

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - UFU

FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



**UM ESTUDO DE ESCALONAMENTO *UPLINK*
CONSIDERANDO A CAMADA FÍSICA OFDM
DO PADRÃO IEEE 802.16**

Antônio Neco de Oliveira

Uberlândia - 2011

Antônio Neco de Oliveira

**UM ESTUDO DE ESCALONAMENTO *UPLINK* CONSIDERANDO A
CAMADA FÍSICA OFDM DO PADRÃO IEEE 802.16**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do
grau de Mestre em Ciências, aprovada em 20 de janeiro
de 2011 pela banca examinadora:

Paulo Roberto Guardieiro, Dr. - Orientador (UFU)

Daniela Vieira Cunha, Dra. (UPM)

Jamil Salem Barbar, Dr. (UFU)

Uberlândia - 2011

Antônio Neco de Oliveira

**UM ESTUDO DE ESCALONAMENTO *UPLINK* CONSIDERANDO A
CAMADA FÍSICA OFDM DO PADRÃO IEEE 802.16**

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

Prof. Paulo Roberto Guardieiro, Dr.
Orientador

Prof. Alexandre Cardoso, Dr.
Coord. de Programa de Pós-graduação

Dedico à minha filha Sarah e aos meus filhos Davi e Murilo.

Agradecimentos

A Deus, por ter me dado força para concluir este trabalho.

À minha esposa Elenita e toda minha família, pelo apoio e compreensão.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Paulo Roberto Guardieiro, pela paciência e preciosa orientação.

Ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e aos professores e servidores da Universidade Federal de Uberlândia.

Ao Instituto Federal Goiano - Campus Morrinhos, pelo incentivo através da política de capacitação dos servidores.

Aos amigos que sempre me apoiaram nesta jornada, em especial: Ana Maria, Odilon Neto, Sebastião Nunes, Eduardo Castilho, Éderson Rosa e Flávio Alves.

A todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

“... antes de tudo, um forte.”

Euclides da Cunha

Resumo

Oliveira, A. N., *Um estudo de escalonamento uplink considerando a camada física OFDM do padrão IEEE 802.16*, UFU, Uberlândia, Brasil, 2011, 117p.

O padrão IEEE 802.16 define as especificações para a camada de controle de acesso ao meio (MAC - *Medium Access Control*) e os parâmetros para a camada física (PHY - *Physical Layer*), os quais possibilitam estruturar a arquitetura para o provimento QoS (*Quality of Service*) às redes de acesso em banda larga sem fio [1, 2]. No entanto, deixa em aberto a forma de implementar as políticas para atender os requisitos de QoS das aplicações dos usuários, como forma de permitir que os fabricantes diferenciem seus produtos para este padrão. Neste trabalho, propõe-se uma análise mais realista do mecanismo de escalonamento *uplink*, baseado na disciplina PQ (*Priority Queue*), considerando os parâmetros da camada física OFDM (*Orthogonal Frequency Division Modulation*) especificados no padrão IEEE 802.16. Para tanto, estende-se o módulo WiMAX descrito em [3] para que o mecanismo de escalonamento *uplink* considere o valor da relação sinal-ruído (SNR - *Signal-to-noise*) indicado na estação cliente e permita a seleção de um esquema de modulação e codificação de acordo com as características do canal de comunicação sem fio. Com isso, um MCS (*Modulation Coding Scheme*) que produza um símbolo OFDM mais resistente às interferências do meio físico, permitirá ao sinal transmitido atingir maior distância entre a SS (*Subscriber Station*) e a BS (*Base Station*), enquanto o MCS mais eficiente permitirá uma maior taxa de dados para o canal de comunicação, codificando mais bits de dados por símbolo OFDM. Este trabalho foi avaliado utilizando a ferramenta de simulação NS-2 (*Network Simulator, version 2*) com o módulo para simulação de redes WiMAX estendido neste trabalho para permitir resultados mais realistas.

Palavras-chave: Escalonamento *uplink*, QoS, OFDM, 802.16.

Abstract

Oliveira, A. N., *A study of uplink scheduling considering the OFDM physical layer of IEEE 802.16 standard*, UFU, Uberlândia, Brasil, 2011, 117p.

The IEEE 802.16 standard defines the specifications for the medium access control layer (MAC) and the parameters for the physical layer (PHY), which allow to structure an architecture for providing Quality of Service (QoS) in the broadband wireless access networks [1, 2]. However, it leaves open how to implement policies to meet the QoS requirements of user applications, so as to enable manufacturers to differentiate their products to this standard. This work, aim a more realistic analysis of the uplink scheduling mechanism, based on discipline Priority Queue (PQ), taking into account the parameters of the OFDM (Orthogonal Frequency Division Modulation) physical layer specified in IEEE 802.16. To do so, it extends the WiMAX module for the uplink scheduling mechanism that considers the value of the signal-to-noise ratio (SNR) shown in the subscriber station (SS) and allow selection of a modulation and coding scheme (MCS) according with the characteristics of wireless communication channel. Thus, an MCS which produces an OFDM symbol more resistant to interference of the physical environment, the transmitted signal will achieve greater distance between the SS (Subscriber Station) and BS (Base Station), while the efficient MCS will allow for more effective data rate for the communication channel, encoded more data bits per OFDM symbol. This work has been evaluated using the simulation tool NS-2 (Network Simulator, version 2) with the simulation module for WiMAX networks extended this work to allow more realistic results.

Keywords: uplink scheduling, QoS, OFDM, 802.16.

Sumário

1	Introdução	23
2	Redes de acesso sem fio padrão IEEE 802.16	26
2.1	Introdução	26
2.2	Estrutura do padrão IEEE 802.16	26
2.2.1	Frequências utilizadas	28
2.2.2	Modelo de referência do padrão IEEE 802.16	29
2.2.2.1	Modelo de referência de gerenciamento	30
2.2.2.2	Modelo de referência de rede	31
2.3	Camada física - PHY	32
2.3.1	Especificações para <i>WirelessMAN-SC PHY</i>	32
2.3.1.1	Modos de operação FDD e TDD	32
2.3.1.2	Estrutura física do <i>frame</i>	34
2.3.1.2.1	<i>Subframe</i> DL	34
2.3.1.2.2	<i>Subframe</i> UL	35
2.3.1.2.3	Subcamada de convergência de transmissão	37
2.3.1.2.4	Subcamada dependente do meio físico	37
2.3.2	Especificações <i>WirelessMAN-SCa</i>	40
2.3.3	Especificações para <i>WirelessMAN-OFDM</i>	40
2.3.3.1	Modulação OFDM	40
2.3.3.2	Descrição do símbolo OFDM no domínio do tempo	42
2.3.3.3	Descrição do símbolo OFDM no domínio da frequência	43
2.3.3.4	Caracterização do símbolo OFDM	43
2.3.3.5	Codificação de canal	44
2.3.3.5.1	Randomização	44

2.3.3.5.2	Codificação para correção de erros	44
2.3.3.5.3	Intercalação	46
2.3.3.5.4	Modulação	46
2.3.3.6	Estrutura do <i>frame</i>	46
2.3.4	<i>WirelessMAN-OFDMA</i>	47
2.3.4.1	Estrutura do <i>frame</i> OFDMA	48
2.3.5	<i>WirelessHUMAN</i>	50
2.4	Camada MAC	50
2.4.1	Subcamada de convergência de serviço específico	51
2.4.1.1	ATM CS	51
2.4.1.2	<i>Packet CS</i>	52
2.4.1.3	Subcamada de convergência de pacotes genéricos	53
2.4.2	Subcamada de parte comum	54
2.4.2.1	Topologia PMP	55
2.4.2.2	Topologia <i>mesh</i>	56
2.4.3	Subcamada de segurança	57
2.5	Considerações finais do capítulo	58
3	Qualidade de serviço no padrão IEEE 802.16	59
3.1	Introdução	59
3.2	Provisão de QoS em redes IEEE 802.16	59
3.2.1	Classes de serviços no padrão IEEE 802.16	61
3.2.1.1	UGS - <i>Unsolicited grant service</i>	62
3.2.1.2	rtPS - <i>Real-time polling service</i>	62
3.2.1.3	nrtPS - <i>Non-real-time polling service</i>	63
3.2.1.4	BE - <i>Best effort</i>	63
3.2.1.5	ertPS - <i>Extended real-time polling service</i>	64
3.2.2	Mecanismos de requisição e alocação de largura de banda	64
3.2.2.1	<i>Request</i> (requisição)	64
3.2.2.2	<i>Grant</i> (concessão)	65
3.2.2.3	<i>Polling</i> (consulta)	65
3.3	Mecanismos para provimento de QoS em redes IEEE 802.16	65
3.3.1	CAC - Controle de admissão de conexões	66

3.3.2	Escalonamento no padrão IEEE 802.16	68
3.4	Classificação dos mecanismos de escalonamento	69
3.4.1	Escalonadores homogêneos	69
3.4.2	Escalonadores heterogêneos ou híbridos	70
3.4.3	Escalonadores mistos ou oportunistas	70
3.5	Principais disciplinas de escalonamento	70
3.5.1	FIFO - <i>First-in-first-out</i> (primeiro que entra é o primeiro que sai) .	70
3.5.2	PQ - <i>Priority queuing</i> (enfileiramento prioritário)	71
3.5.3	RR - <i>Round robin</i> (varredura cíclica)	72
3.5.4	WFQ - <i>Weighted fair queuing</i> (enfileiramento com justiça ponderada)	73
3.5.5	WRR - <i>Weighted round robin</i> (varredura cíclica ponderada)	73
3.5.6	DRR - <i>Deficit round robin</i>	74
3.5.7	WF ² Q - <i>Worst-case fair weighted fair queueing</i>	75
3.5.8	EDF - <i>Earliest deadline first</i>	75
3.6	Escalonadores propostos para WiMAX	76
3.6.1	Escalonador com remoção temporária de pacotes	76
3.6.2	O-DRR - Escalonador oportunista com DRR	76
3.6.3	Escalonador <i>uplink</i> associado com mecanismo de CAC	77
3.6.4	Escalonador <i>cross-layer</i> com suporte a QoS	77
3.6.5	Escalonador híbrido baseado nas disciplinas EDD e WFQ	78
3.6.6	Escalonador com registro de <i>frames</i> em árvore	78
3.6.7	Escalonador adaptativo para tráfego rtPS	79
3.6.8	Esquema adaptativo de alocação de largura de banda	79
3.6.9	Serviço de <i>polling</i> adaptativo	79
3.7	Resumo comparativo das disciplinas de escalonamento	80
3.8	Considerações finais do capítulo	81
4	Um estudo de escalonamento <i>uplink</i> considerando a camada física OFDM do padrão IEEE 802.16	82
4.1	Introdução	82
4.2	Descrição do problema	83
4.3	Solução proposta	83

4.4	Descrições das implementações a serem realizadas para permitir o estudo do escalonamento <i>uplink</i> no padrão IEEE 802.16	85
4.4.1	Inclusão da camada física OFDM ao módulo WiMAX	85
4.4.2	Extensão do mecanismo de escalonamento <i>uplink</i> para utilizar a camada física OFDM	86
4.4.2.1	O módulo WiMAX	87
4.4.2.2	Alterações no módulo WiMAX e no mecanismo de escalonamento para a inclusão da camada física OFDM	88
4.5	Trabalhos relacionados	91
4.6	Considerações finais do capítulo	93
5	Análise de escalonamento <i>uplink</i> considerando a camada física OFDM do padrão IEEE 802.16	95
5.1	Introdução	95
5.2	Descrição do ambiente de simulação	95
5.3	Apresentação e análise dos resultados	97
5.3.1	Cenário 1 - Vazão em ambientes com diferentes MCSs	97
5.3.2	Cenário 2 - Ambiente com tráfego homogêneo	99
5.3.3	Cenário 3 - Ambiente com diferentes tráfegos	100
5.3.4	Cenário 4 - Ambiente com demanda de serviço UGS	102
5.3.5	Cenário 5 - Ambiente com tráfego heterogêneo para estudo dos serviços de tempo real com diferentes MCSs	105
5.4	Considerações finais do capítulo	106
6	Conclusões	108
	Referências Bibliográficas	111

Lista de Figuras

2.1	<i>Modelo de Referência do Protocolo IEEE 802.16 [1]</i>	29
2.2	<i>Modelo de Referência de Gerenciamento de Rede BWA WirelessMAN [2]</i> .	30
2.3	<i>Modelo de Referência de Rede IEEE 802.16 [2]</i>	31
2.4	<i>Exemplo de rajada de alocação de largura de banda FDD [10]</i>	33
2.5	<i>Estrutura do frame TDD [10]</i>	33
2.6	<i>Estrutura do subframe TDD DL [1]</i>	34
2.7	<i>Estrutura do subframe FDD DL [1]</i>	35
2.8	<i>Estrutura do subframe UL [1]</i>	36
2.9	<i>Formato da PDU na TCS [1]</i>	37
2.10	<i>Diagrama conceitual em bloco do canal (transmissão e recepção) [7]</i>	37
2.11	<i>Diagrama lógico da randomização [7]</i>	38
2.12	<i>Constelações: (a) QPSK; (b) 16-QAM; (c) 64-QAM [1]</i>	39
2.13	<i>Símbolo OFDM no domínio do tempo [1]</i>	42
2.14	<i>Símbolo OFDM no domínio da frequência [1]</i>	43
2.15	<i>Processo de codificação do canal [15]</i>	44
2.16	<i>Codificador convolucional [16]</i>	45
2.17	<i>Estrutura do frame OFDM TDD [1]</i>	47
2.18	<i>Subcanais OFDMA [2]</i>	48
2.19	<i>Alocação OFDMA [2]</i>	48
2.20	<i>Estrutura do frame OFDMA no modo TDD [2]</i>	49
2.21	<i>Estrutura do frame OFDMA-FDD genérico [2]</i>	49
2.22	<i>Arquitetura da camada MAC [1, 9]</i>	50
2.23	<i>Formato do ATM CS PDU [1, 2]</i>	51
2.24	<i>Formato da MAC SDU [2]</i>	52
2.25	<i>Classificação e mapeamento CID (BS para SS) [16]</i>	53

2.26	<i>Modelo utilizando a GPCS [2]</i>	54
2.27	<i>Topologia PMP</i>	55
2.28	<i>Formato da MAC PDU com cabeçalho genérico [2]</i>	56
2.29	<i>Topologia Mesh</i>	57
3.1	<i>Mecanismo de alocação de grants uplink UGS [16]</i>	62
3.2	<i>Mecanismo de alocação de grants uplink rtPS [16]</i>	62
3.3	<i>Mecanismo de alocação de grants uplink nrtPS [16]</i>	63
3.4	<i>Mecanismo de alocação de grants uplink BE [16]</i>	64
3.5	<i>Proposta de CAC baseada em reserva de largura de banda [25]</i>	66
3.6	<i>Escalonadores de Pacotes na BS e na SS [28]</i>	68
3.7	<i>Estrutura do frame em IEEE 802.16 utilizando TDD [28]</i>	69
3.8	<i>Abstração da disciplina FIFO [34]</i>	71
3.9	<i>Modelo PQ [34]</i>	71
3.10	<i>Operação da disciplina PQ [34]</i>	72
3.11	<i>Operação da disciplina RR com duas filas [34]</i>	72
3.12	<i>Operação da disciplina WFQ com três filas [34]</i>	73
3.13	<i>Operação da disciplina DRR [28]</i>	74
4.1	<i>Estrutura do Módulo WiMAX base [3]</i>	87
4.2	<i>Símbolo OFDM no domínio do tempo [1, 2]</i>	89
4.3	<i>Símbolo OFDM no domínio da frequência [1, 2]</i>	90
5.1	<i>Posicionamento das SSs em relação à BS e ao MCS utilizado</i>	96
5.2	<i>Vazão na camada MAC por MCS vs. carga de tráfego na rede [60]</i>	98
5.3	<i>Vazão por MCS (calculada vs. simulada) [60]</i>	98
5.4	<i>Vazão média das conexões nrtPS em relação à carga de tráfego aplicada [61]</i>	99
5.5	<i>Percentual de utilização do canal por MCS [61]</i>	100
5.6	<i>Atraso médio das conexões UGS e rtPS vs. carga de tráfego rtPS [61]</i>	101
5.7	<i>Vazão média das conexões nrtPS e BE vs. carga de tráfego rtPS [61]</i>	101
5.8	<i>Atraso médio das conexões UGS vs. a carga de tráfego UGS</i>	102
5.9	<i>Atraso médio das conexões rtPS vs. a carga de tráfego UGS</i>	103
5.10	<i>Vazão média das conexões nrtPS vs. a carga de tráfego UGS</i>	104
5.11	<i>Vazão média das conexões BE vs. a carga de tráfego UGS</i>	104

5.12	<i>Atraso médio das conexões UGS, ertPS e rtPS vs. MCS utilizado</i>	 105
------	--	---------------

Lista de Tabelas

2.1	<i>Evolução do Padrão IEEE 802.16 (versões)</i>	27
2.2	<i>Especificações da interface aérea</i>	28
2.3	<i>Taxas de transmissão em função da largura de banda e modulação utilizadas</i>	39
2.4	<i>Atraso máximo de propagação em diferentes ambientes</i>	42
3.1	<i>Funcionamento da disciplina DRR</i>	74
3.2	<i>Resumo comparativo das disciplinas de escalonamento</i>	80
4.1	<i>Relação entre MCS e Taxa de dados (BW=20 MHz e CP=0,25)</i>	85
4.2	<i>Diferenças entre o módulo WiMAX base e o módulo WiMAX estendido</i>	91
5.1	<i>Parâmetros de Simulação</i>	96

Lista de Abreviaturas e Siglas

ATM	<i>Asynchronous Transfer Mode</i>
BCC	<i>Block Convolutional Code</i>
BE	<i>Best Effort</i>
bps	<i>Bits per second</i>
BPSK	<i>Binary Phase Shift Keying</i>
BS	<i>Base Station</i>
BTC	<i>Block Turbo Coding</i>
BW	<i>Bandwidth</i>
BWA	<i>Broadband Wireless Access</i>
C-SAP	<i>Control SAP</i>
CAC	Controle de Admissão de Conexões
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CC	<i>Convolutional Code</i>
CID	<i>Connection Identifier</i>
CINR	<i>Carrier-to-Interference-and-Noise Ratio</i>
CP	<i>Cyclic Prefix</i>
CPS	<i>Common Part Sublayer</i>
CRC	<i>Cyclic Redundancy Check</i>

