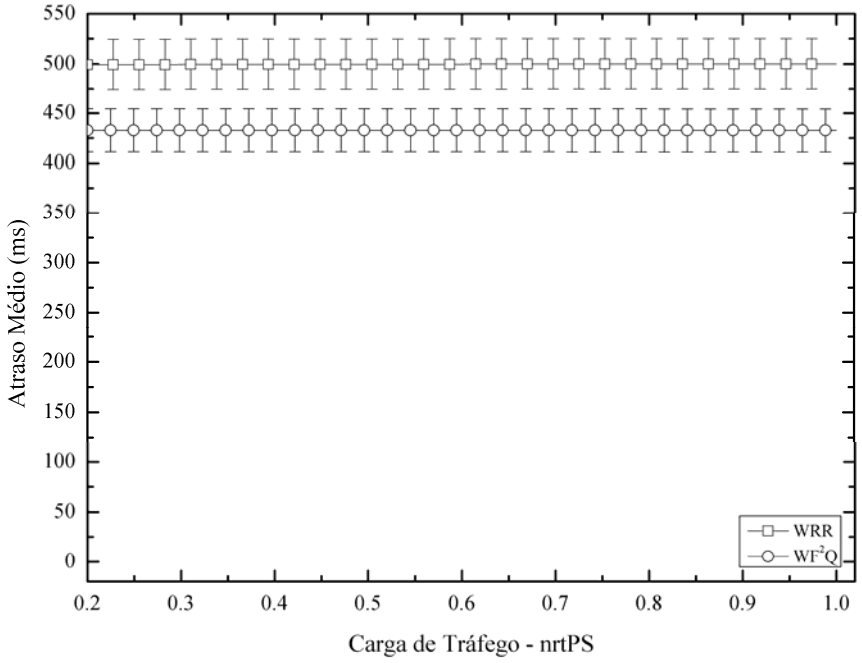

Figura 5.9: Atraso médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego nrtPS.

A Figura 5.10 apresenta o comportamento do *jitter* médio (em milissegundos) para a classe de tráfego nrtPS e compara o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos. A disciplina de escalonamento WRR nesta classe de tráfego adquiriu um *jitter* médio próximo a 22 ms enquanto que na utilização da disciplina WF^2Q o *jitter* médio estabilizou-se em torno de 20 ms. Nos dois mecanismos propostos, o *jitter* médio decresceu até estabilizar-se próximo a 50% do total da intensidade da carga de tráfego submetida à rede de acesso. Tal comportamento implica que a classe nrtPS conduziu a um bom desempenho para aplicações em tempo não real, sem prejuízo da qualidade, dentro dos limites estabelecidos em [101], tanto para o mecanismo de escalonamento WRR quanto para o WF^2Q com ligeira vantagem denotada nos níveis de QoS para esta classe de tráfego.

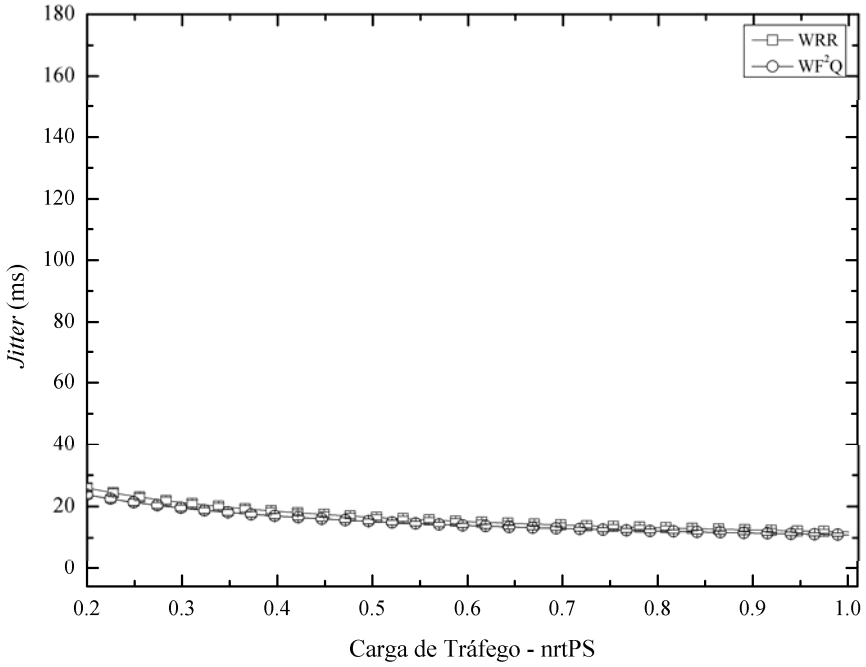

Figura 5.10: *Jitter* médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego nrtPS.

A Figura 5.11 exibe o comportamento da vazão média (em kbps) para a classe de tráfego nrtPS e compara o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos. Dessa forma, a disciplina WRR nesta classe de tráfego proporcionou uma vazão média de aproximadamente 157 kbps enquanto que para a disciplina WF^2Q a vazão média ficou próxima a 178 kbps. Em ambos os mecanismos propostos, a vazão média exibe um crescimento até atingir o final da simulação. Este comportamento é esperado, pois esta classe tendo maior prioridade do que a classe BE aproveita-se das sobras de recursos antes que a classe BE seja atendida. Logo, na medida em que se aumenta a carga de tráfego, eleva-se a vazão média, havendo degradação da vazão média (no destino) em relação à taxa de envio da fonte (1024 kbps, Tabela 5.1), pois há outros tráfegos concorrentes com maior prioridade, tais como UGS, rtPS e ertPS. Uma melhoria no nível de vazão média é observada no mecanismo de escalonamento WF^2Q por conter maior complexidade do que a disciplina WRR, com a utilização de recursos mais sofisticados, no intuito de simular um sistema GPS, tais como o emprego de temporizadores virtuais de início e final de serviço. Tal comportamento implica que a classe nrtPS propiciou

um bom desempenho para aplicações em tempo não real, tais como *streaming* de áudio/vídeo, sem prejuízo da qualidade.

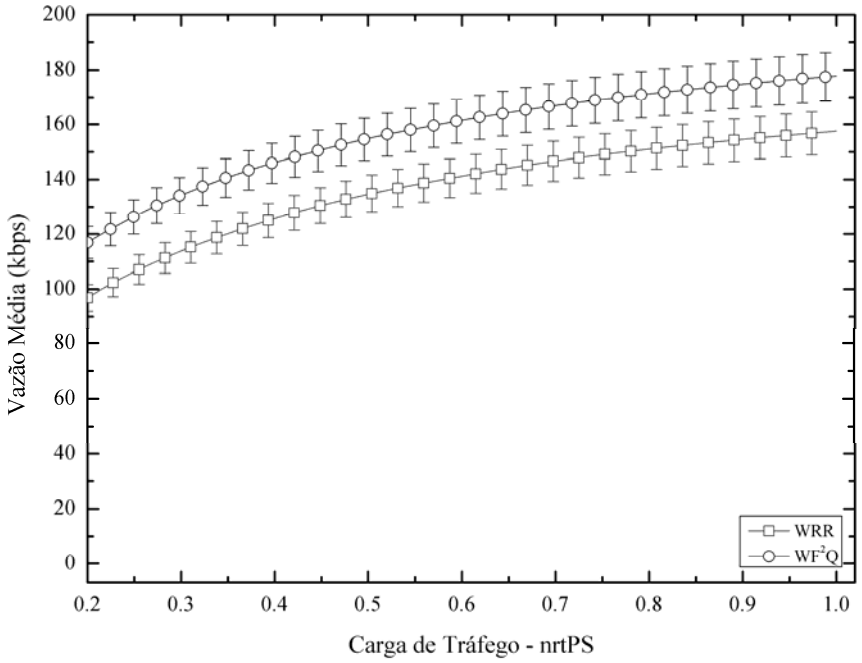

Figura 5.11: Vazão média (kbps), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego nrtPS.

A Figura 5.12 apresenta o comportamento do atraso médio (em milissegundos) para a classe de tráfego rtPS e compara o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos. Observa-se que com a disciplina WRR, os pacotes desta classe de tráfego sofreram um atraso médio de aproximadamente 28 ms enquanto que com a disciplina WF^2Q o atraso médio ficou em torno de 25 ms. Inicialmente, nos dois mecanismos propostos, até 10% do total da intensidade da carga de tráfego submetida à rede de acesso, observa-se que o atraso médio decresce e estabiliza-se nos dois mecanismos de escalonamento propostos. Assim, a classe rtPS assumiu um bom desempenho, dentro dos limites estabelecidos em [99-100] para aplicações de tempo real com taxa variável (VBR), tais como áudio e vídeo em tempo real. O mecanismo WF^2Q proposto, por apresentar maior complexidade, pois simula um sistema GPS, corrobora para um melhor desempenho para o tráfego em tempo real. Em contrapartida,

o mecanismo de escalonamento WRR usado na simulação, apenas aplica os pesos às classes de tráfego e as serve de acordo com sua prioridade na rede de acesso.

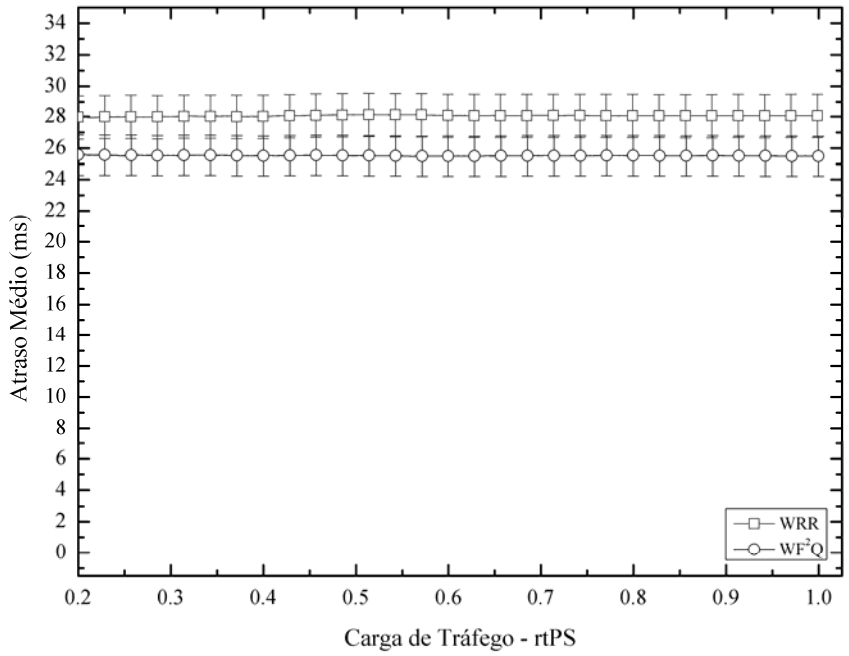

Figura 5.12: Atraso médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego rtPS.

A Figura 5.13 exibe o comportamento do *jitter* médio (em milissegundos) para a classe de tráfego rtPS e compara o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos. A disciplina de escalonamento WRR nesta classe de tráfego produziu um *jitter* médio de aproximadamente 16 ms enquanto que na utilização da disciplina WF^2Q o *jitter* médio fixou-se em torno de 15 ms. Nos dois mecanismos propostos, o *jitter* médio se manteve constante ao longo dos 50 segundos de simulação. Tal comportamento implica que esta classe conduziu a um bom desempenho para aplicações em tempo real. Logo, estão dentro da faixa de recomendação do ITU-T (*jitter* < 30 ms) [99] para áudio e vídeo interativos, tanto para o mecanismo de escalonamento WRR quanto para o WF^2Q com uma margem de vantagem denotada nos níveis de QoS para esta classe de tráfego. Tal fato decorre de que o mecanismo WF^2Q proposto possui maior complexidade, pois simula um sistema GPS, contribuindo para

um melhor desempenho para o tráfego em tempo real. Contudo, o mecanismo de escalonamento WRR utilizado na simulação, apenas aplica os pesos às classes de tráfego e as serve de acordo com sua prioridade na rede de acesso.

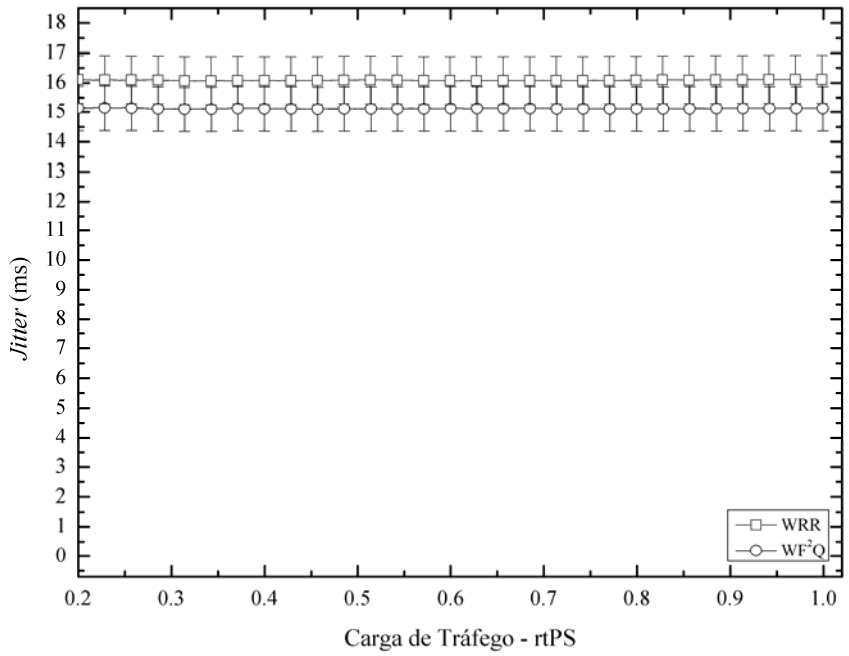

Figura 5.13: *Jitter* médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego rtPS.

A Figura 5.14 reflete o comportamento da vazão média (em kbps) para a classe de tráfego rtPS e compara o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos. Dessa maneira, a disciplina WRR nesta classe de tráfego determinou uma vazão média próxima de 1014 kbps enquanto que para a disciplina WF^2Q conduziu a uma vazão média de 1019 kbps, aproximadamente. Em ambos os mecanismos propostos, a vazão média inicialmente cresce até estabilizar-se, a partir 50% do total da intensidade da carga de tráfego submetida à rede de acesso. Os valores de vazão média nos dois mecanismos apresentaram resultados próximos, pois as conexões pertencentes à classe rtPS possuem maior prioridade de acesso aos recursos (maior peso ϕ_i) do que as conexões das classes BE, ertPS, nrtPS. Porém, o mecanismo WF^2Q apresentou ligeira vantagem (em comparação com o WRR) nos níveis de vazão média, devido

à utilização de temporizadores virtuais e a aplicação do método SEFF que escolhe dentre os pacotes elegíveis, aquele com menor valor de tempo virtual de final de serviço. Logo, durante o percurso da origem ao destino houve pouca degradação dos níveis de QoS com os dois mecanismos de escalonamento propostos. Portanto, ambos os mecanismos preservaram o nível de vazão próximo ao valor da taxa máxima de envio de 1024 kbps (Tabela 5.1). Tal comportamento proporcionou um bom desempenho da vazão para aplicações multimídia em tempo real nos dois mecanismos utilizados.