CS	<i>Convergence Sublayer</i>
CTC	<i>Convolutional Turbo Codes</i>
DAMA	<i>Demand Assigned Multiple Access</i>
dB	<i>Decibels</i>
DCD	<i>Downlink Channel Descriptor</i>
DFS	<i>Dinamic Frequency Select</i>
DL	<i>Downlink</i>
DL-MAP	<i>Downlink Map</i>
DLFP	<i>Downlink Frame Prefix</i>
DOCSIS	<i>Data Over Cable Service Interface Specifications</i>
DRR	<i>Deficit Round Robin</i>
DSx	<i>Dynamic Service addition, change, or deletion</i>
EC	<i>Encryption Control</i>
EDD	<i>Earliest Due Date</i>
EDF	<i>Earliest Deadline First</i>
EKS	<i>Encryption Key Sequence</i>
ertPS	<i>Extended Real-Time Polling Service</i>
ESF	<i>Extended Subheader Field</i>
EVRC	<i>Enhanced Variable Rate Codec</i>
FCFS	<i>First-Come-First-Served</i>
FCH	<i>Frame Control Header</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i>
FEC	<i>Forward Error Correction</i>

FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FIFO	<i>First-In-First-Out</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
FUSC	<i>Full Usage of Subchannels</i>
GF	<i>Galois Field</i>
GHz	<i>Gigahertz</i>
GPC	<i>Grant Per Connection</i>
GPCS	<i>Generic Packet Convergence Sublayer</i>
GPS	<i>Generalized Processor Sharing).</i>
GPSS	<i>Grant Per SS</i>
HCS	<i>Header Check Sequence</i>
HT	<i>Header Type</i>
HUMAN	<i>High-speed Unlicensed Metropolitan Area Network</i>
ICI	<i>Intercarrier Interference</i>
IDFT	<i>Inverse Discret Fourier Transform</i>
IE	<i>Information Element</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IPv4	<i>Internet Protocol, version 4</i>
IPv6	<i>Internet Protocol, version 6</i>
ISI	<i>Intersymbol Interference</i>
LOS	<i>Line-Of-Sight</i>
M-SAP	<i>Management SAP</i>

MAC	<i>Medium Access Control</i>
MBd	<i>Megabaud</i>
Mbps	<i>Megabits por segundo</i>
MCS	<i>Modulation Coding Scheme</i>
MHz	<i>Megahertz</i>
MIB	<i>Management Information Base</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
MPEG	<i>Moving Pictures Experts Group</i>
MS	<i>Mobile Station</i>
NCMS	<i>Network Control and Management System</i>
NIST	<i>National Institute of Standards and Technology</i>
NLOS	<i>Non-Line-Of-Sight</i>
NMS	<i>Network Management System</i>
NNI	<i>Network-to-Network Interface</i>
nrtPS	<i>Non-Real-Time Polling Service</i>
NS-2	<i>Network Simulator, version 2</i>
O-DRR	<i>Oportunistic - DRR</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PCM	<i>Pulse Coded Modulation</i>
PDU	<i>Protocol Data Unit</i>
PER	<i>Packet Error Rate</i>
PFR	<i>Priority Function Rate</i>

PHS	<i>Payload Header Suppression</i>
PHSF	<i>Payload Header Suppression Field</i>
PHSI	<i>Payload Header Suppression Index</i>
PHSM	<i>Payload Header Suppression Mask</i>
PHSS	<i>Payload Header Suppression Size</i>
PHSV	<i>Payload Header Suppression Valid</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PKM	<i>Privacy Key Management</i>
PMD	<i>Physical Medium Dependent</i>
PMP	<i>Point-to-Multipoint</i>
PQ	<i>Priority Queuing</i>
PRBS	<i>Pseudo-Random Binary Sequence</i>
PS	<i>Physical Slot</i>
PUSC	<i>Partial Usage of Subchannels</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
QPSK	<i>Quadrature Phase-Shift Keying</i>
RF	Radiofrequência
RR	<i>Round Robin</i>
RS-CC	<i>Reed-Solomon - Convolutional Code</i>
RTG	<i>Receive/transmit Transition Gap</i>
rtPS	<i>Real-Time Polling Service</i>
Rx	<i>Receiver</i>

SAP	<i>Service Access Point</i>
SC	<i>Single Carrier</i>
SCa	<i>Single Carrier Access</i>
SDU	<i>Service Data Unit</i>
SFID	<i>Service Flow Identifier</i>
SINR	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>
SNMP	<i>Simple Network Management Protocol</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
SS	<i>Subscriber Station</i>
SSTG	<i>Subscriber Station Transition Gap</i>
TCL	<i>Tool Command Language</i>
TCS	<i>Transmission Convergence Sublayer</i>
TDD	<i>Time Division Duplexing</i>
TDM	<i>Time Division Multiplexing</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TLV	<i>Type/Length/Value</i>
ToS	<i>Type of Service</i>
TTG	<i>Transmit/receive Transition Gap</i>
Tx	<i>Transmit</i>
UCD	<i>Uplink Channel Descriptor</i>
UGS	<i>Unsolicited Grant Service</i>
UL	<i>Uplink</i>
UL-MAP	<i>Uplink Map</i>

UNI	<i>User-to-Network Interface</i>
VC	<i>Virtual Channel</i>
VCI	<i>Virtual Channel Identifier</i>
VoIP	<i>Voz sobre IP</i>
VP	<i>Virtual Path</i>
VPI	<i>Virtual Path Identifier</i>
WF ² Q	<i>Worst-Case Fair Weighted Fair Queueing</i>
WFQ	<i>Weighted Fair Queueing</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WirelessHUMAN	<i>Wireless High-speed Unlicensed Metropolitan Area Networks</i>
WirelessMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Networks</i>
WirelessMAN-SC	<i>Wireless Metropolitan Area Networks - Single Carrier</i>
WirelessMAN-SCa	<i>Wireless Metropolitan Area Networks - Single Carrier access</i>
WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Networks</i>
WRR	<i>Weighted Round Robin</i>

Capítulo 1

Introdução

A comunicação sempre fez parte da vida do ser humano e encontra nas evoluções tecnológicas das redes sem fio um ambiente favorável para o seu desenvolvimento. Nesse contexto, o avanço nas pesquisas tem permitido às indústrias produzirem dispositivos eletrônicos capazes de processar, armazenar e transmitir dados, voz e vídeo através de enlaces de altas velocidades, permitindo acesso rápido à sistemas corporativos e à Internet. Com a evolução das telecomunicações e o aumento significativo do número de computadores portáteis, cada vez mais presentes no dia a dia das pessoas, o uso das redes de acesso banda larga sem fio (BWA - *Broadband Wireless Access*) vem sendo impulsionado em todas as áreas da sociedade, como indústria, comércio e residências.

Dessa forma, o IEEE (*Institute of Electrical and Eletronic Engineers*) define as especificações para as redes BWAs através do padrão IEEE 802.16 [1, 2]. As redes nesse padrão, conhecidas comercialmente por WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), vêm destacando-se como tecnologia promissora por atingir taxa de transmissão de dados acima de 100 Mbps e cobrir um raio de vários quilômetros, características importantes para atender regiões metropolitanas ou áreas rurais sem infraestrutura cabeada. Dentre as facilidades proporcionadas pelas BWAs, destacam-se a integração de redes locais, possibilidade de mobilidade, facilidade de instalação e manutenção, escalabilidade e alto desempenho, fatores que vêm sendo oferecidos pelas redes no padrão IEEE 802.16.

O padrão IEEE 802.16 vem sendo desenvolvido, a partir da formação do grupo de trabalho designado pelo IEEE em 1999, com o objetivo de proporcionar acesso banda larga sem fio para regiões metropolitanas, com um diferencial que é o suporte à qualidade de serviço (QoS - *Quality of Service*). Para tanto, ele define as características da interface

aérea com as especificações para a camada física (PHY - *Physical Layer*) e para a camada de controle de acesso ao meio (MAC - *Medium Access Control*). No entanto, o padrão deixa em aberto a maneira de implementar as políticas para prover QoS às aplicações dos usuários, como forma de permitir que os fabricantes diferenciem seus produtos destinados às redes sem fio nesse padrão.

Diante dessa possibilidade, na literatura encontram-se várias propostas de mecanismos de CAC (controle de admissão de conexões) e de mecanismos de escalonamento de recursos da rede, destinados ao provimento de QoS no padrão IEEE 802.16. Todavia, a maioria dessas propostas migraram de propostas baseadas em redes cabeadas e não consideram a possibilidade de variação das características do meio físico, comuns em redes sem fio de longo alcance, como é o caso das redes WiMAX.

Este trabalho visa analisar o mecanismo de escalonamento *uplink* baseado na disciplina PQ (*Priority Queuing*) apresentado em [4] de uma forma mais realista, considerando as variações das características do meio físico sem fio para permitir melhor aproveitamento dos recursos do canal de comunicação. Para tanto, foi estendido o módulo para simulação de redes WiMAX apresentado em [3], no qual foi incluída a camada física apresentada em [5], que implementa as características OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) e modificado o mecanismo de escalonamento para alocar os recursos do canal de comunicação selecionando o MCS (*Modulation Codec Scheme*) de acordo com o valor da SNR (*signal-to-noise*) indicado pela SS (*Subscriber Station*) no momento em que se registra na rede, e assim permitir ao sinal de radiofrequência maior resistência às interferências do meio físico, melhorando a eficiência do enlace de comunicação sem fio.

Esta dissertação está organizada da seguinte maneira:

O Capítulo 2 apresenta a estrutura das redes de acesso banda larga sem fio padrão IEEE 802.16, as faixas de frequências utilizadas, o modelo de referência e as arquiteturas de rede PMP (*point-to-multipoint*) e Mesh. Também são descritas as múltiplas especificações para a camada física suportada pelo padrão, os modos de operação e as estruturas dos *frames*, bem como as especificações da camada de acesso ao meio físico e sua divisão em subcamadas.

No Capítulo 3 abordam-se os aspectos relativos à qualidade de serviço, com uma descrição dos parâmetros que caracterizam as classes de serviço definidas pelo padrão IEEE 802.16, com uma abordagem dos mecanismos de CAC e de escalonamento utilizados

para o provimento de QoS em redes sem fio. São apresentadas as principais disciplinas de escalonamento e abordadas as propostas de algoritmos de escalonamento para redes WiMAX, dentre elas, propostas *cross-layer* que consideram as características da camada física na tomada de decisão pela camada MAC.

O Capítulo 4 descreve as necessidades de considerar as variações das características do meio físico no processo de alocação de largura de banda e apresenta uma proposta de extensão do módulo WiMAX apresentado em [3]. Dessa forma, o mecanismo de escalonamento baseado na disciplina PQ apresentado em [4] passa a considerar os esquemas de modulação e codificação definidos para a camada física OFDM, permitindo uma análise mais realista de cenários de redes sem fio no padrão IEEE 802.16. Também é apresentada uma lista de trabalhos relacionados ao assunto abordado.

O Capítulo 5 descreve o ambiente de simulação com os principais cenários modelados e analisa os resultados obtidos nos experimentos de simulação utilizando o módulo para simulação de redes WiMAX estendido neste trabalho, considerando as especificações para a camada física OFDM do padrão IEEE 802.16.

No Capítulo 6 apresentam-se as conclusões deste trabalho e as indicações das expectativas para trabalhos futuros.

Capítulo 2

Redes de acesso sem fio padrão IEEE 802.16

2.1 Introdução

O padrão IEEE 802.16 é baseado em um sistema aberto e tem como foco o oferecimento de QoS e a interoperabilidade através de técnicas de transmissão avançadas, em uma arquitetura de interfaces flexíveis e com suporte a múltiplas faixas de frequências de operação, com segurança e mobilidade. Este padrão especifica a interface aérea, incluindo as camadas MAC e PHY, provendo um sistema de múltiplos serviços de acesso em banda larga sem fio (BWA), combinando assinantes fixo e móvel. A camada MAC suporta uma arquitetura ponto-multiponto e está estruturada para suportar múltiplas especificações da camada física, cada uma adaptada para um ambiente operacional particular [1].

Neste capítulo apresenta-se o padrão IEEE 802.16 através das camadas PHY e MAC. A Seção 2.2 traz a estrutura geral do padrão. A Seção 2.3 descreve a camada física. A Seção 2.4 descreve a camada MAC. E a Seção 2.5 apresenta as considerações finais do capítulo.

2.2 Estrutura do padrão IEEE 802.16

O padrão IEEE 802.16 teve início em 1999, com a formação de um grupo designado pelo IEEE para desenvolver os parâmetros globais para acesso sem fio em banda larga para redes metropolitanas. As versões do padrão IEEE 802.16 denominadas de WMAN

(*Wireless Metropolitan Area Networks*) são chamadas comercialmente pelo nome WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) que é uma aliança denominada *WiMAX Forum*, formada por operadores e fabricantes de componentes para sistemas de comunicação, e tem a missão de certificar a compatibilidade e interoperabilidade dos produtos baseados no padrão IEEE 802.16 [6].

Desde sua criação, o padrão IEEE 802.16 passou por várias atualizações de acordo com as novas funcionalidades implementadas para atender as necessidades comerciais, conforme mostradas na Tabela 2.1. Inicialmente, o padrão IEEE-802.16 definia os princípios para o acesso à rede metropolitana em banda larga sem fio para sistemas fixos [1].

Tabela 2.1: *Evolução do Padrão IEEE 802.16 (versões)*

IEEE 802.16	Principais Características Implementadas
IEEE 802.16std-2001	Definição do padrão BWA para operação na faixa de 10 a 66 GHz com linha de visada (LOS - <i>Line-of-sight</i>).
IEEE 802.16a-2003	Frequência de operação de 2 a 11 GHz sem linha de visada (NLOS - <i>Non-Line-Of-Sight</i>), taxa de 100 Mbps e alcance de 50 km.
IEEE 802.16b-2003	Especificações de QoS e uso de frequências não licenciadas de 5-6 GHz.
IEEE 802.16c-2002	Interoperabilidade entre produtos de diferentes fabricantes. Frequências de 10-66 GHz com linha de visada (LOS - <i>Line-Of-Sight</i>).
IEEE 802.16d-2004	Consolidação das revisões a, b e c.
IEEE 802.16-2004	Suporte às antenas MIMO (<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>).
IEEE 802.16e-2005	Suporte à mobilidade e compatibilidade com IEEE 802.16-2004. Frequências: LOS (10-66 GHz) e NLOS (2-11 GHz).
IEEE 802.16f-2005	Modelo de referência de gerenciamento de rede baseado no padrão IEEE 802.16-2004.
IEEE 802.16g-2007	Gerenciamento de redes com a interoperabilidade dos produtos. Padroniza o plano de gerenciamento dos dispositivos fixos e móveis.
IEEE 802.16h-2005	Melhoria nos mecanismos da MAC para habilitar a coexistência com sistemas na mesma faixa de frequência.
IEEE 802.16i-2005	Aumento da mobilidade através de procedimentos de gerenciamento associados às camadas MAC e PHY.
IEEE 802.16j-2009	Extensão no sistema de cobertura para fixo, nômade e móvel.
IEEE 802.16-2009	Engloba todas as alterações implementadas no padrão até o IEEE 802.16j, tornando obsoletas as definições anteriores.
IEEE 802.16m-2010	Em desenvolvimento. Suporte a taxas de transmissão de dados acima de 1 Gbps (fixo) e 100 Mbps (móvel) com velocidade veicular acima de 250 km/h.

Em 2004, o IEEE 802.16-2004 foi apresentado englobando todos os trabalhos até então desenvolvidos (IEEE 802.16, IEEE Std 802.16a e IEEE Std 802.16c) com suas revisões. O suporte à mobilidade com velocidade veicular foi acrescentado em 2005 com a versão IEEE 802.16e-2005, combinando acesso a sistemas de banda larga sem fio fixo e móvel, onde são especificadas as funções para a camada superior suportar mudanças da estação móvel (MS - *Mobile Station*) entre BSs com melhor suporte à qualidade de serviço [7].

Em 2009, foi disponibilizada uma nova revisão para o padrão IEEE 802.16 em substituição às especificações existentes e englobando todas as alterações do padrão até o IEEE 802.16g-2007 [2]. Atualmente, encontram-se em desenvolvimento novas versões. A versão IEEE 802.16m busca taxa de transferência de dados acima de 1 Gbps para assinantes fixos e de 100 Mbps para assinantes móveis, com a capacidade de manter a conexão com mobilidade de 120 a 350 km/h [8].

2.2.1 Frequências utilizadas

O padrão IEEE 802.16 especifica duas faixas de frequências e cinco variantes de interfaces aéreas, conforme mostradas na Tabela 2.2, para serem utilizadas de acordo com a aplicabilidade [2, 7, 9].

Tabela 2.2: *Especificações da interface aérea*

Designação	Aplicabilidade	Duplexação
<i>WirelessMAN-SC</i>	10-66 GHz	TDD ¹ e FDD ²
<i>WirelessMAN-SCa</i>	Bandas licenciadas abaixo de 11 GHz	TDD e FDD
<i>WirelessMAN-OFDM</i>	Bandas licenciadas abaixo de 11 GHz	TDD e FDD
<i>WirelessMAN-OFDMA</i>	Bandas licenciadas abaixo de 11 GHz	TDD e FDD
<i>WirelessHUMAN</i>	Bandas não licenciadas abaixo de 11 GHz	TDD

A faixa de frequência licenciada de 10-66 GHz proporciona um meio físico que, devido à alta frequência e ao pequeno comprimento de onda, requer uma linha de visada (LOS) na qual os efeitos da propagação multipercurso são desprezíveis. Utiliza uma largura de banda típica de 25 MHz ou 28 MHz com taxa de dados brutos acima de 120 Mbps e uma modulação de portadora única com as especificações da interface aérea denominada WirelessMAN-SC (*Wireless Metropolitan Area Networks - Single Carrier*) [1, 9]. Esse

¹*Time Division Duplexing*

²*Frequency Division Duplexing*

meio é adequado para acesso PMP (*point-to-multipoint*) e destinado a usuários domésticos e pequenos escritórios com volume médio de aplicações.