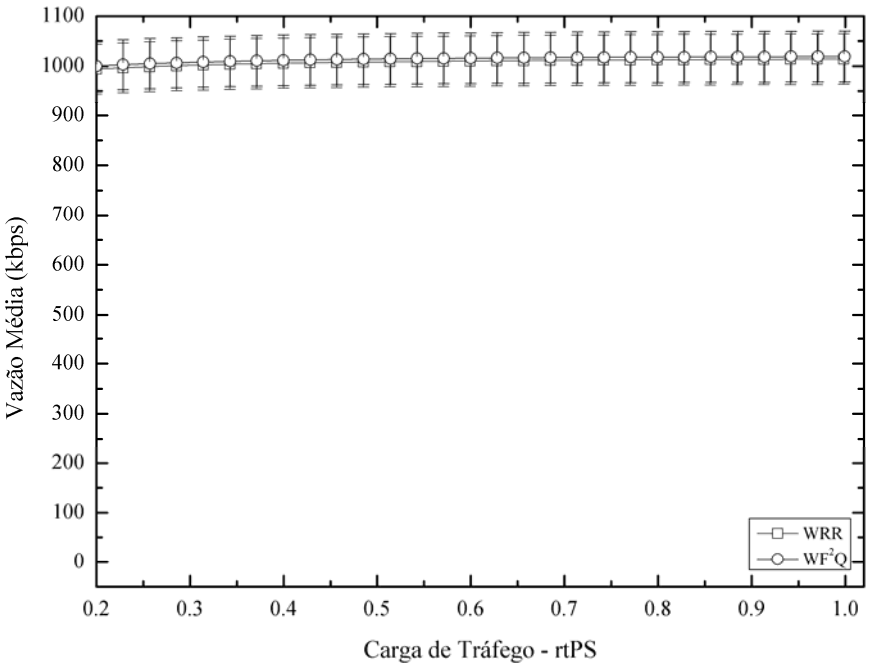

Figura 5.14: Vazão média (kbps), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego rtPS.

A Figura 5.15 descreve o comportamento do atraso médio (em milissegundos) para a classe de tráfego UGS e compara o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos. Observa-se que a disciplina WRR nesta classe de tráfego proporcionou um atraso médio de 0,8 ms enquanto que para a disciplina WF^2Q o atraso médio foi de 0,63 ms. Em ambos os mecanismos propostos observa-se um pequeno decréscimo do atraso médio em relação à intensidade da carga de tráfego. Tal fato ocorre em função da prioridade da classe

UGS, pois esta apresenta maior prioridade de acesso aos recursos na rede de acesso. Dessa forma, à medida que a carga de tráfego aumenta, as duas disciplinas de escalonamento analisam os pesos e as prioridades dos tráfegos e servem prioritariamente à classe UGS. Assim, esta classe apresentou um bom desempenho, de acordo com os limites estabelecidos em [99-100] para aplicações multimídia, tais como áudio e vídeo em tempo real ou interativo. O mecanismo WF^2Q, é uma aproximação da disciplina de escalonamento GPS e embora apresente maior complexidade, contribui para uma pequena melhora no desempenho dessa classe de tráfego. Em contrapartida, o mecanismo de escalonamento WRR, apenas aplica os pesos às classes de tráfego e as serve de acordo com sua prioridade na rede de acesso.

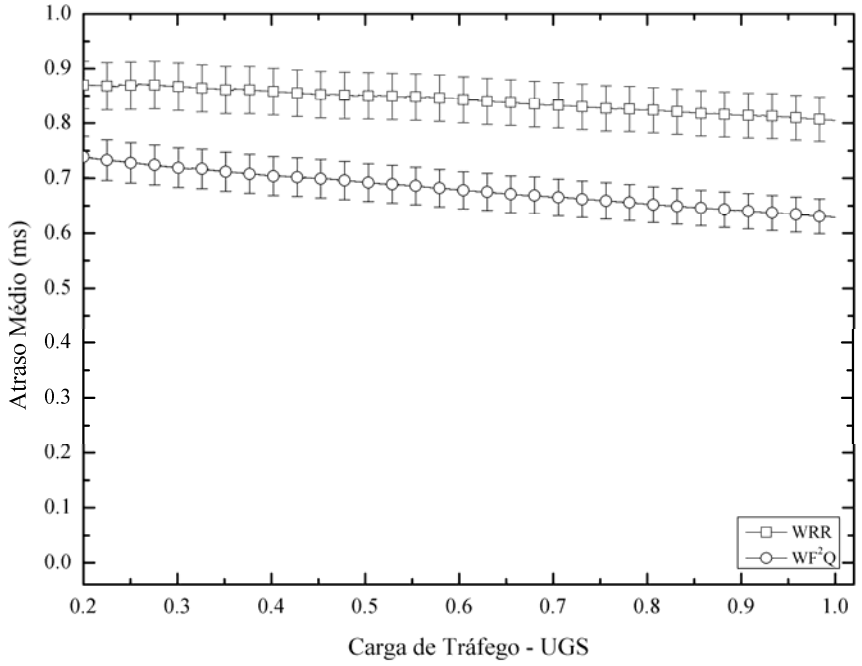

Figura 5.15: Atraso médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego UGS.

A Figura 5.16 exibe o comportamento do *jitter* médio (em milissegundos) para a classe de tráfego UGS e compara o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos. A disciplina de escalonamento WRR nesta classe de tráfego produziu um *jitter* médio de 0,43 ms enquanto que na utilização da disciplina WF^2Q propiciou um *jitter* médio de 0,39 ms. No

mecanismo de escalonamento WF^2Q, a partir de 30% do total da intensidade da carga de tráfego submetida à rede de acesso, o *jitter* médio se manteve constante até o término da simulação. Todavia, no mecanismo de escalonamento WRR observou-se uma pequena oscilação no *jitter* médio, ligeiramente maior do que na disciplina WF^2Q. Tal fato decorre ocorre devido o mecanismo de escalonamento WF^2Q apresentar maior complexidade, pois se aproxima de um escalonador GPS, proporcionando um melhor desempenho neste tipo de tráfego. Todavia, o mecanismo de escalonamento WRR utilizado na simulação, apenas aplica os pesos às classes de tráfego e as serve de acordo com sua prioridade na rede de acesso. Contudo, em ambos os mecanismos de escalonamento os resultados observados conduziram a um bom desempenho para aplicações em tempo real ou interativas, em concordância com a recomendação do ITU-T [99] para áudio e vídeo interativos.