A faixa de frequência abaixo de 11 GHz não requer linha de visada (LOS) devido ao grande comprimento de onda. Porém, para suportar NLOS, os cenários requerem funcionalidades avançadas, tais como: gerenciamento de energia, atenuação de interferências e múltiplas antenas.

Para as frequências não licenciadas, principalmente entre 5 e 6 GHz, a regulamentação define limites para potência radiada, com mecanismos de seleção de frequência dinâmica (DFS - *Dynamic Frequency Select*) para facilitar a detecção, anulação e a prevenção de interferências prejudiciais a outros usuários, incluindo o espectro específico do usuário identificado pela regulamentação.

2.2.2 Modelo de referência do padrão IEEE 802.16

O modelo de referência do padrão IEEE 802.16 compreende um plano de gerenciamento composto pelas entidades de gerenciamento e um plano de controle/dados formado pelas camadas PHY e MAC, conforme Figura 2.1 [1].

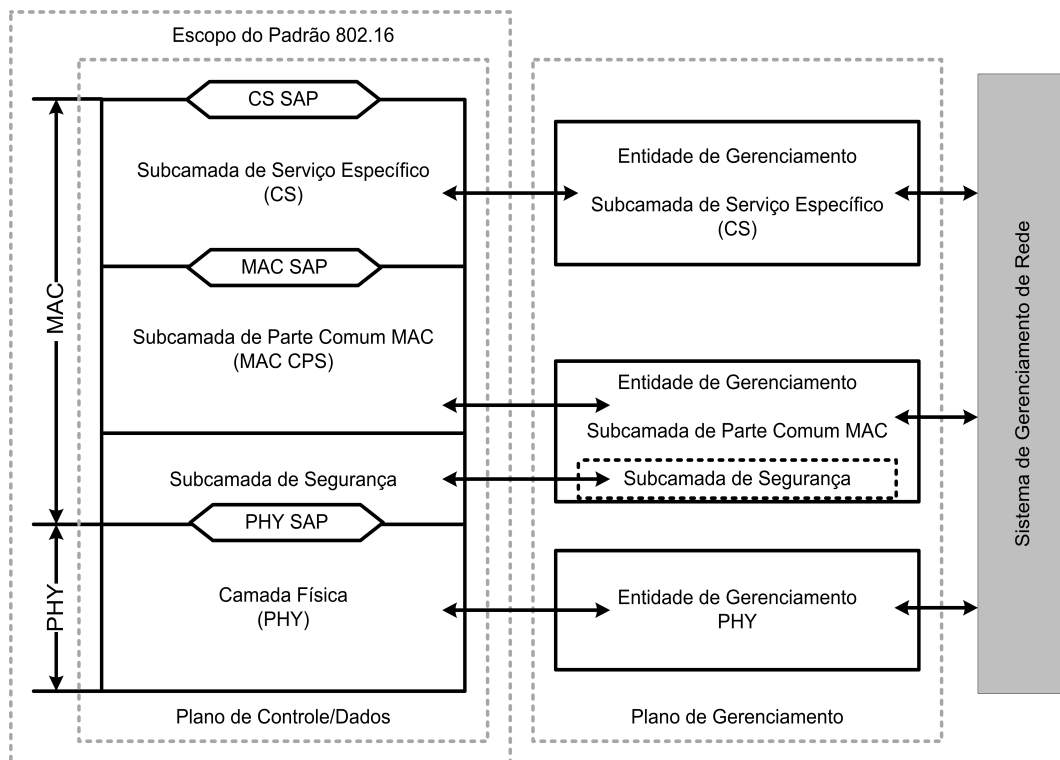


Figura 2.1: Modelo de Referência do Protocolo IEEE 802.16 [1]

A camada física consiste de duas subcamadas: a subcamada dependente do meio físico

negocia a transmissão atual e a subcamada de convergência de transmissão encarrega-se de ocultar, para a camada MAC, as diferentes tecnologias de transmissão [2]. As especificações da camada física são apresentadas na seção 2.3.

A camada MAC está dividida em três subcamadas: (1) a subcamada de convergência de serviços específicos (CS - *Service-Specific Convergence Sublayer*) faz a interface com a rede externa; (2) a subcamada de parte comum (CPS - *Common Part Sublayer*) controla as funcionalidades de acesso ao sistema, alocação de largura de banda e estabelecimento e manutenção das conexões; (3) a subcamada de segurança provê autenticação através de chave de segurança e criptografia [1, 2]. Os detalhes da camada MAC são apresentados na seção 2.4.

2.2.2.1 Modelo de referência de gerenciamento

Consiste de um sistema de gerenciamento de rede NMS (*Network Management System*), um gerenciador de nós e um sistema de controle da rede, conforme mostrado na Figura 2.2 [2].

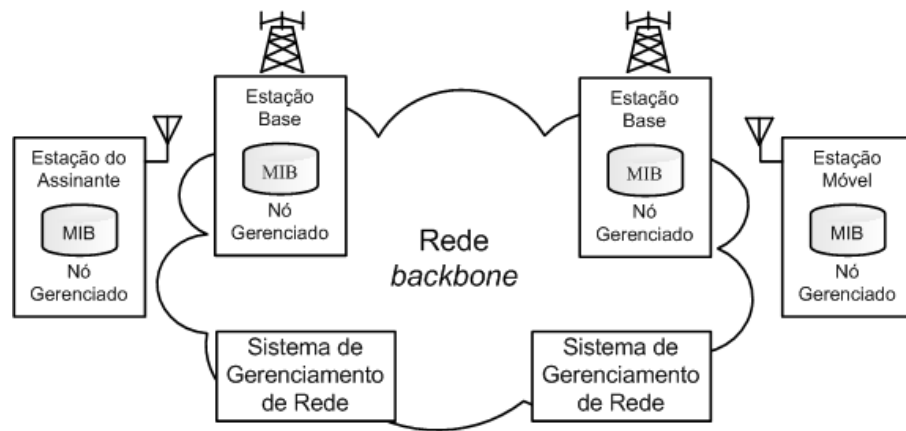


Figura 2.2: *Modelo de Referência de Gerenciamento de Rede BWA WirelessMAN* [2]

O controlador de nós, como BS, MS e SS, coleta e armazena os objetos gerenciados no formato de *WirelessMAN Interface MIB* e dispositivos MIB que são criados e disponibilizados para os NMSs via protocolos de gerenciamentos, como o SNMP (*Simple Network Management Protocol*). Um Sistema de Controle de Rede contém os fluxos de serviços associados às informações de QoS que podem ser propagados para a BS quando uma SS ou MS entrar na rede da BS. As informações de gerenciamento entre SS/MS e BS são transportadas sobre uma conexão de gerenciamento secundária para gerenciar SS ou MS. Se a conexão de gerenciamento secundária não existir, as mensagens SNMP ou outras

mensagens de protocolos de gerenciamento podem seguir por outra interface no cliente ou sobre a conexão de transporte da interface aérea [2].

2.2.2.2 Modelo de referência de rede

Múltiplas SSs ou MSs podem ser conectadas à BS comunicando-se sobre uma interface U^1 usando uma conexão de gerenciamento primária, uma conexão básica ou uma conexão de gerenciamento secundária. A Figura 2.3 descreve o modelo de rede simplificado [2].

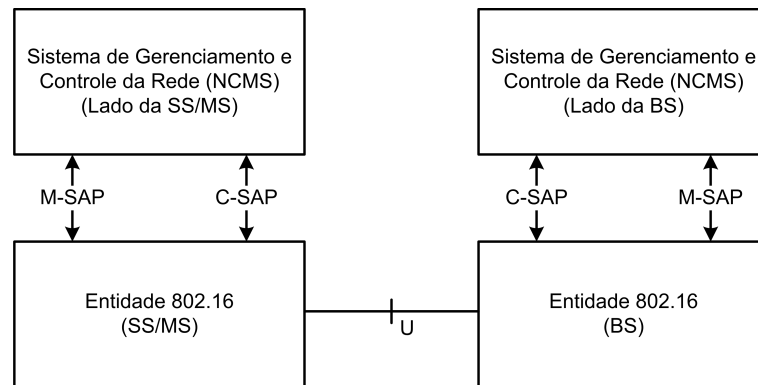


Figura 2.3: *Modelo de Referência de Rede IEEE 802.16 [2]*

Para as interfaces da BS e da SS/MS, o padrão observa as seguintes correlações:

- MAC PDUs de gerenciamento que são trocadas nas conexões de gerenciamento básicas ligam ou são ligadas por primitivas trocadas sobre C-SAP;
- MAC PDUs de gerenciamento que são trocadas nas conexões primárias ligam ou são ligadas por primitivas que são trocadas sobre seus C-SAP ou M-SAP dependendo do gerenciamento ou da operação de controle;
- Mensagens que são trocadas sobre conexões de gerenciamento secundárias ligam ou são ligadas por primitivas que são trocadas sobre o M-SAP.

A interface entre a entidade IEEE 802.16 e a NCMS é formada por um conjunto de SAPs (*Service Access Point*) composto por duas partes: a M-SAP (*Management-SAP*) é usada por primitivas do plano de gerenciamento não sensível ao tempo, como configuração do sistema e monitoramento estatístico; a C-SAP (*Control-SAP*) é usada por primitivas do

¹U: interface de controle e gerenciamento que existe entre a SS e a BS sobre a interface aérea.

plano de controle sensível ao tempo e que suporta *handovers*², gerenciamento do contexto de segurança, gerenciamento dos recursos de rádio, como operações em baixa potência [2].

2.3 Camada física - PHY

A camada física no padrão IEEE 802.16 é responsável pela transmissão das MAC PDUs no meio físico. Para tanto, são definidos espectros de frequência, técnicas de modulação e codificação adaptativas para a transmissão digital, técnicas de duplexação e correção de erros, além da construção dos *frames* e *subframes*, e cinco especificações para a camada física de acordo com a aplicabilidade [2, 7].

2.3.1 Especificações para *WirelessMAN-SC PHY*

Definem os parâmetros para a faixa de frequência de 10-66 GHz, com um alto grau de flexibilidade para permitir aos prestadores de serviços otimizar as implementações com referência a custo, compatibilidade do rádio e capacidade do sistema. Opera no formato de *frames* (quadros), que são divididos em *subframe* DL (*downlink*) para o envio de dados da BS para as SSs e *subframe* UL (*uplink*) para o envio de dados das SSs para a BS. São suportadas técnicas de duplexação TDD e FDD, com as transmissões em rajadas e esquemas de modulação e codificação adaptativos de acordo com as condições do canal de comunicação, ajustáveis individualmente para cada SS, *frame* a *frame*.

O canal *uplink* é baseado na combinação de TDMA (*Time Division Multiple Access*) e DAMA (*Demand Assigned Multiple Access*), dividido internamente em *slots* de tempo atribuídos para uso diverso (registro, contenção, guarda ou tráfego do usuário), os quais são controlados pela MAC na BS. O canal *downlink* é TDM (*Time Division Multiplexing*), e as informações para cada SS são multiplexadas em um único *streaming* de dados que é recebido por todas SSs dentro do mesmo setor. A porção TDMA do DL permite às SSs suportarem *half-duplex* FDD [1].

2.3.1.1 Modos de operação FDD e TDD

O modo de operação FDD (*Frequency Division Duplexing*) utiliza frequências separadas para os canais *uplink* e *downlink*. A transmissão em rajadas facilita o uso de diferentes

²*Handovers*: processo no qual uma MS migra de uma interface aérea provida por uma BS para outra interface aérea provida por outra BS.

tipos de modulação e permite que o sistema suporte simultaneamente SSs *full-duplex*³ e *half-duplex*⁴, conforme ilustrado na Figura 2.4 [10].

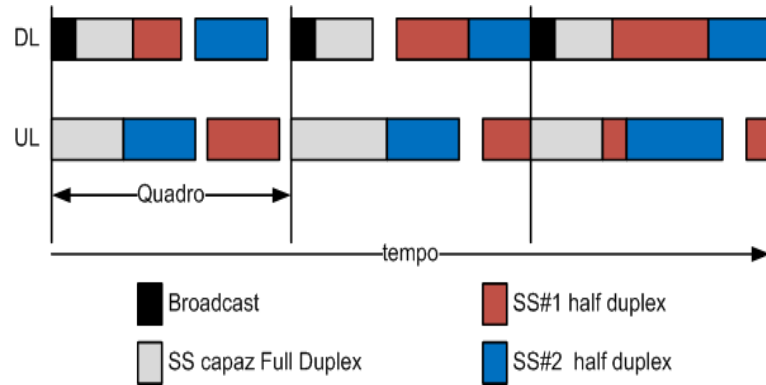


Figura 2.4: *Exemplo de rajada de alocação de largura de banda FDD [10]*

No caso de TDD (*Time Division Duplexing*), as transmissões *uplink* e *downlink* compartilham a mesma frequência, mas estão separadas no tempo. O *frame* TDD também tem uma duração fixa e permite ajustar as porções atribuídas aos *subframes* DL e UL de acordo com as necessidades da rede, conforme ilustrado na Figura 2.5 [10].

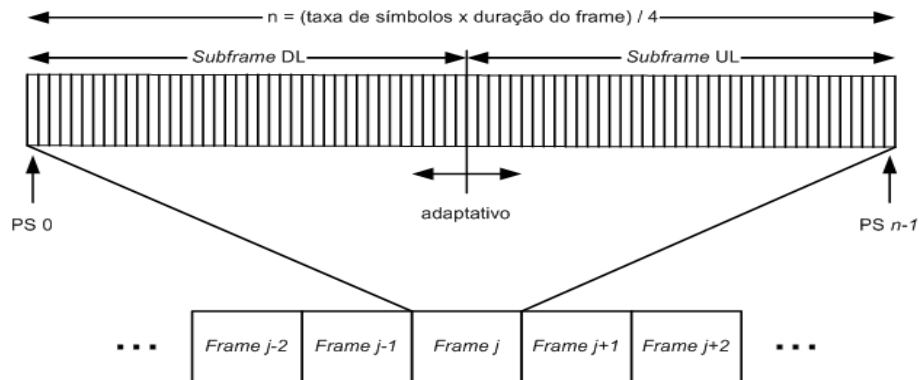


Figura 2.5: *Estrutura do frame TDD [10]*

O *subframe* DL vem primeiro e entre o DL e o UL existe um TTG (*Transmit/receive Transition Gap*) que é um tempo para permitir que a BS alterne do modo transmissor para o modo receptor, ajustando a antena para atuar no modo de recepção do *subframe* UL. Da mesma forma, existe um tempo RTG (*Receive/transmit Transition Gap*) entre o UL e o DL seguinte para permitir que a BS alterne do modo receptor para modo transmissor e ajuste a antena para atuar no modo de transmissão.

³*Full-duplex*: SSs podem transmitir e receber simultaneamente.

⁴*Half-duplex*: SSs transmitem e recebem em tempos diferentes.

2.3.1.2 Estrutura física do *frame*

A largura de banda disponível na direção DL é definida em relação a um PS (*Physical Slot*) e na direção UL, em *minislot*. O tamanho do *minislot* é 2^m PSs (m varia de 0 a 7). O número de PSs em cada *frame* é em função da taxa de símbolo que é selecionada para obter um número inteiro de PSs dentro de cada *frame*. Por exemplo, com uma taxa de símbolo de 20 MBd, existem 5000 PSs dentro de um *frame* de 1 ms [1, 2].

2.3.1.2.1 Subframe DL

O *subframe* DL usando TDD, como mostrado na Figura 2.6, inicia com um preâmbulo utilizado pela PHY para sincronização e equalização, seguido pela seção de controle do *frame* contendo DL-MAP⁵ e UL-MAP⁶ indicando os *slots físicos* de início das rajadas de dados [1].

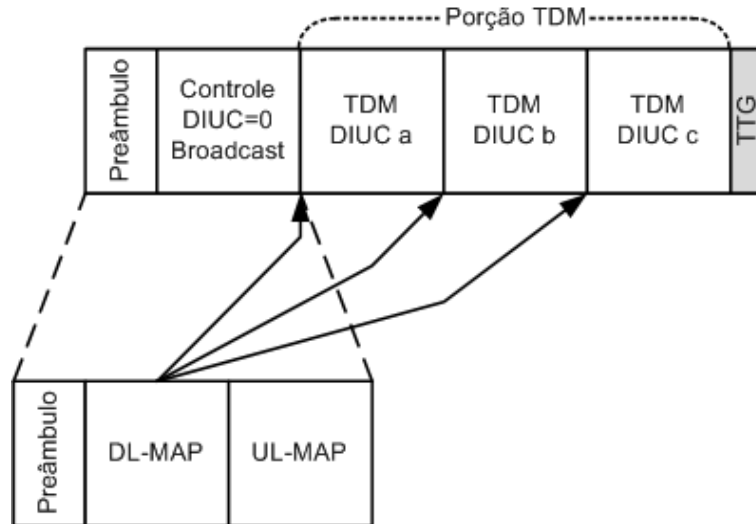


Figura 2.6: Estrutura do subframe TDD DL [1]

Na sequência, as porções TDM carregam os dados organizados em rajadas de diferentes perfis de modulação, que são transmitidas em ordem decrescente de robustez, iniciando pela modulação QPSK⁷ (*Quadrature Phase-Shift Keying*) seguida por 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) e depois por 64-QAM. Cada SS recebe e decodifica as informações de controle do DL (DL-MAP) para identificar a posição de seus dados no *subframe* DL.

⁵DL-MAP: mapa de *downlink* indicando o início das rajadas de dados para as SSs.

⁶UL-MAP: mapa de *uplink* indicando o instante que as SSs poderão transmitir suas rajadas.

⁷A modulação QPSK codifica dois bits por símbolo, proporcionando um símbolo mais resistência às interferências do meio físico.

Usando FDD, o *subframe* DL inicia com um preâmbulo, seguido por uma seção de controle de *frame* e uma porção TDM organizadas em rajadas e transmitidas em ordem decrescente de robustez, como mostrado na Figura 2.7 [1]. A porção TDM do *subframe* DL contém os dados transmitidos a uma ou mais das seguintes:

- SSs *full-duplex*;
- SSs *half-duplex* escalonadas para transmitir posteriormente no *frame* corrente;
- SSs *half-duplex* não escalonadas para transmitir neste *frame*.