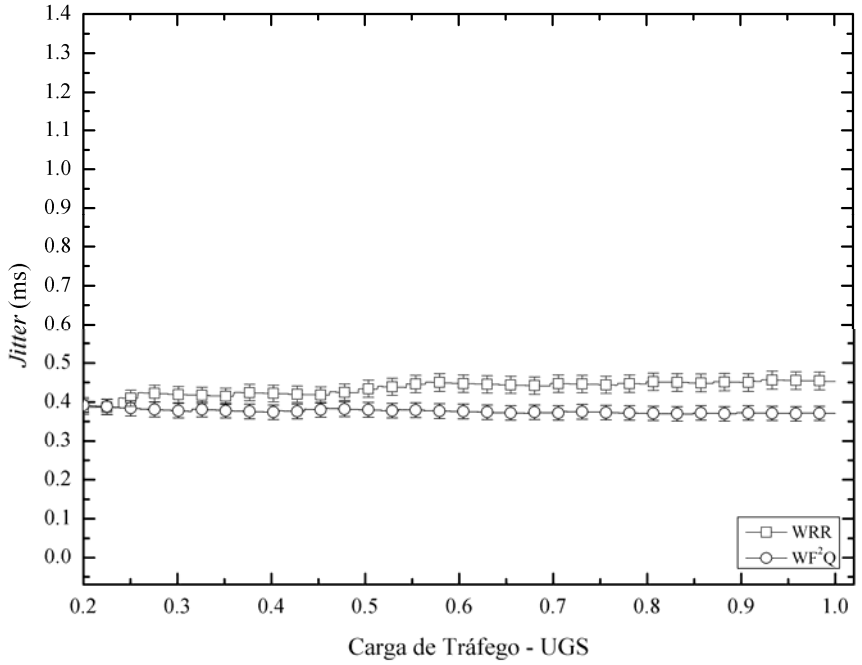

Figura 5.16: *Jitter* médio (ms), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego UGS.

A Figura 5.17 ilustra o comportamento da vazão média (em kbps) para a classe de tráfego UGS e compara o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos. Dessa

forma, a disciplina WRR nesta classe de tráfego determinou uma vazão média de 63,3 kbps, enquanto que a disciplina WF^2Q conduziu a uma vazão média de 63,6 kbps. Em ambos os mecanismos propostos, a vazão média estabiliza-se em torno de 50% do total da intensidade da carga de tráfego submetida à rede de acesso. Este comportamento é esperado, pois os pacotes gerados na fonte da classe UGS possuem comprimento fixo em 200 bytes (Tabela 5.1), caracterizando-a como CBR. Logo, durante o percurso da origem ao destino praticamente não houve degradação nos níveis de QoS nos dois mecanismos de escalonamento propostos, fato notado em ambos os mecanismos que preservaram o nível de vazão próximo ao valor da taxa máxima de envio de 64 kbps (Tabela 5.1). Outro fator que explica a sobreposição dos valores de vazão média nos dois mecanismos de escalonamento decorre dos pesos e prioridades aplicados à classe UGS, pois esta classe possui o maior peso e prioridade dentre todas as classes de tráfego concorrentes na rede de acesso simulada. Estes comportamentos conduziram a um bom desempenho da vazão para aplicações multimídia em tempo real ou interativas em ambos os mecanismos de escalonamento propostos.

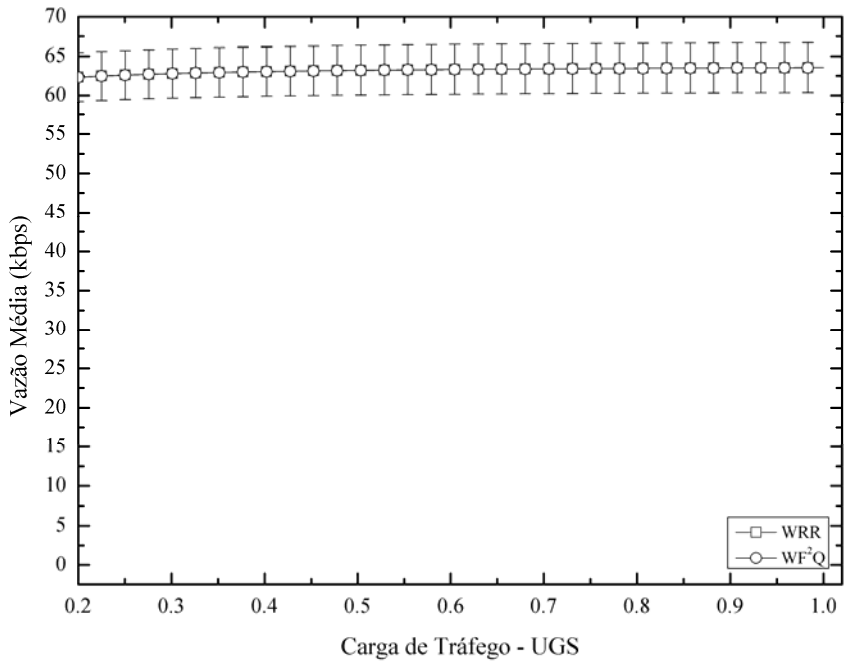

Figura 5.17: Vazão média (kbps), utilizando os mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q para a classe de tráfego UGS.

A Tabela 5.2 apresenta uma comparação do desempenho nos dois mecanismos de escalonamento propostos em termos de atraso médio, em milissegundos para todas as classes de tráfego simuladas na rede de acesso IEEE 802.16 PMP.

Tabela 5.2. Comparação do parâmetro atraso médio (ms) nas disciplinas de escalonamento WRR e WF^2Q com intervalos de confiança ao nível de 95%.

Classe	WRR	WF^2Q
BE	2839,71 ± 95,96	2738,08 ± 93,45
ertPS	20,66 ± 0,34	16,86 ± 0,34
nrtPS	500,00 ± 0,34	432,69 ± 0,29
rtPS	28,07 ± 0,18	25,49 ± 0,17
UGS	0,80 ± 0,01	$0,63 \pm 9,4 \times 10^{-3}$

A Tabela 5.3 descreve uma comparação do desempenho nos dois mecanismos de escalonamento propostos em termos de *jitter* médio, em milissegundos para todas as classes de tráfego simuladas na rede de acesso IEEE 802.16 PMP.

Tabela 5.3. Comparação dos parâmetros *jitter* médio (ms) nas disciplinas de escalonamento WRR e WF^2Q com intervalos de confiança ao nível de 95%.

Classe	WRR	WF^2Q
BE	832,60 ± 19,90	824,90 ± 19,60
ertPS	$12,62 \pm 6,4 \times 10^{-3}$	$12,59 \pm 6,4 \times 10^{-3}$
nrtPS	22,26 ± 0,45	20,43 ± 0,39
rtPS	$16,08 \pm 1,6 \times 10^{-3}$	$15,11 \pm 1,6 \times 10^{-3}$
UGS	$0,43 \pm 6,6 \times 10^{-4}$	$0,39 \pm 1,3 \times 10^{-3}$

A Tabela 5.4 exibe uma comparação do desempenho nos dois mecanismos de escalonamento propostos em termos de vazão média, em kbps para todas as classes de tráfego simuladas na rede de acesso IEEE 802.16 PMP.

Tabela 5.4. Comparação dos parâmetros vazão média (kbps) nas disciplinas de escalonamento WRR e WF^2Q com intervalos de confiança ao nível de 95%.