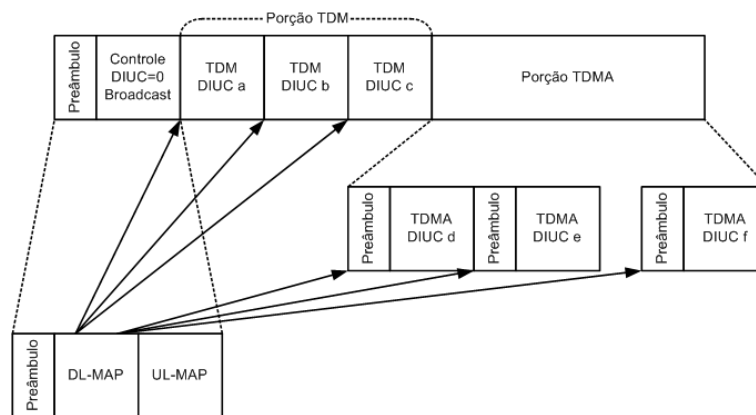


Figura 2.7: Estrutura do *subframe* FDD DL [1]

O *subframe* FDD DL continua com uma porção TDMA usada para transmitir dados para quaisquer SSs *half-duplex* escalonadas para transmitir no *frame* corrente. Na porção TDMA, cada rajada começa com o preâmbulo para ressincronização de fase e não precisa ser ordenada pelo perfil de modulação. A Seção de controle do *frame* FDD inclui um mapa de ambas as rajadas TDM e TDMA, com as informações de controle não criptografadas, usando um perfil de rajada com modulação QPSK para todas as SSs.

As seções de dados DL são usadas para transmitir dados e mensagens de controle para SSs específicas. Os dados são sempre codificados usando FEC (*Forward Error Correction*) e transmitidos na modulação da operação atual de cada SS.

2.3.1.2.2 Subframe UL

A estrutura do *subframe* UL usada pela SS para transmitir dados para a BS é mostrada na Figura 2.8 , sobre a qual podem ser transmitidas três classes de rajadas [1]:

- Rajadas transmitidas nas oportunidades de contenção reservadas para a SS realizar a entrada na rede (*Initial Ranging*).

- Rajadas transmitidas nas oportunidades de contenção destinadas para respostas às consultas *multicast* e *broadcast*, definidas pelo intervalo de requisição (*Request Interval*).
- Rajadas transmitidas em intervalos definidos pelos elementos de informação de permissão de dados (*Data Grant IEs*) atribuídos especificamente a cada SS.

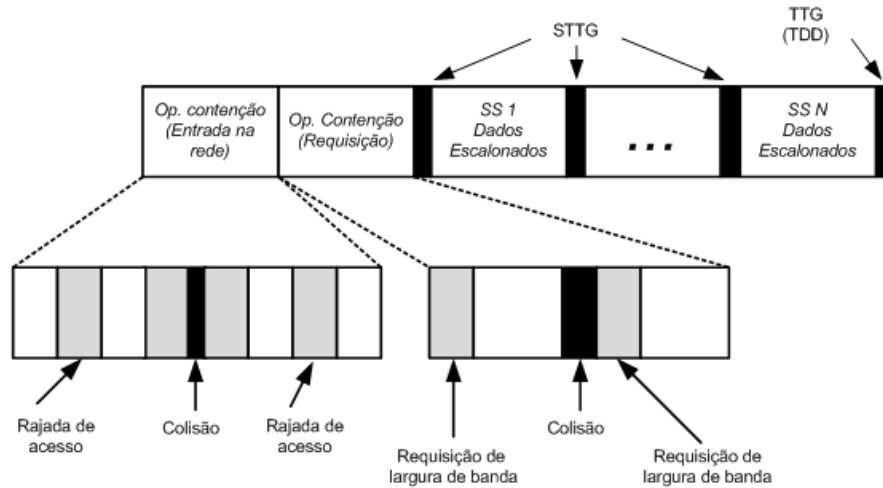


Figura 2.8: *Estrutura do subframe UL [1]*

Qualquer uma destas classes de rajadas pode estar presente em qualquer *frame*, podendo ocorrer em qualquer ordem e em qualquer quantidade dentro do *frame* (limitada pelo número de PSs disponíveis), a critério do escalonador UL da BS como indicado pelo UL-MAP na seção de controle de *frame* [11].

Os slots alocados para oportunidades de contenção, destinados para as SSs entrarem na rede e requisitar largura de banda, podem ser agrupados e sempre utilizados com os perfis de rajadas especificados para *Initial Ranging Intervals* e *Request Intervals*, respectivamente. Os *slots* restantes são agrupados para transmissão de dados pelas SSs.

Durante o escalonamento de largura de banda, uma SS transmite com o perfil de rajada especificado pela BS. No decorrer do *subframe UL*, separando as transmissões das SSs, encontram-se os SSTGs (*Subscriber Station Transition Gaps*). O *gap* permite o desaceleração da rajada anterior e é seguido por um preâmbulo para permitir à BS sincronizar com uma nova SS.

2.3.1.2.3 Subcamada de convergência de transmissão

A TCS (*transmission convergence sublayer*) encarrega-se de ocultar as diferentes tecnologias de transmissão para a camada MAC. A carga útil (*payload*) é segmentada em blocos de dados projetados para caberem no tamanho da palavra codificada, com o comprimento podendo variar de acordo com a palavra codificada. Um *byte* de ponteiro deve ser adicionado a cada segmento de carga útil, como ilustrado na Figura 2.9, para identificar o número de *bytes* no pacote e indicar o início do primeiro MAC PDU do pacote ou o início de qualquer *byte* de enchimento que antecede o próximo MAC PDU [1].

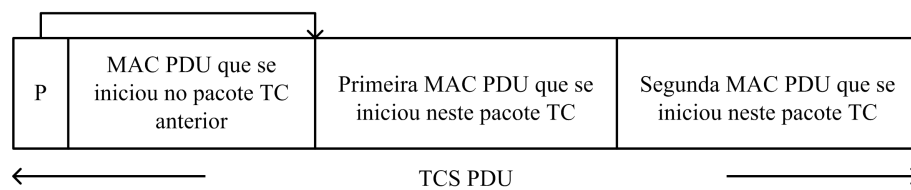


Figura 2.9: *Formato da PDU na TCS [1]*

Se não for MAC PDU ou *bytes* de enchimento do pacote CS, então o *byte* de ponteiro é definido para 0. Quando não há dados disponíveis para transmitir, um *byte* de enchimento com o valor (0xff) deve ser utilizado [12].

2.3.1.2.4 Subcamada dependente do meio físico

A Figura 2.10 mostra um diagrama em blocos da subcamada dependente do meio físico (PMD - *physical medium dependent*), utilizada nos canais de DL e UL, encarregada da preparação dos dados para a transmissão no meio físico, executando os processos de randomização, codificação e modulação, com o canal DL suportando perfis de rajadas adaptativos na porção de dados do frame [7].

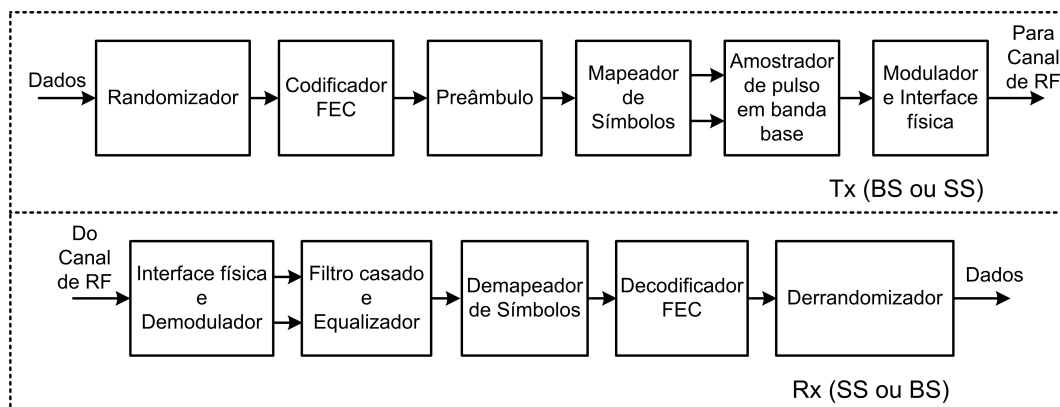


Figura 2.10: *Diagrama conceitual em bloco do canal (transmissão e recepção) [7]*

Randomização

O processo de randomização minimiza a possibilidade de transmissão de uma portadora não modulada e garante um número suficiente de transições de *bits* para suportar a recuperação do relógio. O fluxo de pacotes é randomizado por adição módulo-2 dos dados com a saída do gerador de sequência binária pseudo-aleatória (PRBS - *pseudo-random binary sequence*), conforme ilustrado na Figura 2.11 [7].

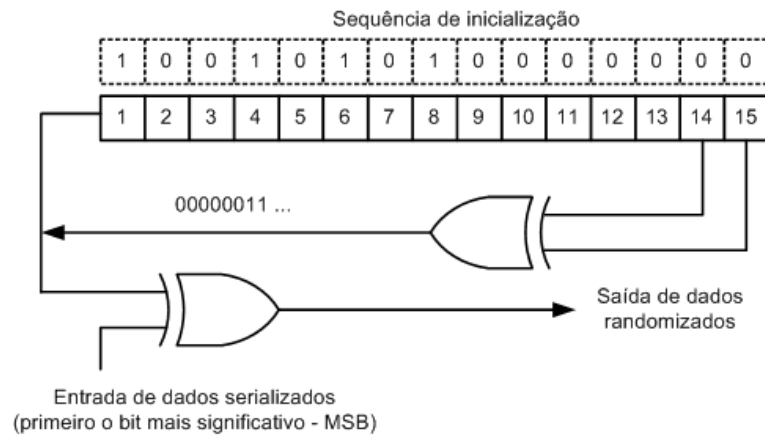


Figura 2.11: Diagrama lógico da randomização [7]

O polinômio gerador para o PRBS é $c(x) = x^{15} + x^{14} + 1$. No início de cada rajada, o PRBS é carregado com uma semente randomizante 100101010000000 que é utilizada para calcular os *bits* randomizados, combinados em uma operação XOR com o fluxo de *bits* serializado de cada rajada.

Codificação FEC

O esquema empregado para a correção de erros (FEC - *forward error correction*) varia conforme a taxa de dados, o tamanho dos blocos de dados e a relação sinal-ruído do enlace. Dessa forma, são suportados quatro tipos de codificação: *Reed-Solomon* (RS), *Reed-Solomon* combinado com Código Convolutacional (RS-CC), *Reed-Solomon* e verificação de paridade, e codificação turbo bloco (BTC - *Block Turbo Code*) [2].

A sessão de controle do *frame* no *downlink* é codificada por um RS-CC com um conjunto fixo de parâmetros conhecidos na inicialização das SSs e utiliza a modulação com mudança de fase em quadratura (QPSK) para assegurar que todas as SSs possam ler a informação. Após a codificação e a inclusão do preâmbulo, os dados são mapeados para símbolos e os pulsos amostrados em banda base para serem modulados.

Modulação DL/UL

A camada física utiliza um esquema de modulação multinível, selecionado em função da qualidade do canal de radiofrequência para maximizar o seu uso. Se as condições do canal permitirem, pode ser utilizado um esquema de modulação que proporcione maior eficiência na transmissão dos dados. No entanto, se o canal degradar com o tempo, o sistema pode reverter para um esquema de modulação mais robusto, permitindo a transferência confiável de dados. A Figura 2.12 mostra as constelações dos mapas de *bits* para as modulações QPSK, 16-QAM e 64-QAM.

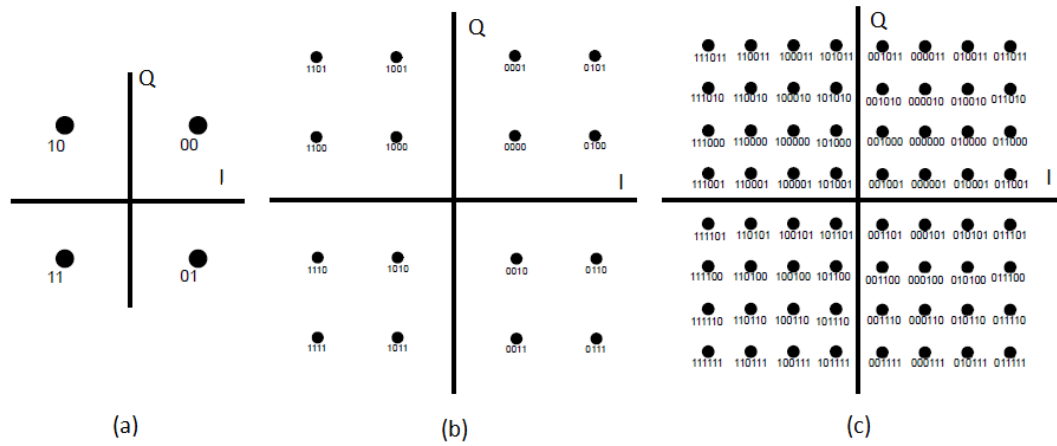


Figura 2.12: Constelações: (a) QPSK; (b) 16-QAM; (c) 64-QAM [1]

No DL, a BS deve utilizar as modulações QPSK, 16-QAM e, opcionalmente, 64-QAM. No canal UL, a modulação é variável e configurada pela BS, sendo suportada QPSK, enquanto 16-QAM e 64-QAM são opcionais. A sequência de *bits* de modulação deve ser mapeada em uma sequência de símbolos de modulação $S(k)$, onde k é o número de símbolos correspondentes. O número de *bits* por símbolo (n) depende do tipo de modulação. Para QPSK, $n = 2$; para 16-QAM, $n = 4$, e para 64-QAM, $n = 6$. A Tabela 2.3 mostra as taxas de transmissão em função da largura de banda e modulações utilizadas.

Tabela 2.3: Taxas de transmissão em função da largura de banda e modulação utilizadas

Largura de banda do canal (MHz)	Taxa de Símbolos (MBaud)	Taxa do canal (Mbps)		
		QPSK	16-QAM	64-QAM
20	16	32	64	96
25	20	40	80	120
28	22,4	44,8	89,6	134,5

Quanto maior a largura de banda do canal, maior será a taxa de transmissão. Para uma largura de banda de 20 MHz é possível alcançar uma taxa de transmissão de 96 Mbps, enquanto que a taxa de transmissão de 134,5 Mbps pode ser atingida com uma largura de banda de 28 MHz [1].

2.3.2 Especificações *WirelessMAN-SCa*

As especificações para *WirelessMAN-SCa* baseiam-se em uma tecnologia que utiliza modulação de portadora única (*SCa - Single Carrier access*) e são designadas para operações NLOS em bandas de frequências licenciadas abaixo de 11 GHz. As larguras de banda permitidas para o canal são limitadas às larguras de bandas regulamentadas, divididas por qualquer potência de 2, não inferior a 1,25 MHz [1]. Essas especificações de camada física inclui os seguintes elementos:

- Definições TDD e FDD, utilizando TDMA no *uplink* e TDM ou TDMA no *downlink*;
- Modulação e codificação adaptativas para *uplink* e *downlink*;
- Estrutura do frame com melhor equalização e desempenho na estimação do canal sobre NLOS;
- Granularidade da rajada em unidade de PS;
- Modos robustos para operação com baixa CINR (*Carrier-to-Interference-and-Noise Ratio*).

2.3.3 Especificações para *WirelessMAN-OFDM*

As especificações para *WirelessMAN-OFDM* são baseadas na modulação OFDM e designadas para operações sem linha de visada (NLOS) em bandas de frequências abaixo de 11 GHz, com o símbolo OFDM formado por 256 subportadoras. O controle de acesso ao meio é através da técnica TDMA (*Time Division Multiple Access*), sendo mandatória em bandas não licenciadas.

2.3.3.1 Modulação OFDM

OFDM é uma técnica de modulação multiportadora, espectralmente eficiente, que se baseia na ideia de dividir um fluxo de dados de alta taxa de *bits* em vários fluxos de dados

de baixa taxa de *bits* em paralelo e cada fluxo modula portadoras separadas, denominadas de subportadoras [13].

Em canais de comunicação que proveem altas taxas de dados, nos quais o tempo do símbolo torna-se menor que o atraso do sinal por dispersão, a comunicação será afetada pela interferência intersimbólica (ISI - *Intersymbol Interference*). A técnica de modulação OFDM busca eliminar ou minimizar a ISI, fazendo o tempo do símbolo maior que o atraso por dispersão. Para tanto, divide o fluxo de dados de alta taxa de *bits* em vários fluxos paralelos de baixas taxas de *bits*, aumentando a duração do símbolo OFDM de tal forma que o atraso por dispersão torna-se apenas uma pequena fração da duração do símbolo, insignificante quando for menor que 10% da duração do símbolo.

Para eliminar a interferência interportadora (ICI - *Intercarrier Interference*), as subportadoras são selecionadas de modo que todas elas sejam ortogonais entre si durante o período do símbolo. Assim, a frequência da primeira subportadora é definida para gerar um número inteiro de ciclos durante o período do símbolo, definindo o espaçamento entre as subportadoras adjacentes. Para assegurar a ortogonalidade durante o período do símbolo, a largura de banda das subportadoras será dada pela equação 2.1.

$$B_{SC} = \frac{B}{L} \quad (2.1)$$

Onde:

B_{SC} - Largura de banda das subportadoras.

B - Largura de banda nominal.

L - Número de subportadoras.

O sinal OFDM é equivalente à transformada inversa discreta de *Fourier* (IDFT - *Inverse Discret Fourier Transform*) para facilitar a implementação de transmissores e receptores OFDM discretizados no tempo, utilizando IFFT (*inverse fast Fourier transform*) e FFT, respectivamente.

O tamanho da FFT, deve manter o equilíbrio entre proteção contra a ISI, a ICI e custo/complexidade. Para uma dada largura de banda, um tamanho grande da FFT reduz o espaçamento entre as subportadoras e aumenta o tempo do símbolo. Isso facilita a proteção contra a interferência intersimbólica provocada pelo atraso na propagação, mas deixa o sistema vulnerável às interferências interportadoras devido ao efeito Doppler [13].

A fim de eliminar completamente a ISI, são utilizados intervalos de guarda entre os

símbolos OFDM. Pela criação do intervalo de guarda maior do que o atraso esperado na propagação por múltiplos percursos, a ISI pode ser completamente eliminada. No entanto, adicionando um intervalo de guarda, implica em desperdício de energia e uma diminuição da eficiência da largura de banda [13].

2.3.3.2 Descrição do símbolo OFDM no domínio do tempo

A Figura 2.13 ilustra a estrutura do símbolo OFDM no domínio do tempo. T_b representa o tempo útil do símbolo OFDM e T_g corresponde ao tempo de guarda, o qual é formado por uma cópia do último período útil do símbolo e é determinado utilizando o prefixo cíclico (CP - *Cyclic Prefix*). O T_g é utilizado para permitir a ortogonalidade das subportadoras e eliminar as interferências intersimbólicas e interportadoras.

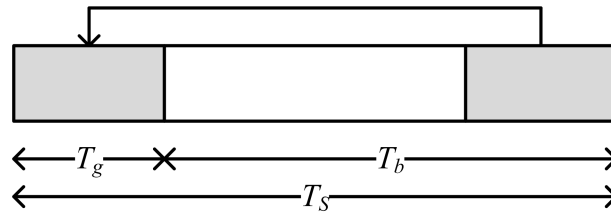


Figura 2.13: *Símbolo OFDM no domínio do tempo [1]*

Com a inclusão do T_g entre os símbolos OFDM, a energia para transmitir o símbolo aumenta enquanto a energia no receptor permanece a mesma pelo descarte da extensão cíclica, causando uma perda em dB dada por $10 * \log(1 - \frac{T_g}{T_s})$. Dessa forma, torna-se necessário selecionar um CP que proporcione um tempo de guarda maior do que o atraso de propagação máximo e que ofereça uma menor perda, conforme os valores definidos na Tabela 2.4 [14].

Tabela 2.4: *Atraso máximo de propagação em diferentes ambientes*

Tipo de ambiente	Atraso de propagação máximo (μs)
Pequenos locais (casas, escritórios)	$< 0,1$
Grandes locais (shoppings, fábricas)	$< 0,2$
Áreas abertas	$< 0,2$
Áreas suburbanas (LOS)	$0,2 - 1,0$
Áreas suburbanas (NLOS)	$0,4 - 2,0$
Áreas urbanas	$1,0 - 3,0$

O valor do CP utilizado pela BS é identificado pela SS durante a inicialização e aplicado no *uplink* para todas as conexões.

2.3.3.3 Descrição do símbolo OFDM no domínio da frequência

No domínio da frequência, um símbolo OFDM é criado sobre as subportadoras que são determinadas pelo tamanho da FFT utilizada [1]. Há três tipos de subportadoras, conforme Figura 2.14.

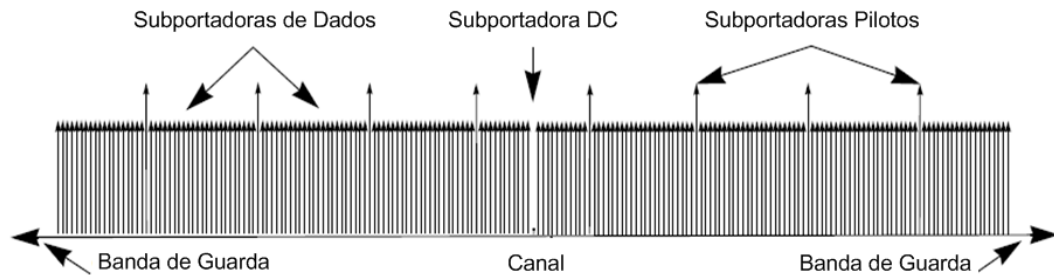


Figura 2.14: *Símbolo OFDM no domínio da frequência [1]*

- Subportadoras de dados: são utilizadas para transmissão de dados;
- Subportadoras pilotos: são utilizadas para vários propósitos de estimação, controle de potência e sincronismo;
- Subportadoras DC: são utilizadas para banda de guarda, dentro de um canal banda larga.

O objetivo das bandas de guarda é habilitar o sinal para cair naturalmente e criar a definição da FFT.

2.3.3.4 Caracterização do símbolo OFDM

São definidos os seguintes parâmetros para determinar o tempo do símbolo OFDM:

- BW: largura de banda nominal do canal;
- N_{user} : número de subportadoras utilizadas para dados;
- n: fator de amostragem que determina o espaçamento das subportadoras e o tempo útil do símbolo;
- g: é o fator que definirá o tempo de guarda através do CP (prefixo cíclico);
- N_{FFT} : número total de subportadoras;

- Frequência de amostragem: $F_S = \text{floor}(n * BW/8000) * 8000$;
- Espaçamento das subportadoras: $\Delta_f = F_S/N_{FFT}$;
- Tempo útil do símbolo: $T_b = 1/\Delta_f$;
- Tempo de guarda: $T_g = g * T_b$;
- Tempo do símbolo OFDM: $T_S = T_b + T_g$;
- Tempo de amostragem: T_b/N_{FFT} .

2.3.3.5 Codificação de canal

A codificação de canal pode ser descrita como a transformação de sinais para melhorar o desempenho da comunicação, aumentando a resistência do sinal transmitido contra a interferência de ruído e desvanecimento, conforme mostra a Figura 2.15 [15].

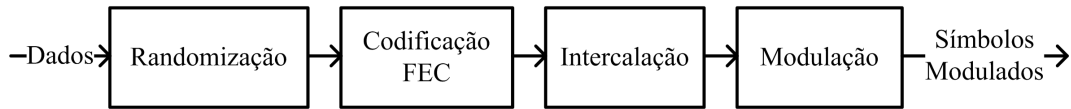


Figura 2.15: *Processo de codificação do canal* [15]

A codificação é feita em uma sequência de dados, alterando as características dessa sequência e introduzindo redundância que permite um processo de comunicação menos sujeito a erros e é composta por quatro passos principais: randomização dos dados, codificação FEC, intercalação e modulação, que são aplicadas nessa ordem para transmissão e na ordem inversa para a recepção [11].

2.3.3.5.1 Randomização

A randomização dos dados é executada em cada rajada no DL e no UL, e será usada independentemente para cada alocação de um bloco de dados, conforme descrito em 2.3.1.3.4.1.

2.3.3.5.2 Codificação para correção de erros

Uma codificação para correção de erros (FEC - *Forward Error Correction*) consiste na concatenação de um código exterior *Reed-Solomon* (RS) e um código convolucional interno

com taxa compatível, que devem ser suportados em ambos DL e UL. São suportadas as codificações BTC e CTC (*Convolutional Turbo Codes*) como opcionais [1, 2].

A codificação *Reed-Solomon* é derivada de uma sistemática RS($N = 255, K = 239, T = 8$), utilizando o código $GF(2^8)$ e as equações polinomiais 2.2 e 2.3.

$$g(x) = (x + \mu^0)(x + \mu^1)(x + \mu^2) \dots (x + \mu^{2^T-1}) \quad (2.2)$$

$$p(x) = x^8 + x^4 + x^3 + x^2 + 1 \quad (2.3)$$

Onde:

- N - número de *bytes* global após a codificação.
- K - número de *bytes* de dados antes da codificação.
- T - número de *bytes* de dados que pode ser corrigido.
- $p(x)$ - polinômio gerador de campo.
- $g(x)$ - polinômio gerador de código.
- $\mu = 02_{hex}$

A Figura 2.16 ilustra o codificador convolucional binário com taxa natural de 1/2 e um comprimento de restrição igual a 7.

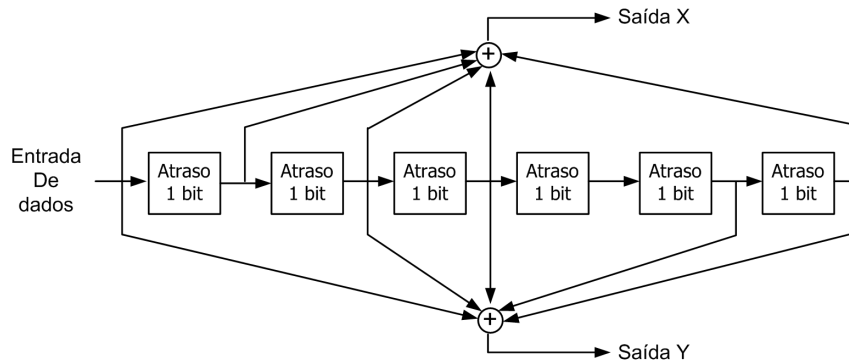


Figura 2.16: Codificador convolucional [16]

Codificadores convolucionais (CC) são utilizados em transmissão de dados para corrigir erros randômicos. É um tipo de codificador FEC especificado por $CC(m, n, k)$ em que cada *bit* de informação m é transformado em um símbolo de n *bits*, onde m/n é a taxa de codificação ($n \geq m$) e a transformação é uma função das últimas informações de k símbolos, e k é o comprimento de restrição do código [16].

2.3.3.5.3 Intercalação

Todos os *bits* de dados codificados devem ser intercalados por um bloco intercalador de tamanho correspondente ao número de *bits* codificados de acordo com os subcanais alocados por símbolos OFDM. O intercalador é definido por uma permutação em duas etapas: na primeira etapa, os *bits* adjacentes codificados são mapeados para subportadoras não adjacentes; na segunda etapa, os *bits* adjacentes codificados são mapeados alternadamente para *bits* mais e menos significativos na constelação [1, 2].

2.3.3.5.4 Modulação

Após a intercalação, os bits são inseridos em série para o mapeador de constelação e depois modulados para todas as subportadoras alocadas. São suportadas BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), QPSK (*Quadrature Phase-Shift Keying*), 16-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) e 64-QAM, ao passo que o suporte à 64-QAM é opcional para as bandas não licenciadas.

O DL suporta modulação e codificação adaptativas por alocação. O UL suporta diferentes esquemas de modulação e codificação para as SSs com base na configuração das mensagens MAC vindas da BS, que são associadas dinamicamente rajada a rajada (*burst-by-burst*). As subportadoras pilotos inseridas entre as rajadas de dados serão moduladas de acordo com sua localização dentro do símbolo OFDM.

2.3.3.6 Estrutura do *frame*

A topologia PMP utiliza as técnicas de duplexação FDD ou TDD para faixa de frequências licenciadas e TDD para faixa de frequências não licenciadas. Um *frame* utilizando TDD é formado por um *subframe downlink* e um *subframe uplink*, os quais contêm as transmissões da BS e das SSs, com dados e informações de controle, conforme ilustrado na Figura 2.17 [1].

Um *subframe* DL contém um único DL PHY PDU e começa com um preâmbulo seguido por uma rajada de controle do cabeçalho (FCH - *Frame Control Header*) que é transmitida usando o esquema de modulação e codificação BPSK 1/2 como mandatório. A FCH contém *DL_Frame_Prefix* para especificar o perfil da rajada e o comprimento de uma ou várias rajadas DL imediatamente após a FCH. Um DL-MAP, se for transmitido no *frame* atual, deve ser a primeira MAC PDU após a rajada FCH e será seguido por um

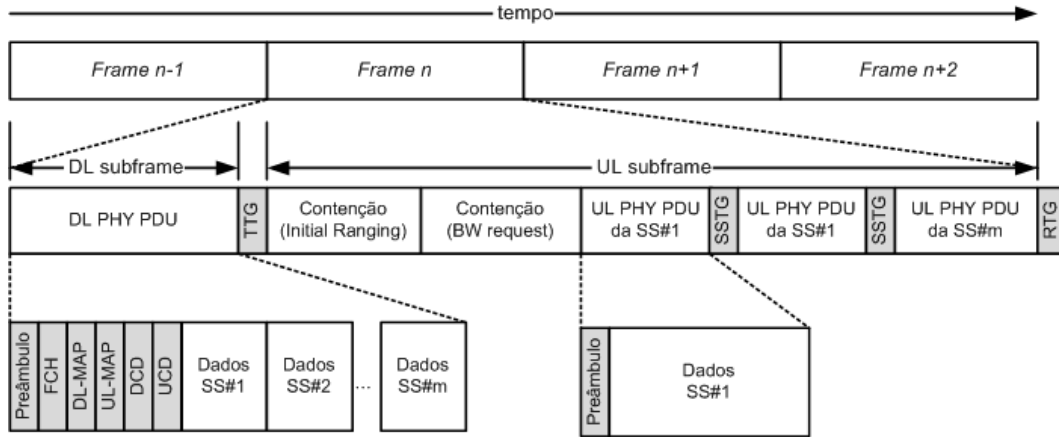


Figura 2.17: *Estrutura do frame OFDM TDD [1]*

UL-MAP. Se as mensagens UCD (*Uplink Channel Descriptor*) e DCD (*Downlink Channel Descriptor*) são transmitidas no *frame*, são imediatamente após o DL-MAP e UL-MAP, seguidas pelas rajadas de dados para as SSs.

Um *subframe* UL é composto de intervalos de contenção regulares para permitir que as SSs realizem o processo de entrada na rede e solicite largura de banda e um ou vários PDUs, cada um transmitido de uma SS diferente, os quais são separados por um *gap* (SSTG - *Subscriber Station Transition Gap*) para auxiliar a sincronização da BS com a nova SS [1, 2].

2.3.4 *WirelessMAN-OFDMA*

Projetada para operações NLOS nas faixas de frequências abaixo de 11 GHz, a camada física OFDMA é derivada da camada física OFDM com acesso múltiplo (OFDMA - *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) e com uma transformada de 2048, 1024, 512 e 128 subportadoras. O acesso múltiplo é disponibilizado por meio de um subconjunto de endereçamento de múltiplas portadoras para destinatários individuais, com a largura de banda dos canais limitada à largura de banda regulamentada, dividida por uma potência de 2 não inferior a 1 MHz [2].

O símbolo OFDMA⁸ é dividido internamente em subcanais lógicos para suportar escalabilidade, múltiplo acesso e antenas avançadas, com as subportadoras ativas divididas em subconjuntos denominados subcanais. No DL, um subcanal pode ser pretendido por diferentes receptores. No UL, um transmissor pode ser atribuído a um ou mais subcanais,

⁸Os parâmetros que definem o símbolo OFDMA são os mesmos especificados para o símbolo OFDM.

com vários transmissores podendo transmitir simultaneamente. Um subcanal pode ser formado por subportadoras adjacentes ou não, conforme mostrado na Figura 2.18 [2].

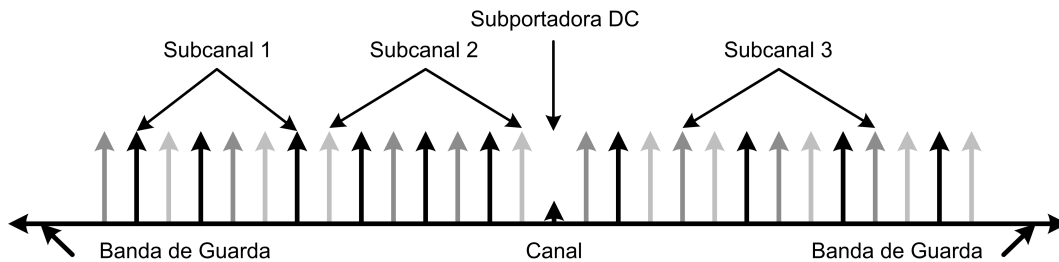


Figura 2.18: *Subcanais OFDMA* [2]

Em OFDMA, a região de dados é uma alocação bidimensional de um grupo de subcanais contíguos e um grupo de símbolos OFDMA contíguos, como mostrado na Figura 2.19.

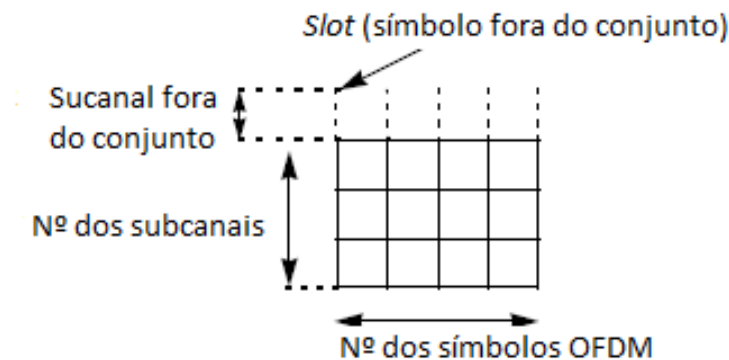


Figura 2.19: *Alocação OFDMA* [2]

A definição do *slot* OFDMA depende da estrutura do símbolo que varia para UL e DL, FUSC (*Full Usage of Subchannels*) e PUSC (*Partial Usage of Subchannels*) e para as permutações de subportadoras distribuídas e as permutações de subportadoras adjacentes, sendo a menor unidade de alocação possível [2].

2.3.4.1 Estrutura do *frame* OFDMA

Em bandas licenciadas são suportadas duplexação FDD ou TDD e somente TDD para bandas não licenciadas. A estrutura do *frame* utilizando TDD é constituída de transmissões da BS e das SSs. Cada *frame* inicia com um preâmbulo seguido por um período de transmissão DL e um período de transmissão UL. Em cada *frame*, um TTG e um RTG são inseridos entre DL e UL e ao final do *frame* para permitir à BS alternar entre os modos de transmissão e recepção, conforme ilustrado na Figura 2.20 [2].