Classe	WRR	WF^2Q
BE	21,41 ± 2,82	39,26 ± 4,64
ertPS	57,16 ± 0,15	62,86 ± 0,17
nrtPS	157,54 ± 2,78	177,79 ± 2,66
rtPS	1014,11 ± 0,96	1019,23 ± 1,03
UGS	63,33 ± 0,12	63,55 ± 0,12

5.5. Conclusão

Neste capítulo avaliou-se, através de modelagem e simulação, o desempenho dos mecanismos de escalonamento propostos no Capítulo 4, vinculado ao cenário descrito na Figura 5.2. A simulação foi realizada sob as mesmas condições para os dois mecanismos de escalonamento: WRR e WF^2Q, com o intuito de comparar o desempenho de ambos os mecanismos no suporte à QoS no cenário da rede de acesso simulada. Assim, os parâmetros de QoS: atraso médio, *jitter* médio e vazão média foram avaliados no cenário supracitado, com o auxílio da ferramenta de simulação NS-2, agregada a um módulo para simular o tráfego *downlink* no ambiente de rede IEEE 802.16 PMP.

Dessa forma, o mecanismo de escalonamento WRR proposto conduziu a bons níveis nos parâmetros de QoS mensurados. Este mecanismo possui baixa complexidade, uma vez que utiliza o método de escalonamento *round-robin* com pesos atribuídos aos pacotes classificados. Também, mostrou-se útil quando se almeja ter facilidade de implementação e baixo custo computacional (menor carga de processamento) na BS.

Todavia, a proposta do mecanismo de escalonamento WF^2Q propiciou resultados ligeiramente melhores nos níveis dos parâmetros de QoS avaliados: atraso médio, *jitter* médio e vazão média. Porém, este mecanismo detém maior complexidade do que o anterior, pois utiliza recursos mais sofisticados, tais como o emprego de temporizadores virtuais de início, final e geral de serviço, além de pertencer ao método de menor tempo virtual de final de serviço elegível primeiro (SEFF). Estes recursos objetivam simular um sistema GPS, escalonador ideal, não implementável. Assim, por possuir estas características, este mecanismo revelou desvantagens: apresenta maior dificuldade de implementação e maior sobrecarga de processamento computacional na BS. Estas desvantagens foram observadas na modelagem e simulação com a utilização de recursos de memória e processamento.

CONCLUSÕES GERAIS

As comunicações sem fio têm experimentado grandes avanços nos últimos anos, sobretudo em sistemas BWA, com a oferta de banda larga sem fio. Tal cenário permite acesso de banda larga em regiões com dificuldades de localização geográfica ou de infra-estrutura de rede convencional, tais como regiões rurais ou suburbanas. Constitui, portanto, uma solução de acesso sem fio que possibilita benefícios e oportunidades de negócios em regiões que convencionalmente não há acesso à informação.

Neste contexto, a tecnologia das redes de acesso sem fio IEEE 802.16 surge como uma tecnologia que oferece soluções promissoras a um custo menor, se comparado às soluções de banda larga convencional. Embora, seja uma tecnologia que prometa bom desempenho, algumas questões relacionadas à provisão de QoS constituem amplo espaço de investigação científica com propostas de soluções do problema de suporte à provisão de QoS na área de redes BWA.

Inicialmente, neste trabalho foi apresentada a evolução das redes de banda larga sem fio até chegar às redes IEEE 802.16 que incorpora provisão de QoS, implementada na camada MAC.

A fundamentação teórica abordou o modelo de referência do Padrão IEEE 802.16 nas subcamadas MAC, responsáveis pela classificação das MAC PDUs/SDUs. Também foram descritos alguns aspectos da camada física, bem como as arquiteturas de rede PMP e *mesh*.

Aspectos concernentes à QoS foram descritos desde suas bases até chegar à provisão de QoS nas redes de acesso IEEE 802.16. Dessa forma, foram apresentados a teoria do modelo de objetos, as classes de tráfego, os fluxos de serviço e a classificação destes fluxos. Além

disso, apresentaram-se os mecanismos de requisição e alocação de largura de banda e a estrutura da MIB relacionada aos fluxos de serviço.

Na seqüência deste trabalho abordaram-se as características, funções e o funcionamento dos mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q que serviram de base para a proposta deste trabalho. Em seguida fez-se uma breve descrição do funcionamento do escalonamento no Padrão IEEE 802.16 nos sentidos *downlink* e *uplink*.

Descreveu-se o problema da provisão de QoS nestas redes, bem como a influência e os objetivos dos mecanismos de escalonamento propostos. Salientou-se que algumas questões relativas ao suporte da QoS nas redes de acesso IEEE 802.16 estão ainda em aberto, pois o padrão que as define, não determina quais mecanismos devem ser implementados. Assim, o escalonamento dos fluxos de serviço destas redes de acesso constituem umas dessas questões de suporte à provisão de QoS que estão sujeitas a soluções e implementações por parte de pesquisadores em redes BWA ou fabricantes de equipamentos.

A proposta deste trabalho baseou-se nos mecanismos de escalonamento WRR e WF^2Q utilizados no suporte à QoS nas redes de acesso IEEE 802.16 PMP, no sentido *downlink*. Os mecanismos de escalonamento propostos foram avaliados e comparados com a utilização de recursos de modelagem e simulação. A ferramenta de simulação utilizada foi o NS-2, agregado a um módulo que permitiu simular uma rede de acesso IEEE 802.16 PMP. Modificações no código do módulo foram necessárias para que fosse possível implementar ambos os mecanismos de escalonamento propostos. Os resultados revelaram que o mecanismo de escalonamento WF^2Q apresenta ligeira vantagem em comparação com o mecanismo WRR sobre os níveis dos parâmetros de QoS avaliados: atraso médio, *jitter* médio e vazão média. Esta vantagem se deve ao fato de que o mecanismo WF^2Q possui maior complexidade do que o WRR, pois utiliza recursos mais sofisticados, como a aplicação de temporizadores virtuais de início, final e geral de serviço. Além disso, esse mecanismo

pertence ao método de menor tempo virtual de final de serviço elegível primeiro (SEFF) que objetiva simular um sistema GPS (escalonador ideal, não implementável). Dessa forma, por possuir estas características, o mecanismo WF^2Q mostrou-se eficiente no escalonamento dos fluxos de serviço na rede de acesso IEEE 802.16 PMP simulada. Porém, este mecanismo por ter maior complexidade, revela algumas desvantagens, pois possui maior dificuldade de implementação e exige maior processamento computacional, implicando em maior custo computacional na BS. O mecanismo WRR, por outro lado, apesar de apresentar maior degradação nos níveis dos parâmetros de QoS comparados, possui baixa complexidade, pois atribui pesos aos pacotes classificados e os serve de maneira rotativa (*round-robin*). Além disso, este mecanismo de escalonamento revelou-se útil quando se deseja ter facilidade em sua implementação e proporciona baixo custo computacional, implicando em menor carga de processamento na BS.

Portanto, ambos os mecanismos de escalonamento propostos se mostraram eficientes na avaliação de desempenho, constante no Capítulo 5 deste trabalho. Todavia, a escolha adequada do mecanismo de escalonamento estará vinculada a fatores como quantidade de estações que participam da rede e intensidade da carga de tráfego submetida à rede de acesso, bem como a duração das escalas de tempo e ciclos das conexões ou ainda o conhecimento prévio do comprimento médio dos pacotes que trafegam na rede de acesso. Além disso, questões relacionadas à complexidade de implementação e carga de processamento também são relevantes na escolha do mecanismo que será utilizado. Logo, as características e condições da rede de acesso devem consideradas na escolha do mecanismo WRR ou WF^2Q, a fim de se obter um desempenho satisfatório no suporte à QoS na rede de acesso IEEE 802.16.