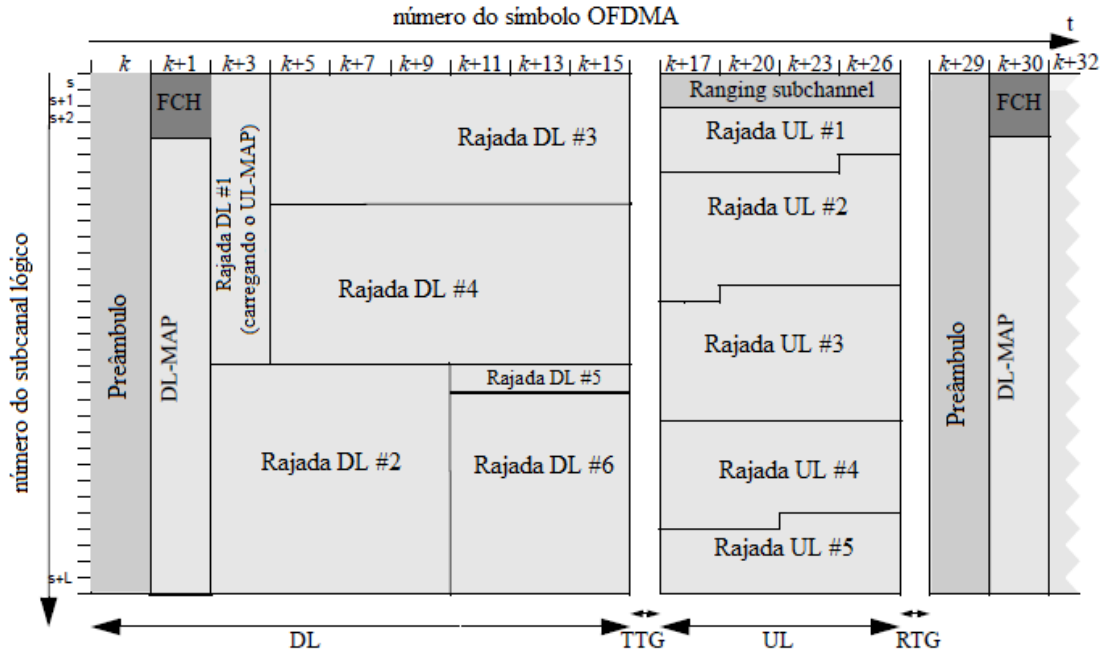


Figura 2.20: Estrutura do frame OFDMA no modo TDD [2]

A Figura 2.21 [2] mostra a estrutura do frame OFDMA FDD que suporta operações concorrentes de SSs, e o relacionamento dos subframes UL e DL com os quatro parâmetros: TTTG1, TTTG2, RTG1 e RTG2 que são anunciados nas mensagens DCD.

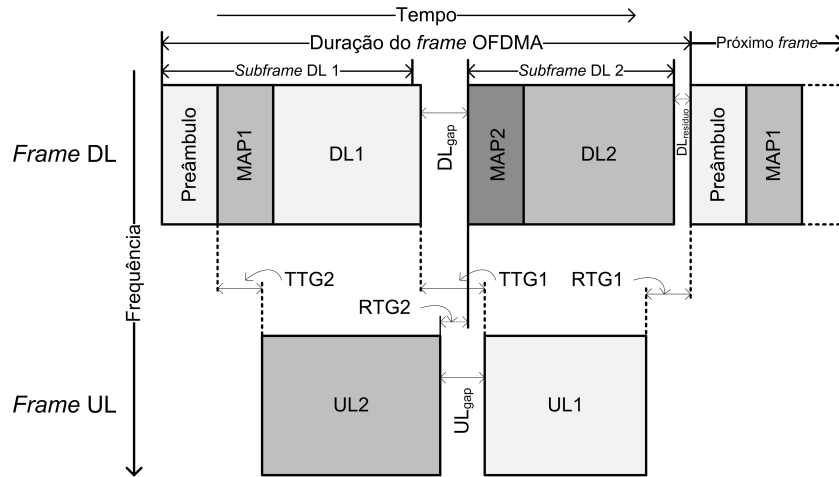


Figura 2.21: Estrutura do frame OFDMA-FDD genérico [2]

Em sistemas OFDMA FDD, a BS opera em modo *full duplex* e as SSs operam em *full* ou *half duplex*. Assim, o frame DL contém dois subframes: o subframe DL1 compreende um préambulo, um mapa de região (MAP1) e os símbolos de dados (DL1); o subframe DL2 compreende um mapa de região (MAP2) e os símbolos de dados (DL2). Entre DL1 e DL2 existe um gap. O subframe UL compreende dois subframes, UL2 e UL1 (nessa ordem).

2.3.5 *WirelessHUMAN*

Destinada para faixas de frequências não licenciadas, utilizando seleção dinâmica de frequências (DFS - *Dynamic Frequency Selection*) para detectar e evitar interferências. Opera na faixa de 5 a 6 GHz no modo TDD, com as demais características similares às especificações da camada física OFDM [13].

2.4 Camada MAC

A camada MAC provê inteligência para a camada física, controlando o acesso ao meio e garantindo QoS através dos mecanismos de alocação dinâmica de recursos e atribuição de prioridades de tráfego. A Figura 2.22 mostra a arquitetura da camada MAC, composta por três subcamadas: a subcamada de convergência de serviços específicos (CS), a subcamada de parte comum (CPS) e a subcamada de segurança (SS) [1, 9].

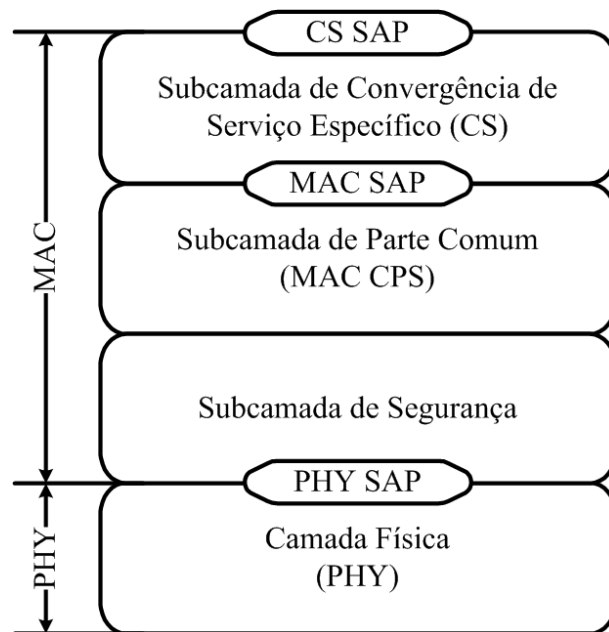


Figura 2.22: *Arquitetura da camada MAC* [1, 9]

É função da camada MAC garantir a segurança, ajuste adaptativo das técnicas de transmissão, interoperabilidade, multiplexação dos fluxos de tráfego por conexão, escalonamento, suporte às topologias de rede, controle de acesso e transmissão de dados, através dos algoritmos de acesso e alocação de banda, permitindo o compartilhamento do canal.

2.4.1 Subcamada de convergência de serviço específico

A subcamada de convergência de serviço específico provê a interface para a rede externa, fazendo qualquer transformação ou mapeamento dos serviços para e das conexões MAC 802.16 utilizando, via MAC SAP, os serviços providos pela MAC CPS, realizando as seguintes funções [16]:

- Aceitar as Unidades de Dados de Protocolos (PDUs) da camada superior;
- Promover a classificação das PDUs vindas da camada superior;
- Processar, se necessário, as PDUs com base na classificação;
- Entregar os CS PDUs para o MAC SAP apropriado;
- Receber os CS PDUs da outra entidade.

Para tanto, são especificadas três tipos de CS: a ATM (*asynchronous transfer mode*) CS, a *packet* CS e a *Generic Packet* CS.

2.4.1.1 ATM CS

É uma interface lógica que associa diferentes serviços ATM com a MAC CPS SAP. A ATM CS recebe as células ATM da camada ATM, classifica-as e, se necessário, suprime o cabeçalho (*Payload Header Suppression* - PHS), e entrega a CS PDU para o MAC SAP apropriado. A ATM CS é especificada para suportar a convergência de PDUs geradas pelo protocolo da camada ATM de uma rede ATM. A ATM CS PDU consiste de um cabeçalho ATM CS PDU e uma carga útil ATM CS PDU, igual à carga útil da célula ATM, conforme Figura 2.23 [1, 2].

Cabeçalho ATM CS PDU	Carga ATM CS PDU (48 bytes)
-------------------------	-----------------------------

Figura 2.23: *Formato do ATM CS PDU* [1, 2]

Cada célula ATM admitida na ATM CS é classificada de acordo com o conjunto de critérios: identificação do caminho virtual (VPI) e identificação do circuito virtual (VCI), com a referência para a identificação da conexão (CID); casando com esses critérios, ela será entregue para a MAC SAP para ser entregue na conexão identificada pelo CID.

2.4.1.2 *Packet CS*

A *Packet CS* reside no topo da MAC CPS IEEE 802.16 e utiliza os serviços da MAC para executar as seguintes funções:

- Classificação dos PDUs da camada superior para uma conexão de transporte apropriada;
- Supressão de informações da carga útil do cabeçalho (opcional);
- Entrega do resultado da CS PDU para o MAC SAP associado com o fluxo de serviço do ponto de transporte MAC SAP;
- Receber o CS PDU de um ponto MAC SAP;
- Reconstruir as informações de cabeçalho que foram suprimidas no *payload* (opcional).

Os PDUs vindos da camada superior são encapsulados em um formato MAC SDU como ilustrado na Figura 2.24, tendo o campo PHSI (*payload header suppression index*) presente quando existir uma regra de supressão de cabeçalho para a conexão associada.

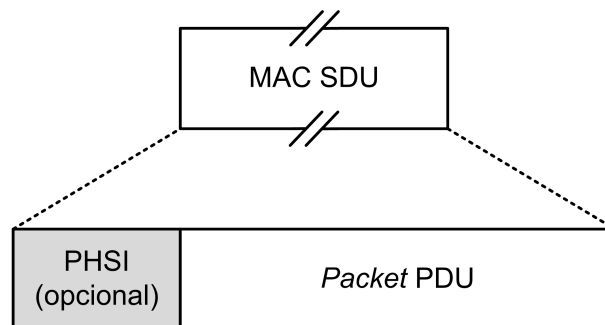


Figura 2.24: *Formato da MAC SDU [2]*

A *packet CS* é responsável pelo envio e entrega das unidades de dados de serviço MAC (MAC SDU) para o MAC SAP e por receber e aceitar a MAC SDU do MAC SAP e entregá-la para a entidade da camada superior. A Figura 2.25 mostra a sequência para a classificação dos pacotes e o mapeamento das conexões no sentido da BS para a SS.

A classificação mapeia a MAC SDU em uma conexão de transporte particular para transmitir entre MACs associadas. O processo de mapeamento associa uma MAC SDU

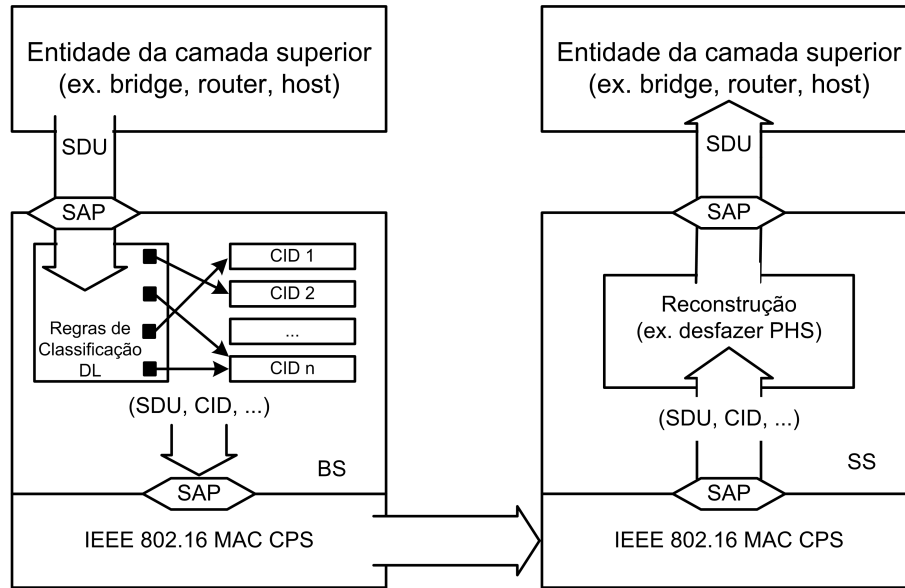


Figura 2.25: *Classificação e mapeamento CID (BS para SS) [16]*

com uma conexão de transporte, criando uma associação com o fluxo de serviço característico da conexão. Esse processo facilita a entrega das MAC SDUs com os parâmetros de QoS apropriados [16].

As regras de classificação são um conjunto de critérios aplicados para cada pacote admitido na rede IEEE 802.16, como endereço IP de destino, prioridade de classificação e uma referência para o CID. Se um pacote atende aos critérios especificados, ele é entregue para o SAP na conexão definida pelo CID, com o serviço de fluxo característico da conexão provendo QoS para a conexão. As informações repetitivas do cabeçalho da camada superior, quando suprimidas pela entidade transmissora, serão restaurada pela entidade receptora [17].

2.4.1.3 Subcamada de convergência de pacotes genéricos

A *Generic Packet CS* (GPCS) é uma camada de convergência independente do protocolo, que suporta múltiplos protocolos sobre uma interface aérea IEEE 802.16, conforme mostrado na Figura 2.26 [2].

A GPCS está estruturada para executar, entre outras, as seguintes funções:

- Prover uma camada de convergência de pacote genérica que usa o MAC SAP e expõe o SAP para as aplicações GPCS;
- Não redefine ou realoca outra subcamada de convergência, fornecendo um SAP que

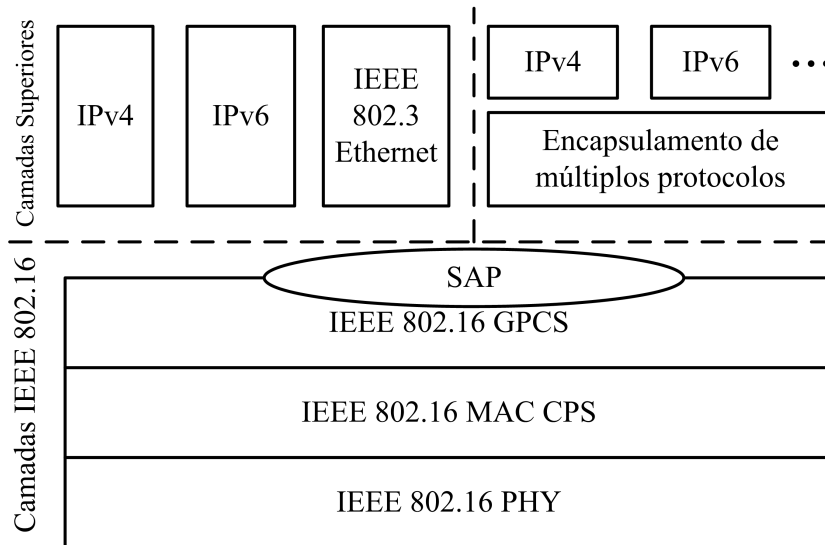


Figura 2.26: *Modelo utilizando a GPCS [2]*

não é específico do protocolo;

- O protocolo da camada superior, que está imediatamente acima da GPCS, é identificado por um parâmetro TLV (*type, lenght, value*), indicando o tipo de protocolo GPCS;
- Analisa os pacotes e os classifica com os parâmetros indicados para o GPCS SAP;.
- Define um conjunto de parâmetros SAP como resultado da análise do pacote na camada superior;
- Permite a multiplexação de vários tipos de protocolos (*IPv4, IPv6, Ethernet*) relacionados à mesma conexão IEEE 802.16;
- Define regras de reconstrução dos pacotes com supressão de campo, com base no PHSI e nas regras PHS associadas.

2.4.2 Subcamada de parte comum

A subcamada de parte comum 802.16 provê as funcionalidades de acesso ao núcleo do sistema, alocação de banda, estabelecimento e manutenção das conexões. Ela recebe os dados de várias CSs, através da MAC SAP, e classifica para uma conexão MAC particular. É designada para suportar topologia de rede PMP e, opcionalmente, operações *mesh*, conhecidas como topologia *point-to-point*.

2.4.2.1 Topologia PMP

A Figura 2.27 mostra a topologia PMP, na qual a BS é a entidade central que gerencia todo tráfego da rede. O DL opera com as conexões da estação base (BS) com as SSs realizadas com uma antena setorizada capaz de lidar com vários setores simultaneamente.

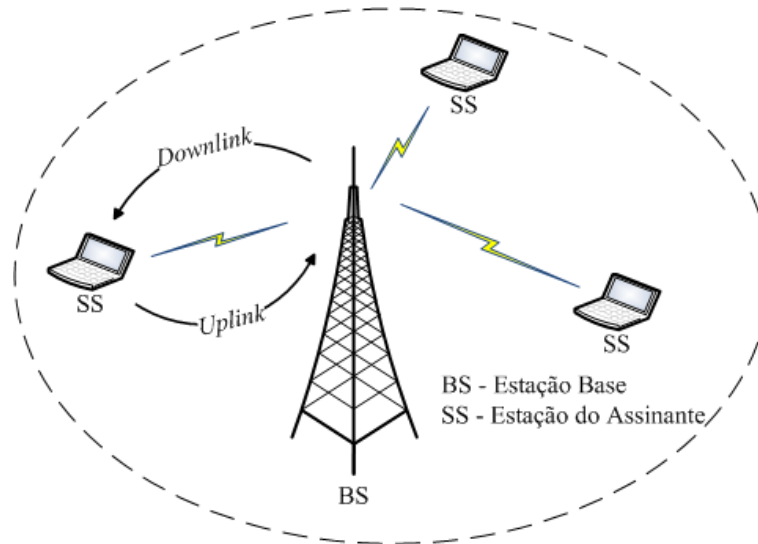


Figura 2.27: Topologia PMP

Dentro de um determinado canal de frequência e do setor da antena, todas SSs recebem a mesma transmissão da BS, utilizando a multiplexação TDD com o tempo de transmissão dividido em períodos *uplink* e *downlink*. No *downlink*, os dados para as SSs são transmitidos por *broadcast* para todas SSs listadas no *frame downlink*. Cada SS verifica a identificação da conexão (CID - *Connection Identifier*) na unidade de protocolo de dados (PDUs) e retira os PDUs endereçados para si. O *uplink* é compartilhado entre as SSs implementando TDMA sob demanda, com as SSs transmitindo no canal *uplink*, somente, após receber as informações de configuração da BS, contidas no UL-MAP.

Formato do MAC PDU

Cada PDU inicia com um cabeçalho MAC de tamanho fixo, podendo ser seguido pela carga útil da MAC PDU de comprimento variável e um campo de CRC (*cyclic redundancy check*). Há dois tipos de cabeçalhos MAC os quais são identificados pelo campo HT (*header type*): o primeiro é o cabeçalho genérico que inicia cada MAC PDU contendo mensagens de gerenciamento MAC ou informações da CS (HT=0); o segundo tipo de cabeçalho MAC é utilizado pelas SSs para requisitar largura de banda (*bandwidth request*, HT=1). A Figura 2.28 ilustra o formato da MAC PDU com um cabeçalho genérico [2].