Finalizando, como trabalhos futuros, são sugeridas algumas alterações nos escalonamentos propostos, dentre as quais, destaca-se a utilização de estratégias dinâmicas de escalonamento no suporte à QoS em redes de acesso IEEE 802.16. Estas estratégias se

traduzem em formas de escalonamento híbridas, ou seja, poderiam ser utilizados dois ou mais mecanismos de escalonamento para classificar e servir os pacotes ou fluxos de serviço na rede de acesso IEEE 802.16. Assim, em condições de tráfego críticas, como por exemplo, intensa carga de tráfego submetida à rede de acesso, podendo sujeitá-la a congestionamentos, faz-se necessário alterar dinamicamente, através da intervenção do operador de rede ou automaticamente, o tipo de escalonamento utilizado para determinados fluxos de serviço, a fim de preservar o critério *max-min-fairness* que possibilitaria uma distribuição equitativa dos recursos da rede de acesso. Nesse sentido, lança-se a idéia de utilizar o mecanismo de escalonamento WF^2Q, como forma de simular um escalonador ideal, o GPS em conjunto com outros mecanismos, tais como EDF, WFQ e WRR para que se alcance o melhor desempenho possível e a otimização dos recursos disponíveis em uma rede de acesso IEEE 802.16.

Além disso, também poderia ser estendido o presente estudo para uma rede *mesh*, ou seja, utilizar os mecanismos de escalonamento propostos em uma rede IEEE 802.16 mais complexa, tal qual uma rede em malha. Para tanto, também seria necessário implementar algoritmos de roteamento eficientes em função da dimensão e complexidade da rede *mesh*. Outra sugestão para trabalhos futuros fundamenta-se sobre a idéia de *crosslayer*, caracterizado pelo mapeamento das informações das camadas superiores com a combinação de mecanismos de gerenciamento de recursos, como DiffServ ou IntServ que aliados a estratégias de escalonamento eficientes, poderiam aumentar o desempenho no suporte à provisão da QoS em redes de acesso IEEE 802.16.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] IEEE 802.16 Working Group. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part. 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems. October, 2004.

[2] WiMAX Forum. Disponível em http://www.wimaxforum.org. Acessado em: Agosto, 2007.

[3] EKLUND, C. et all, IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN™ Air Interface for Broadband Wireless Access. IEEE Communications Magazine, July, 2002.

[4] KOSIUR, D. IP Multicasting. John Wiley & Sons, Inc., 1998.

[5] GHOSH, A. & WOLTER, D. R. Broadband Wireless Access with WiMax/802.16: Current Performance Benchmarks and Future Potential. IEEE Communications Magazine, February, 2005.

[6] BURBANK, J. L. & KASH, W. T. IEEE 802.16 Broadband Wireless Technology and Its Applications to the Military Problem Space. Military Communications Conference, IEEE, October, 2005.

[7] BHANDARI, B. N. et all, Uplink Performance of the IEEE802.16 Medium Access Control (MAC) Layer Protocol. IEEE International Conference on Personal Wireless Communications, India, January, 2005.

[8] SENGUPTA S. et all, Exploiting MAC flexibility in WiMAX for media streaming. In: Proceedings of sixth IEEE international symposium on a world of wireless mobile and multimedia networks. Giardini Naxos, Italy, pp. 338–343, June, 2005.

[9] MARKS, R. B. et all, The 802.16 WirelessMAN MAC: It's done, but what is it?. Disponível em: http://ieee802.org/16/docs/02/C80216-02_05.pdf. Acessado em: September, 2007.

[10] KURAN, M. S. & TUGCU, T. A Survey on Emerging Broadband Wireless Access Technologies. IEEE Computer Networks, vol. 51, n°. 11, pp. 3013-3046, August, 2007.

[11] AKYILDIZ, I. F. et all, Wireless Mesh Networks: A Survey. Computer Networks, pp. 445-487, March, 2005.

[12] TARDY, I. et all, On The Role of Future High-Frequency BFWA Systems in Broadband Communications Networks. IEEE Communications Magazine, vol. 43, n°. 2, pp. 138-144, February, 2005.

[13] PARK, K. I. QoS in Packet Networks. Springer, 2005.

[14] Nortel Networks. Benefits of Quality of Service (QoS) in 3G Wireless Internet. October, 2001.

[15] CHALMERS, D. et all, A Survey of Quality of Service in Mobile Computing Environments. IEEE Communications Surveys, 1999.

[16] KNOCHE, H. et all, Quantitative Qos Mapping: A Unifying Approach. In Proceedings 5th International Workshop on Quality of Service, 1997.

[17] TATIPAMULA, M. et all, Multimedia Communications Networks: Technologies and Services. 1st ed., Artech House Publishers, 1998.

[18] VANDALORE, B. et all, AQuaFWiN: Adaptive QoS Framework for Multimedia in Wireless Networks and its Comparison with other QoS Frameworks. In Proceedings of the 24th IEEE Conference on Local Computer Networks, October, 1999.

[19] MORAES, L. F. M & MACIEL, P. D., Analysis and Evaluation of a New MAC Protocol for Broadband Wireless Access. International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, vol. 1, pp. 107-112, June, 2005.

[20] YAGHOOBI, H. 802.16* Broadband Wireless Access: the next big thing in wireless. IDF Fall Conferences. Intel Broadband Wireless Division, Wireless Networking Group, September, 2003.

[21] NAIR, G. et all, IEEE 802.16 Medium Access Control and Service Provisioning. Intel Tech. Journal, August, 2004.

[22] IEEE 802.16-2005 Working Group. IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part. 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems for Mobile Users. December, 2005.

[23] HAWA, M. Stochastic Evaluation of Fair Scheduling with Applications to Quality-of-Service in Broadband Wireless Access Networks. Master Thesis of University of Kansas, August, 2003.

[24] CHOU, J. et all, MAC and PHY MIB for WirelessMAN and WirelessHUMAN BS and SS. IEEE 802.16mgt-04-04. May, 2004.

[25] ANDREWS, J. G. et all, Fundamentals of WiMAX Understanding Broadband Wireless Networking, Prentice Hall, February, 2007.

[26] AHSON, S. & ILYAS, M. WiMAX Technologies, Performance Analysis, and QoS, CRC Press, September, 2007.

[27] AHSON, S. & ILYAS, M. WiMAX Standards and Security, CRC Press, September, 2007.

[28] AHSON, S. & ILYAS, M. WiMAX Applications, Providing QoS to Real and Interactive Data Applications in WiMAX Mesh Networks", cap. 10, pp. 195, CRC Press, September, 2007.

[29] SHEPARD, S. WiMAX Crash Course, McGraw-Hill, May, 2006.

[30] CHU, G. et all, A QoS Architecture for the MAC Protocol of IEEE 802.16 BWA System. IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions, vol. 1, pp. 435-439, July, 2002.

[31] NAVES, S. G. et all, WiMAX – IEEE 802.16: Estudo da Tecnologia e Requisitos para Modelamento e Simulação. Encontro de Iniciação Científica e Tecnológica (INCITEL), Santa Rita do Sapucaí, 2005.

[32] PIDUTTI, M. 802.16 Tackles Broadband Wireless QoS Issues. Disponível em: http://www.commsdesign.com, ArticleID=54201623. Acessado em: Setembro, 2007.

[33] HAYAT, B. & NASIR, R. M. A. 802.16-2001 MAC Layer QoS. Disponível em: http://www.acm.org/ubiquity/views/v7i17_hayat.html. Acessado em: Setembro, 2007.

[34] NEVES, P. et all, Support of Real-Time Services over Integrated 802.16 Metropolitan and Local Area Networks, 11th IEEE Symposium on Computers and Communications, June, 2006.

[35] HAWA, M. & PETR, D. W. Quality of Service Scheduling in Cable and Broadband Wireless Access Systems. 10th IEEE International Workshop on Quality of Service, vol. 15-17, pp. 247-255, August, 2002.

[36] XERGIAS, S. A. et all, Flexible Resource Allocation in IEEE 802.16 Wireless Metropolitan Area Networks. 14th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks (LANMAN), September, 2005.

[37] MORAES, L. F. M. & MACIEL, P. D. Analysis and Evaluation of a New MAC Protocol for Broadband Wireless Access. International Conference on Wireless Networks, Communications and Mobile Computing, vol. 1, pp. 107-112, June, 2005.

[38] SHAH, S. et all, GIG/DISN Quality of Service and Service Level Agreement Management for Integrated Global Wireless Tactical Services Provider Network. Military Communications Conference (MILCOM), pp. 1-7, October, 2006.

[39] DELICADO, J. et all, A QoS-aware protocol architecture for WiMAX. Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, pp. 1779-1782, May, 2006.

[40] BAI, X. et all, New Distributed QoS Control Scheme for IEEE 802.16 Wireless Access Networks. IEEE Global Telecommunications Conference (GLOBECOM), pp. 1-5, November, 2006.

[41] GUO, X. et all, Dynamic Bandwidth Reservation Admission Control Scheme for the IEEE 802.16e Broadband Wireless Access Systems. IEEE Wireless Communications and Networking Conference, pp. 3418-3423, March, 2007.

[42] GOES, A. et all, Análise de Capacidade e Desempenho da Tecnologia de Transmissão Rádio IP-OFDMA. XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações, Setembro, 2007.

[43] LI, B. et all, A Survey on Mobile WiMAX. IEEE Communications Magazine, pp. 70-75, December, 2007.

[44] ALAVI, H. S. et all, A Quality of Service Architecture for IEEE 802.16 Standards. Ásia-Pacific Conference on Communications, pp. 249-253, October, 2005.

[45] NIYATO, D. et all, Queue-Aware Uplink Bandwidth Allocation and Rate Control for Polling Service in IEEE 802.16 Broadband Wireless Networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 5, issue 6, pp. 668-679, June, 2006.

[46] NIYATO, D. & HOSSAIN, E. A Queuing-Theoretic and Optimization-Based Model for Radio Resource Management in IEEE 802.16 Broadband Wireless Networks. IEEE Transactions on Computers, vol. 55, issue 11, pp. 1473-1488, November, 2006.

[47] WANG, L. et all, Admission Control for Non-preprovisioned service Flow in Wireless Metropolitan Area Networks. Fourth European Conference on Universal Multiservice Networks (ECUMN), pp. 243-249, February, 2007.

[48] PARK, A. H. & CHOI, J. K. QoS guaranteed IPTV service over Wireless Broadband network. 9th International Conference on Advanced Communication Technology, vol. 2, pp. 1077-1080, February, 2007.

[49] NIYATO, D. & HOSSAIN, E. Radio Resource Management Games in Wireless Networks: An Approach to Bandwidth Allocation and Admission Control for Polling Service in IEEE 802.16. IEEE Wireless Communications, vol. 14, issue 1, pp. 27-35, February, 2007.

[50] GAKHAR, K et all, How Many Traffic Classes do we Need in WiMAX? IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 3703-3708, March, 2007.

[51] RONG, B. et all, Integrated Downlink Resource Management for Multiservice WiMAX Networks. IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 6, issue 6, pp. 621-632, June, 2007.

[52] HUANG, C. Y. et all, Radio Resource Management of Heterogeneous Services in Mobile WiMAX Systems. IEEE Wireless Communications, vol. 14, issue 1, pp. 20-26, February, 2007.

[53] GE, Y. & KUO, G. S. Dynamic Bandwidth Quasi-reservation Scheme for Real-time Services in IEEE 802.16e Networks. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), pp. 1700-1705, March, 2007.

[54] FOERSTER, J. et all, LMDS Standards Architectural Issues. IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC), vol. 3, pp. 1590-1594, August, 2002.

[55] CASTRUCCI, M. et all, A Framework for Resource Control in WiMAX Networks. International Conference on Next Generation Mobile Applications, Services and Technologies (NGMAST), pp. 316-321, September, 2007.

[56] STACHLEWSKI, S. R. QoS (Quality of Service). Disponível em: http://www.dimap.ufrn.br/~glaucia/RAV/QoS-Artigo.pdf. Acessado em: Setembro, 2007.

[57] SILVA, A. J. S. Qualidade de Serviço em VoIP – Parte 2. Boletim Bimestral Sobre Tecnologia de Redes, vol. 4, nº. 5, RNP, Setembro, 2000.

[58] XIAOFENG, B. et all, Robust QoS Control for Single Carrier PMP Mode IEEE 802.16 System, Proceedings of the IEEE Transactions on Mobile Computing, July, 2007.

[59] CICCONETTI, C. et all, Performance Evaluation of the IEEE 802.16 MAC for QoS Suport, IEEE Transactions on Mobile Computing, vol. 6, nº. 1, January, 2007.

[60] SAYENKO, A. et all, Scheduling Solution for the IEEE 802.16 Base Station, Proceedings of the Computer Networks, September, 2007.

[61] LERA, A. et all, Channel-Aware Scheduling for QoS and Fairness Provisioning in IEEE 802.16/WiMAX Broadband Wireless Access Systems, IEEE Network, vol. 21, issue 5, pp. 34-41, October, 2007.

[62] TSAI, F. C. et all. The Design and Implementation of WiMAX Module for ns-2 Simulator, Proc. ACM VALEUTOOLS 2006, Pisa, Italy, October 10, 2006.

[63] SAYENKO, A. et all, Ensuring the QoS Requirements in 802.16 Scheduling, Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, pp. 108-117, October, 2006.

[64] CICCONETTI, C. et all, Quality of Service Support in IEEE 802.16 Networks, IEEE Network, vol. 20, issue 2, pp. 50-55, April, 2006.

[65] SUN J. et all, Quality of Service Scheduling for 802.16 Broadband Wireless Access Systems, IEEE 63rd Vehicular Technology Conference, vol. 3, pp. 1221-1225, May, 2006.

[66] VINAY, K. et all, Performance Evaluation of End-to-End Delay by Hybrid Scheduling Algorithm for QoS in IEEE 802.16 Network, International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, pp. 5, April, 2006.

[67] JAYAPARVATHY, R. & SURESHKUMAR, G. Performance Evaluation of Scheduling Schemes for Fixed Broadband Wireless Access Systems, 13th IEEE International Conference on Networks, vol. 2, pp. 6, November, 2005.

[68] CAO, Y. et all, Scheduling Algorithms in Broad-Band Wireless Networks, Proceedings of the IEEE, vol. 89, issue 1, pp. 76-87, January, 2001.

[69] SAFA, H. et all, New Scheduling Architecture for IEEE 802.16 Wireless Metropolitan Area Network, International Conference on Computer Systems and Applications, pp. 203-210, May, 2007.

[70] CHEN, J. et all. An Integrated QoS Control Architecture for IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Systems. IEEE Global Telecommunications Conference, vol. 6, pp. 6, October, 2004.

[71] CHEN, J. et all. Providing Integrated QoS Control for IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Systems. IEEE 62nd Vehicular Technology Conference, vol. 2, pp. 1254-1258, September, 2005.