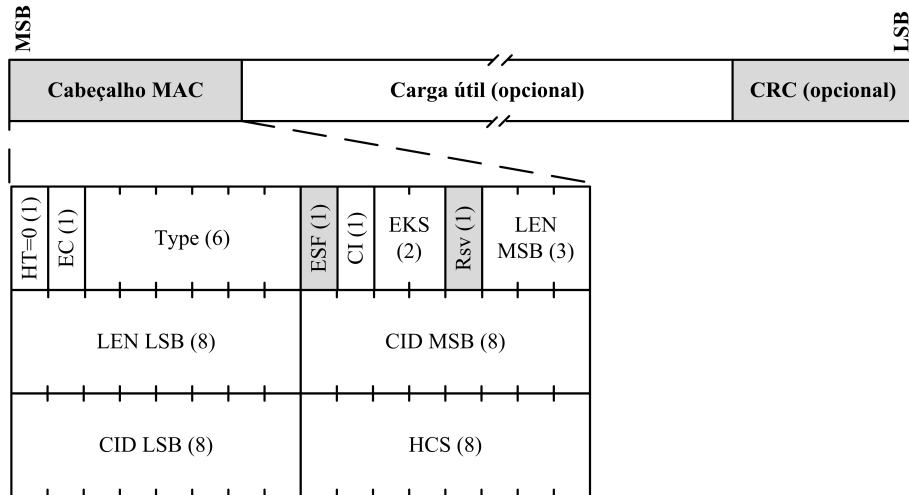


Figura 2.28: *Formato da MAC PDU com cabeçalho genérico [2]*

Onde:

- HT* - *header type* (tipo de cabeçalho);
- EC* - *encryption control* (controle de encriptação);
- Type* - indica os subcabeçalhos e especifica o tipo de carga útil;
- CI* - *CRC indicator* (indicador de CRC);
- EKS* - *encryption key sequence* (chave de sequência de encriptação);
- ESF* - *extended subheader field* (campo de subcabeçalho estendido);
- Rsv* - *reserved* (reservado);
- LEN* - *length* (comprimento da MAC PDU incluindo o cabeçalho e CRC);
- CID* - *connection identifier* (identificador de conexão).
- HCS* - *header check sequence* (sequência de verificação do cabeçalho);
- LSB* - *least significant bit* (*bit* menos significativo);
- MSB* - *most significant bit* (*bit* mais significativo).

Os campos reservados serão setados para zeros na transmissão e ignorados na recepção.

2.4.2.2 Topologia *mesh*

A principal diferença entre as topologias PMP e *mesh* é que na PMP o modo de comunicação é baseado na conexão direta entre a BS e as SSs. No modo *mesh* são permitidas comunicações *multihop* em que o tráfego pode ser roteado através das SSs e pode ocorrer diretamente entre as SSs, conforme ilustrado na Figura 2.29.

As SSs podem operar como roteadores para realizar tráfego entre SSs até chegar à BS. A BS é chamada *mesh* BS e tem uma conexão direta com o serviço de saída da rede *mesh*.

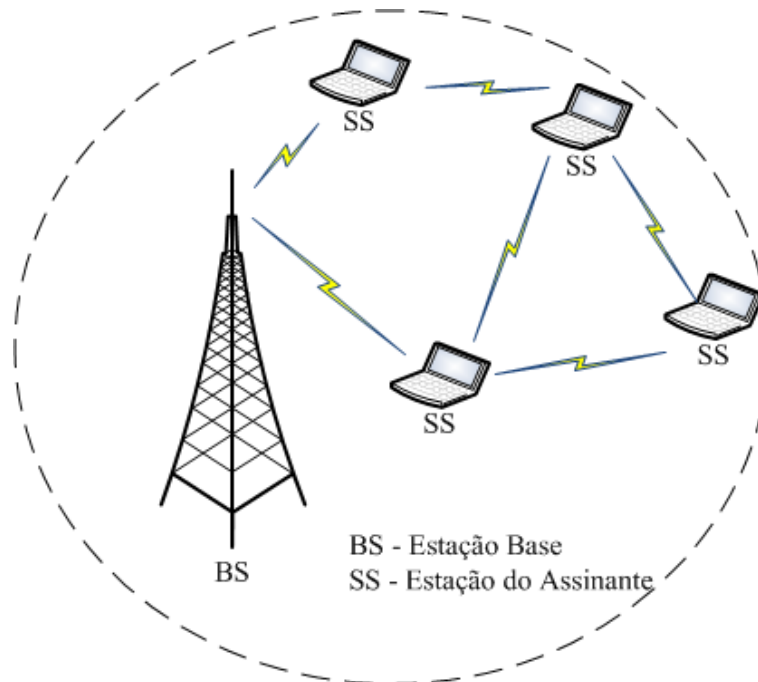


Figura 2.29: *Topologia Mesh*

Todos os outros sistemas de rede *mesh* são terminados nos nós SSs. Em modo *mesh*, os termos *uplink* e *downlink* têm significados diferentes. *Uplink* é definido como tráfego na direção da *mesh* BS enquanto *downlink* é definido como tráfego iniciado na *mesh* BS e as transmissões são baseadas e TDMA [2].

2.4.3 Subcamada de segurança

Um sistema sem fio usa o canal de rádio-frequência, que é um canal aberto. Assim, os procedimentos de segurança são incluídos para proteger os dados, fornecendo confidencialidade e a integridade do tráfego, evitando ataques e roubo de dados. A subcamada de segurança fornece autenticação, troca de chaves de segurança e criptografia a todo o sistema BWA [16].

No padrão IEEE 802.16, as conexões entre a SS e a BS são criptografadas com um protocolo de criptografia de dados aplicado para ambas as direções. Este protocolo define um conjunto de regras criptográficas, como casamento de dados criptografados e algoritmos de autenticação. Um protocolo de gerenciamento de chaves privadas (PKM - *privacy key management*) provê a distribuição segura das chaves de dados da BS para a SS, permitindo a sincronização das chaves de dados entre as SSs e a BS. Além disso, a BS usa o protocolo para garantir acesso condicional aos serviços de rede.

2.5 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo, apresentam-se os aspectos gerais das redes de acesso sem fio no padrão IEEE 802.16, com as especificações para as camadas PHY e MAC.

Na camada física, enfatizam-se as características para permitir a comunicação LOS e NLOS nas faixas de frequência de 2-11 e 10-66 GHz, com as especificações de portadora única (SC e SCa) e multiportadoras (OFDM, OFDMA e HUMAN). Destacam-se os modos de operação do canal com a Duplexação por Divisão do Tempo (TDD) e Duplexação por Divisão de Frequência (FDD), as técnicas de multiplexação TDM, TDMA e DAMA, e o processo de codificação do canal: randomização, codificação FEC, intercalação e modulação.

A camada MAC apresenta-se estruturada para prover o controle de acesso ao meio, garantir o atendimento dos parâmetros de QoS das aplicações dos usuários e manter a segurança na comunicação, com as funções atribuídas à subcamada de convergência de serviços específicos (CS), subcamada de parte comum (CPS) e subcamada de segurança (SS), respectivamente. Definem-se o formato da MAC PDU na topologia PMP e os mecanismos de requisição e alocação de largura de banda para as estações cliente, as quais são atendidas sob demanda.

Capítulo 3

Qualidade de serviço no padrão IEEE 802.16

3.1 Introdução

Qualidade de serviço (QoS) em redes de computadores refere-se à qualidade do serviço que a rede oferece às aplicações ou aos usuários, expressa em termos de parâmetros, tais como: atraso fim-a-fim, vazão e variação de atraso (*jitter*). O objetivo das redes WiMAX é prestar os serviços adequados para atender as necessidades dos usuários, maximizando a utilização dos recursos através dos mecanismos criados para prover QoS.

Neste capítulo são apresentadas políticas e mecanismos para provisão de QoS no padrão IEEE 802.16. Na Seção 3.2 são mostrados os requisitos para prover QoS. A Seção 3.3 apresenta os mecanismos criados para o provimento de QoS em redes no padrão IEEE 802.16. A Seção 3.4 descreve a classificação dos mecanismos de escalonamento. A Seção 3.5 apresenta as principais disciplinas de escalonamento. Na Seção 3.6, os mecanismos de escalonamento propostos especificamente para redes WiMAX são descritos. A Seção 3.7 apresenta um resumo comparativo das disciplinas e mecanismos de escalonamento. Finalmente, a Seção 3.8 traz as considerações finais do capítulo.

3.2 Provisão de QoS em redes IEEE 802.16

As redes podem combinar serviços de QoS por fluxo e quantitativo ou por classe e quantitativo, podendo incluir múltiplos tipos de serviços de QoS para suportar uma quan-

tidade maior de aplicações. Os principais parâmetros que quantitativamente representam os requisitos de QoS das aplicações são:

- *Vazão*: número de *bytes* de dados transmitidos com sucesso durante um determinado intervalo de tempo, considerado cada direção do canal, expressa em *bits/s*;
- *Atraso*: intervalo de tempo, dado em segundos, compreendido entre o envio de um pacote pelo nó de origem e o seu recebimento no nó de destino;
- *Jitter*: variação do atraso entre as unidades de dados que são transmitidas de forma consecutiva;
- *Taxa de erros*: relação entre a quantidade de pacotes recebidos com erros e a quantidade de pacotes transmitidos;
- *Taxa de perda de pacotes*: é uma relação entre a quantidade de pacotes perdidos e a quantidade de pacotes enviados, considerando os diversos tipos de perdas na rede, como descarte nas filas intermediárias e perdas causadas por fenômenos eletromagnéticos no meio físico.

Para suportar vários tipos de tráfegos (dados, voz, vídeo), o padrão IEEE 802.16 define mecanismos de sinalização e funções para controle de transmissões de dados entre a BS e as SSs, para os tráfegos *uplink* e *downlink*, que são implementados na camada MAC. A qualidade de serviço é implementada por processos de solicitação e concessão de largura de banda. A BS coleta os pedidos de largura de banda, calcula o tempo para transmissão e anuncia o mesmo para as SSs, usando o UL-MAP.

A concessão de largura banda para a SS pode ser realizada de duas formas: concessão por conexão (GPC - *Grant Per Connection*), onde a BS aloca largura de banda para uma conexão básica, e concessão por SS (GPSS - *Grant Per SS*) onde a BS agrupa os pedidos de largura de banda para todas as conexões da SS. Os sistemas GPC proporcionam granularidade de nível superior em termos de pedido de largura de banda, mas são limitados em termos de policiamento de alocação de *slot* pela BS. Em GPSS, as SSs tem mais flexibilidade na atribuição dos *slots* de transmissão global para as suas conexões, podendo atribuir a uma conexão mais do que a sua largura de banda requerida em detrimento de outra conexão, se as condições do tráfego exigir tal recurso. As últimas versões do padrão recomendam somente o uso de GPSS.

Os pedidos de largura de banda podem ser feitos pelas SSs usando pacotes de gerenciamento e requisição de largura de banda ou atribuídos pela BS usando *polling*, no qual a BS usa um elemento de informação (IE) do UL-MAP para informar à SS da oportunidade de requisição de largura de banda. O *polling* pode ocorrer de maneira *unicast*, *multicast* ou *broadcast*. A SS também pode utilizar um *bitpoll – me* (PM) no subcabeçalho de gerenciamento de *grant* para inserir uma solicitação de *poll* à BS.

Como as requisições são baseadas em contenção, podem ocorrer colisões durante a disputa de *slots*, na qual todas as SSs estão autorizadas a transmitir seus respectivos pedidos de largura de banda. Para corrigir esse problema é utilizado um mecanismo binário de *backoff* exponencial truncado. A SS seleciona um *slot* aleatório dentro da janela de contenção e então transmite o pedido no *slot* selecionado. Se a transmissão for bem sucedida e um *grant* de dados for recebido, o nó transmite no próximo quadro *uplink* no *slot* alocado. Se os pedidos de largura de banda não forem reconhecidos pela BS, a SS não receberá uma alocação para os pedidos e terá que retransmitir a solicitação em um próximo quadro.

Em [18] é apresentada uma arquitetura para prover QoS baseada no padrão IEEE 802.16, para a qual os autores desenvolveram métodos compatíveis para módulos específicos tais como: escalonadores, moldadores de tráfego, gerenciadores de *Request* e *Grant*, com a finalidade de otimizar as métricas atraso, vazão e utilização da largura de banda.

3.2.1 Classes de serviços no padrão IEEE 802.16

Os tipos de serviços de entrega de dados especificam um conjunto de parâmetros para o fluxo de dados associado, com a finalidade de facilitar o compartilhamento de largura de banda entre diferentes usuários. Para atender os requisitos de QoS, foram definidas quatro classes de serviços: UGS (*Unsolicited Grant Service*), rtPS (*real-time Polling Service*), nrtPS (*non-real-time Polling Service*) e BE (*Best Effort*) [1]; e, em 2005, foi acrescentada a classe ertPS (*extended-real-time Polling Service*) [7]. Os fluxos de serviços são agrupados nas classes de serviço para serem atendidos de acordo com os requisitos de cada aplicação.

3.2.1.1 UGS - *Unsolicited grant service*

É destinada para suportar aplicações em tempo real que geram tráfego de dados de comprimento constante e periódico, como canais telefônicos clássicos T1¹/E1² PCM (*Pulse Coded Modulation*) e voz sobre IP (VoIP) sem supressão do silêncio. A Figura 3.1 ilustra esta classe de serviço [1, 16, 19].

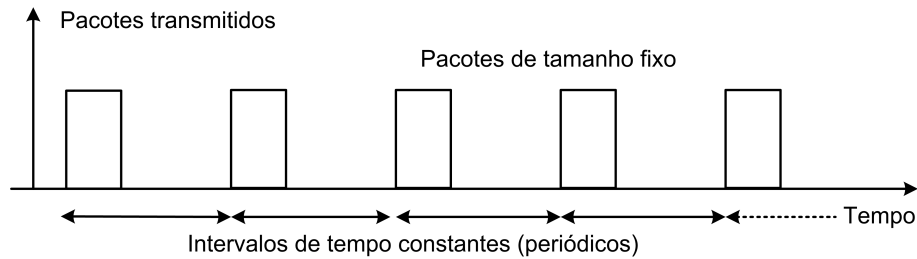


Figura 3.1: *Mecanismo de alocação de grants uplink UGS [16]*

Para prover QoS aos fluxos UGS, são especificados os parâmetros: *Maximum Sustained Traffic Rate*, *Maximum Latency*, *Tolerated Jitter* e *Request/Transmission Policy*. Essa classe de serviço não requisita largura de banda, pois seus requisitos de QoS são definidos durante a fase de configuração da conexão, conforme a taxa de pacotes gerada pela aplicação.

3.2.1.2 rtPS - *Real-time polling service*

Esta classe de serviço é destinada ao suporte de aplicações em tempo real que geram pacotes de dados de comprimento variável periodicamente, como *streaming* de áudio e vídeo com codificação MPEG (*Moving Pictures Experts Group*). Esta classe está representada na Figura 3.2 [7, 16].

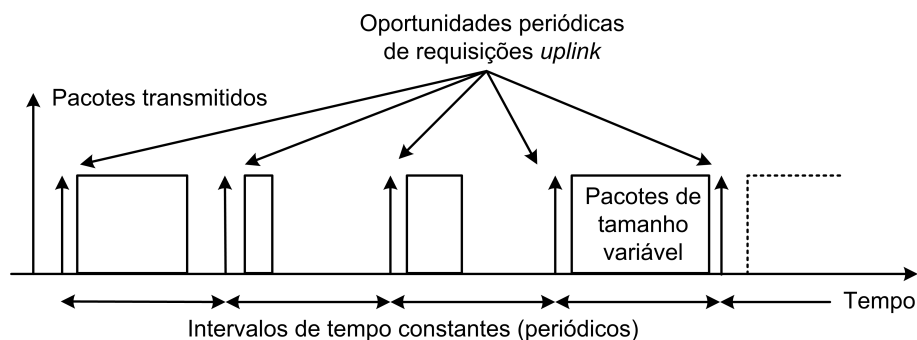


Figura 3.2: *Mecanismo de alocação de grants uplink rtPS [16]*

¹T1: padrão de linha de transmissão digital com taxa de transmissão de 1,544 Mbps.

²E1: padrão de linha de transmissão digital com taxa de transmissão de 2,048 Mbps.

Esta classe de serviço oferece, em tempo real e periodicamente, oportunidades de requisição através de *polling unicast* de acordo com a necessidade do fluxo e as SSs podem especificar o tamanho do *grant* desejado, ficando proibidas de participar do processo de contenção. Os parâmetros requeridos para o provimento de QoS são: *Minimum Reserved Traffic Rate*, *Maximum Sustained Traffic Rate*, *Maximum Latency* e *Request/Transmission Policy* [7, 16].

3.2.1.3 nrtPS - *Non-real-time polling service*

A Figura 3.3 exemplifica esta classe de serviço, a qual se destina às aplicações que requerem garantia de taxa de dados, mas são tolerantes a atraso, como transferência de arquivos. É desejável, em certos casos, limitar a taxa de dados desses serviços para alguma taxa máxima. Nesta classe serviço, o *polling unicast* ocorre com menor frequência e as SSs podem utilizar os *slots* de contenção para requisição de largura de banda de acordo com a necessidade da aplicação [1, 7, 16].

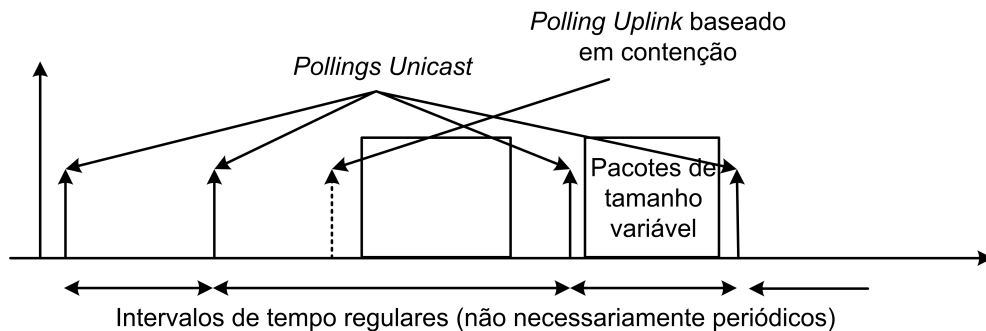


Figura 3.3: *Mecanismo de alocação de grants uplink nrtPS* [16]

Este serviço deve observar a *Minimum Reserved Traffic Rate*, *Maximum Sustained Traffic Rate*, *Traffic Priority* e *Request/Transmission Policy* como os parâmetros de qualidade de serviço.