[72] WONGTHAVARAWAT, K. et all. IEEE 802.16 Based Last Mile Broadband Wireless Military Networks with Quality of Service Support. IEEE Military Communications Conference, vol. 2, pp. 779-784, October, 2003.

[73] WONGTHAVARAWAT, K. & GANZ, A. Packet Scheduling for QoS Support in IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Systems. International Journal of Communications Systems, vol. 16, n°. 1, pp. 81-96, February, 2003.

[74] KIM, J. et all. Optimal Packet Allocation with Airtime Constraint for Multi-Access Links. IEEE 16th International Computer Communications and Networks, pp. 315-320, August, 2007.

[75] SHEJWAL, A & PARHAR, A. Service Criticality Based Scheduling for IEEE 802.16 Wireless MAN, 2nd International Conference on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications, pp. 12, August, 2007.

[76] SETTEMBRE, M. et all. Performance Analysis of an Efficient Packet-Based IEEE 802.16 MAC Supporting Adaptive Modulation and Coding. Computer Networks, pp 11-16. June 2006.

[77] TARCHI, D. et all, Quality of Service Management in IEEE 802.16 Wireless Metropolitan Area Networks, IEEE International Conference on Communications, vol. 4, pp. 1789-1794, June, 2006.

[78] PERUMALRAJA, R. et all, Multimedia Supported Uplink Scheduling for IEEE 802.16d OFDMA Network, Annual India Conference, September, 2006.

[79] MUKUL, R. et all, An adaptive Bandwidth Request Mechanism for QoS Enhancement in WiMAX Real Time Communication, International Conference on Wireless and Optical Communications Networks, pp. 5, April, 2006.

[80] ROY, J. J. J. et all, Performance Analysis of a Dynamic Scheduler for VBR Services in IEEE802.16d Broadband Wireless, First International Conference on Industrial and Information Systems, pp. 444-449, August, 2006.

[81] CHENG, S. et all, A Study on Distributed/Centralized Scheduling for Wireless Mesh Network, Proceedings of the 2006 International Conference on Wireless Communications and Mobile Computing, pp. 599-604, 2006.

[82] CHO, D. et all, Performance Analysis of the IEEE 802.16 Wireless Metropolitan Area Network, Proceedings of the First International Conference on Distributed Frameworks for Multimedia Applications, pp. 130-137, 2005.

[83] LEE, H. et all, An Efficient Uplink Scheduling Algorithm for VoIP Services in IEEE 802.16 BWA Systems, IEEE 60th Vehicular Technology Conference, vol. 5, pp. 3070-3074, September, 2004.

[84] SAYENKO, A. et all, Comparison and analysis of the revenue-based adaptive queuing models. Computer Networks, vol. 50, pp. 1040-1058, June, 2006.

[85] SAYENKO, A. et all, Adaptive scheduling using the revenue-based Weighted Round Robin. 12th IEEE International Conference on Networks, vol. 2, pp. 743-749, November, 2004.

[86] KATEVENIS, M. et all, Weighted Round-Robin Cell Multiplexing in a General-Purpose ATM Switch Chip, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 9, issue 8, October, 1991.

[87] ALBERTI, A. M. et all, Modelamento e Simulação de um Escalonador WF^2Q Aplicado à Redes ATM. Revista Científica Periódica Telecomunicações, vol. 4, nº. 2, Dezembro, 2001.

[88] BENNETT, J. C. R. et all, Hierarchical Packet Fair Queueing Algorithms. IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 5, issue 5, pp. 675-689, October, 1997.

[89] BENNETT, J. C. R. et all, WF^2Q: Worst-case Fair Weighted Fair Queueing. San Francisco, CA, vol. 1, pp. 120-128, March, 1996.

[90] PAREKH, A. et all, A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks: The Single-Node Case. IEEE/ACM Transactions on Networking, vol. 1, nº. 3, June, 1993.

[91] GIROUX, N. & GANTI, S. Quality of Service in ATM Networks: State-of-Art Traffic Management, Prentice Hall, 1998.

[92] KUROSE, J. F. & ROSS, K. W. Redes de Computadores e a Internet: Uma Nova Abordagem top-down, Addison Wesley, 3ª. Ed., São Paulo, 2006.

[93] NS-2. The Network Simulator. Disponível em: <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acessado em: Abril, 2007.

[94] Módulo WiMAX, versão 2.03. Disponível em: <http://ndsl.csie.cgu.edu.tw/wimax_ns2.php>. Acesso em: setembro, 2007.

[95] No Ad-Hoc Routing Agent (NOAH), Swiss Federal Institute of Technology – Lausanne, Senior Researcher. Disponível em: <http://icapeople.epfl.ch/widmer/uwb/ns-2/noah>. Acessado em: Setembro, 2007.

[96] AHO, A. V. et all, The AWK Programming Language, Addison-Wesley, 1988.

[97] MORAIS, J. P. et all, Plataforma de Configuração e Monitorização de QoS Numa Rede DiffServ, 6ª. Conferência Sobre Redes de Computadores – Protocolos, Tecnologias e Aplicações para Ambientes Móveis (CRC'2003), Instituto Politécnico de Bragança, Bragança, Portugal, Setembro, 2003.

[98] WILLIAMS, T. et all, GNUPLOT, versão 4.2 (revisada em 3 de março de 2007), baseada na versão original revisada por Thomas Williams e Colin Kelley em 1986. Disponível em <http://www.gnuplot.info>. Acessado em: Abril, 2007.

[99] ITU-T, Rec. G.1010: End-user Qos categories, Novembro, 2001.

[100] ITU-T, Rec. G.114: One-way transmission time, Maio, 2000.

[101] SZIGETI, T. & HATTINGH, C. End-to-End QoS Network Design: Quality of Service in LANs, WANs and VPNs. Cisco Press, 2004.

[102] DRASKOVIC, D. High Efficiency Power Amplifiers for WiMAX Transmitter RF Front Ends. Masters Thesis, University of Westminster, London, September, 2006. Disponível em <http://draskod.googlepages.com/mymsc>. Acesso em: Abril, 2007.

[103] ABICHAR, Z. et all, WiMAX: The Emergence of Wireless Broadband, IT Professional, vol. 8, issue 4, pp. 44-48, August, 2006.

[104] SIVCHENKO, D. et all, Internet Traffic Performance in IEEE 802.16 Networks, Proceedings in European Wireless, Athens, Greece, April, 2006.

[105] KESHAV, S. An Enginnering Approach to Computer Networking, Addison-Wesley, 1997.

TRABALHOS PUBLICADOS PELO AUTOR

[106] SILVA, W. B. & GUARDIEIRO, P. R. Um estudo sobre a provisão de qualidade de serviço nas redes de acesso WiMAX. XXV Simpósio Brasileiro de Telecomunicações (SBrT), Recife, PE, Setembro, 2007.

[107] SILVA, W. B. & GUARDIEIRO, P. R. Caracterização da qualidade de serviço em redes de acesso WiMAX. V Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL), Uberlândia, MG, Setembro, 2007.

[108] SILVA, W. B. & GUARDIEIRO, P. R. Verificação da influência do escalonamento WRR no suporte à qualidade de serviço em redes PMP IEEE 802.16. 6th International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS), Brasília, DF, Dezembro, 2007.

[109] SILVA, W. B., TEIXEIRA, M. A. & GUARDIEIRO, P. R. Estudo comparativo de desempenho das disciplinas de escalonamento WRR e WF^2Q no suporte à QoS em redes de acesso WiMAX com mobilidade. Submetido ao 26º. Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC), Rio de Janeiro, RJ, Dezembro, 2007.