3.2.1.4 BE - *Best effort*

Este tipo de serviço é para aplicações sem requerimentos de taxa de dados ou atraso. A SS pode utilizar *slots unicast* e *slots* de contenção para requisitar largura de banda, conforme está representado na Figura 3.4. Os fluxos devem fornecer os parâmetros de *Maximum Sustained Traffic*, *Traffic Priority* e *Request/Transmission Policy* [1, 2, 16].

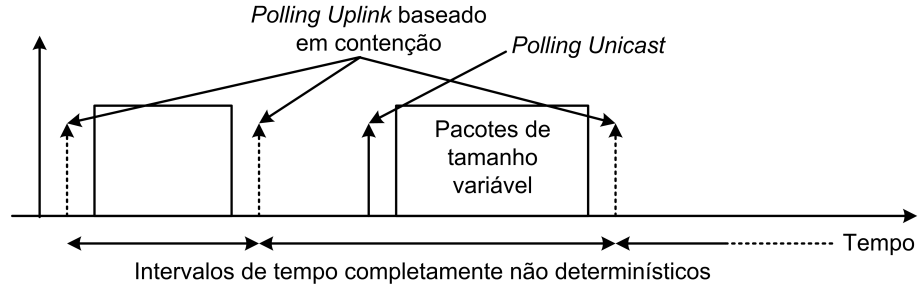


Figura 3.4: *Mecanismo de alocação de grants uplink BE [16]*

Esta classe de serviço é indicada para tráfego *Web* que possui pacotes de tamanho variável e não é sensível a atraso.

3.2.1.5 ertPS - *Extended real-time polling service*

Esta classe de serviço foi incluída a partir de 2005 [2, 7, 19] para suportar aplicações em tempo real com pacotes de tamanho variável e com requerimentos de taxa de dados e atraso garantidos, como VoIP com supressão de silêncio. Para tanto, são especificados os seguintes parâmetros: *Maximum Latency*, *Tolerated Jitter*, *Minimum Reserved Traffic Rate*, *Maximum Sustained Traffic Rate*, *Traffic Priority*, *Request/Transmission Policy* e *Unsolicited Grant Interval*.

3.2.2 Mecanismos de requisição e alocação de largura de banda

Durante a entrada na rede e a inicialização de cada SS são atribuídos até três CIDs com a finalidade de enviar e receber mensagens de gerenciamento, usadas para permitir níveis diferenciados de QoS a serem aplicados no tráfego das conexões de gerenciamento na camada MAC [20]. Mudanças nas requisições de largura de banda são necessárias para todos os tipos de serviços, exceto serviço UGS (*unsolicited grant service*), no qual as conexões têm taxa de *bit* constante. As requisições de largura de banda são realizadas sob demanda através dos métodos de requisição definidos para essa finalidade.

3.2.2.1 Request (requisição)

Mecanismo que as SSs utilizam para indicar à BS que necessitam de alocação de largura de banda UL, podendo ser enviada em um pacote individual contendo a requisição ou juntamente em um pacote de dados (*piggyback*). A largura de banda requisitada pode ser incremental ou agregada. Quando a BS recebe uma requisição de largura de banda

incremental, ela irá adicionar o valor requisitado à atual largura de banda alocada para a conexão. As solicitações periódicas são de natureza agregada, nas quais uma requisição de largura de banda fará com que a BS substitua o atual valor alocado para a conexão pelo valor requisitado. Requisição via *piggyback* poderá ser somente incremental [17].

3.2.2.2 Grant (concessão)

A SS requisita largura de banda para uma conexão individual, embora cada concessão *unicast* seja dirigida à SS e não a uma conexão individual, ficando a decisão para o mecanismo de escalonamento. Para SC e OFDM PHY, uma SS pode utilizar *grants multicast ou broadcast* para transmitir um pedido de largura de banda.

3.2.2.3 Polling (consulta)

A BS aloca, no UL-MAP, largura de banda suficiente para atender as requisições de largura de banda das SSs. As atribuições podem ser para SSs individuais através de *polling unicast* (todas as PHYs) ou a grupos de SSs (somente OFDM e SC PHY) através dos *pollings multicast e broadcast*.

Quando uma SS é consultada individualmente (*polling unicast*), a BS aloca largura de banda suficiente para a SS requisitar largura de banda. Se a SS não precisa de largura de banda, o pedido pode ser preenchido com tamanho de largura de banda igual a zero.

Quando a largura de banda disponível é insuficiente para atender todas SSs individualmente, a BS realiza consultas a grupos de SSs através dos *pollings multicast e broadcast*. Assim, somente as SSs que necessitam de banda participarão da disputa pela oportunidade de requisição de largura de banda através do processo de contenção. O método de resolução de contenção é realizado por algoritmo *truncated binary exponential backoff* com as janelas inicial e final controladas pela BS [20].

3.3 Mecanismos para provimento de QoS em redes IEEE 802.16

Entre os mecanismos propostos para a provisão de QoS em redes IEEE 802.16, destacam-se os mecanismos para controle de admissão de conexões na rede e os mecanismos de escalonamento para distribuir os recursos da rede entre as conexões aceitas.

3.3.1 CAC - Controle de admissão de conexões

O controle de admissão de conexões restringe o número de usuários na rede para evitar a saturação do enlace de dados, mantendo a qualidade do serviço para os usuários admitidos na rede, determinando as atribuições de largura de banda e de latência. Portanto, precisa ser implementado entre a borda e o núcleo da rede, para controlar o tráfego de entrada na rede. Um pedido de nova conexão só será aceito quando os recursos disponíveis na rede são suficientes para atender os requisitos de tráfego e QoS, com base na sua categoria de serviço, enquanto os requisitos de QoS de todas as conexões existentes são mantidos. O CAC deve atuar em situações onde todos os recursos do enlace estão compartilhados com as conexões existentes e um número maior de conexões poderá provocar a degradação significativa em todas as conexões, impossibilitando que os requisitos de QoS sejam atendidos.

Em [21], os algoritmos de CAC são classificados em duas categorias: a primeira, baseada na degradação do serviço; a segunda, sem degradação do serviço. Para a primeira categoria de CAC, os algoritmos são baseados em degradação de serviços, quando necessário e possível, através de empréstimo ou “roubo” de largura de banda das conexões em curso para permitir um novo fluxo de serviço [22] [23]. Na segunda categoria não há degradação do serviço garantido das conexões existentes para aceitar um novo fluxo. Assim, uma nova conexão é aceita somente se receber garantias de QoS em termos de largura de banda e atraso dos fluxos de tempo real e a QoS das conexões existentes puder ser mantida [24].

Em [25] é apresentado um método de CAC baseado em reserva, caracterizado pela definição de limiares de largura de banda alocadas pela BS para cada classe de serviço, com base na prioridade do serviço. Da largura de banda total do sistema (C) é reservada uma largura de banda para a classe de serviço UGS (C_u) e outra faixa para as classes UGS e rtPS (C_r). A largura de banda residual ($C - C_u - C_r$) fica livre para ser alocada para qualquer classe de serviço que solicitar largura de banda, desde que satisfaça os requisitos de QoS. A Figura 3.5 ilustra esta proposta [25].

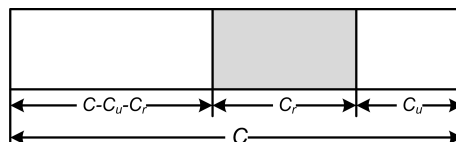


Figura 3.5: *Proposta de CAC baseada em reserva de largura de banda [25]*

Em [26], é apresentada uma proposta baseada em *token bucket*, na qual cada conexão é controlada por dois parâmetros: taxa de símbolo r_i (bps) e o tamanho do balde b_i (bits). Quando uma SS quer estabelecer uma conexão com a BS, ela envia esses dois parâmetros para BS e aguarda a sua resposta. Um parâmetro extra, requisito de atraso, é enviado pelo fluxo rtPS. Para evitar a inanição de alguma classe, são definidos limiares para cada classe. Quando uma classe ocupa todo seu limiar, terá menor prioridade sobre o uso do canal. O mecanismo de CAC atua seguindo três etapas:

Etapa 1) Calcula a capacidade restante do *uplink*:

$$C_{restante} = C_{uplink} - C_{UGS} - C_{rtPS} - C_{nrtPS} - C_{BE}.$$

Etapa 2) Compara $C_{restante}$ com o requisito de largura de banda da nova conexão;

Se há capacidade suficiente para a nova conexão, a conexão será aceita;

Senão, executa a etapa 3.

Etapa 3) Primeiro, verifica as conexões que pertencem às classes de menor prioridade que a nova conexão;

Se há uma classe usando mais capacidade que seu limite, calcula a capacidade que pode ser roubada (C_L) desta classe.

Se $C_L + C_{restante}$ é maior ou igual ao requisito de largura de banda, essa nova conexão será aceita;

Senão, a conexão será rejeitada.

Em [27], para admitir uma nova conexão, o mecanismo de CAC considera o requisito de taxa mínima solicitada pela conexão. Caso haja largura de banda disponível e suficiente para atender a solicitação, a conexão será aceita atendendo às equações 3.1 e 3.2.

$$(C_{reserved} + TR_i^{service} \leq C) \quad (3.1)$$

$$C_{reserved} = \sum_{j=1}^n TR_j^{service} \quad (3.2)$$

Onde:

- $TR_i^{service}$ - taxa que deve ser garantida para a conexão i associada ao serviço *service*;
- $C_{reserved}$ - capacidade reservada para as conexões já admitidas na rede;
- C - capacidade disponível para o escalonador.

A capacidade disponível C é para o escalonador alocar para transmissão de dados e requisição de largura de banda através de *grants unicast*. Esta condição de admissão garante os recursos suficientes para o escalonador atender o requisito de taxa mínima das conexões UGS, ertPS, rtPS e nrtPS e a latência máxima das conexões de tempo real cujo tráfego não ultrapassa essa taxa. Os recursos não utilizados pelos serviços de maior prioridade são destinados às conexões BE, que não passam pelo processo de admissão.

3.3.2 Escalonamento no padrão IEEE 802.16

Os serviços de escalonamento no padrão IEEE 802.16 representam os mecanismos suportados pelos escalonadores da camada MAC para transportar dados em uma conexão. Cada conexão é associada com um escalonador de serviço simples que determina o conjunto de parâmetros de QoS, os quais quantificam os aspectos desse comportamento. Para tanto, são especificadas quatro classes de serviços (UGS, rtPS, nrtPS e BE) para utilizar os recursos da rede de acordo com os requisitos de QoS [1]. O padrão IEEE 802.16 não define algoritmo de escalonamento, mas define as políticas de escalonamento a serem implementadas pelos fabricantes ou operadores.

Em um sistema IEEE 802.16 são utilizados três escalonadores: dois escalonadores na BS, um na direção *downlink* e outro na direção *uplink*; e um escalonador na SS, utilizado apenas na direção *uplink* [28]. Esta estrutura está apresentada na Figura 3.6.

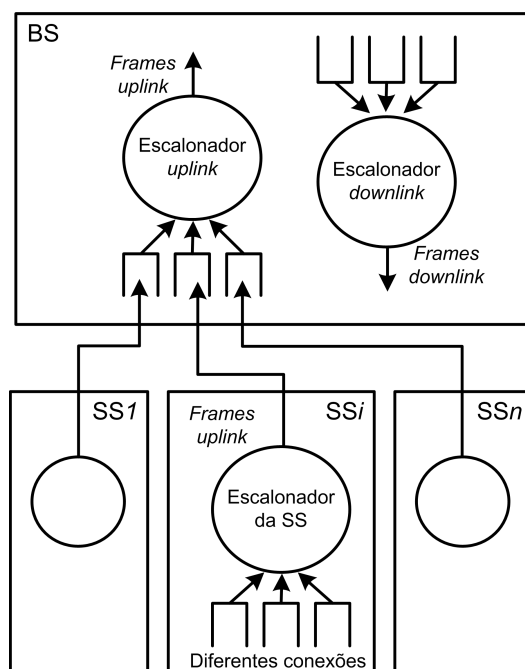


Figura 3.6: Escalonadores de Pacotes na BS e na SS [28]

Em *WiMAX*, a arquitetura da camada MAC é centralizada na BS, a qual controla todo acesso para as diferentes SSs. O gerenciamento DL e UL é feito pela BS através das mensagens DL-MAP e UL-MAP que são transmitidas no início do *subframe* DL, conforme Figura 3.7 [28].

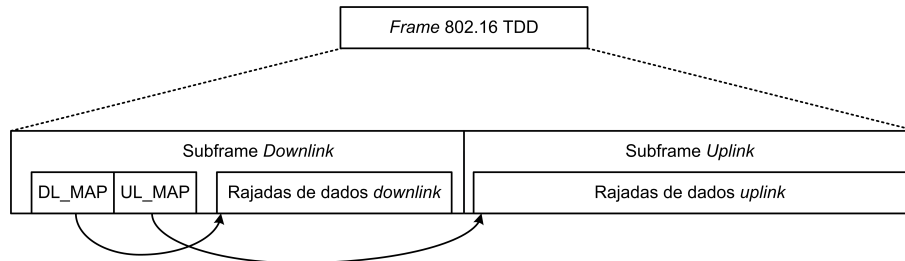


Figura 3.7: Estrutura do frame em IEEE 802.16 utilizando TDD [28]

Quando a SS recebe uma mensagem UL-MAP, verifica se pode acessar o canal *uplink* durante o *frame* corrente, necessitando de um escalonador de *uplink* em cada SS para escalonar suas diferentes conexões.

3.4 Classificação dos mecanismos de escalonamento

Existem várias propostas de escalonadores para redes *WiMAX*, as quais são classificadas em três categorias: homogêneas, heterogêneas ou híbridas, e mistas ou oportunistas, de acordo com as políticas de escalonamento utilizadas [10, 29].

3.4.1 Escalonadores homogêneos

Esta categoria de escalonadores utiliza uma única disciplina³ de escalonamento para todas as classes de serviços de QoS e as condições de variação do canal não são consideradas.

Em [23] é apresentada uma proposta de escalonamento *uplink* utilizando a disciplina EDF (*Earliest Deadline First*) trabalhando em conjunto com um algoritmo de CAC baseado em *token bucket*. Uma proposta utilizando as disciplinas WRR (*Weighted Round Robin*) para o tráfego *uplink* e DRR (*Deficit Round Robin*) para o tráfego *downlink* é analisada em [30].

³Disciplinas de escalonamento são apresentadas na Seção 3.5.

3.4.2 Escalonadores heterogêneos ou híbridos

Nesta categoria de escalonadores são empregadas duas ou mais disciplinas de escalonamento de acordo com a classe de serviço e os requisitos de QoS.

A proposta apresentada em [31] utiliza a disciplina EDF para as SSs escalonarem os pacotes com serviço rtPS, enquanto a disciplina WFQ é utilizada para as classes de serviços nrtPS e BE. Em [24] é proposto um mecanismo de escalonamento de pacotes *uplink* híbrido combinando as disciplinas EDF, WFQ (*Weighted Fair Queuing*) e FIFO (*first-in-first-out*). A disciplina EDF é utilizada pelas SSs para a classe de serviço rtPS; para a classe de serviço nrtPS, as SSs utilizam a disciplina WFQ; a disciplina FIFO é utilizada para a classe de serviço BE.

3.4.3 Escalonadores mistos ou oportunistas

Para esta categoria de escalonadores são empregadas várias disciplinas de escalonamento e as condições de variação do canal sempre são observadas, com o objetivo de um melhor aproveitamento dos recursos do sistema no atendimento dos requisitos de QoS.

Uma proposta de escalonamento *cross-layer* é analisada em [32] e apresentada na Seção 3.5.4. Na Seção 3.5.2 é apresentada a proposta de algoritmo de escalonamento oportunista que é analisada em [33].

3.5 Principais disciplinas de escalonamento

Os mecanismos de escalonamento determinam a maneira como os pacotes das filas são selecionados para transmissão no *link* e são implementados utilizando as disciplinas de escalonamento.

3.5.1 FIFO - *First-in-first-out* (primeiro que entra é o primeiro que sai)

Os pacotes que chegam para o enlace de saída são enfileirados para transmissão no enlace, caso este esteja ocupado transmitindo outro pacote. Se não há espaço suficiente no *buffer* para todos pacotes que chegam, o pacote será descartado ou a regra de policiamento descartará outro pacote da fila para gerar espaço suficiente para o pacote na chegada.

Quando um pacote é completamente transmitido sobre o enlace de saída, ele será removido da fila [34]. A Figura 3.8 mostra uma abstração da disciplina FIFO (também chamada *first-come-first-served* - FCFS) [34].

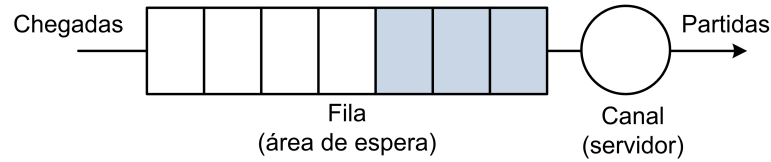


Figura 3.8: *Abstração da disciplina FIFO* [34]

A disciplina de escalonamento FIFO seleciona pacotes para o *link* transmissor na mesma ordem em que eles chegam à fila do *buffer* do enlace de saída [34].

3.5.2 PQ - *Priority queuing* (enfileiramento prioritário)

Na disciplina de escalonamento PQ, os pacotes que chegam para serem transmitidos por um enlace de saída são classificados dentro de uma, duas ou mais classes de prioridades para a fila de saída conforme mostrado na Figura 3.9. Um pacote com prioridade pode depender de uma marca explícita no cabeçalho do pacote (campo ToS - *Type of Service*, no pacote IPv4). Cada classe de prioridade tem sua própria fila de espera. Quando seleciona um pacote para transmitir no enlace de saída, a disciplina PQ transmitirá um pacote da classe de maior prioridade que não esteja vazia. Na mesma classe de prioridade os pacotes seguem a disciplina FIFO [34].

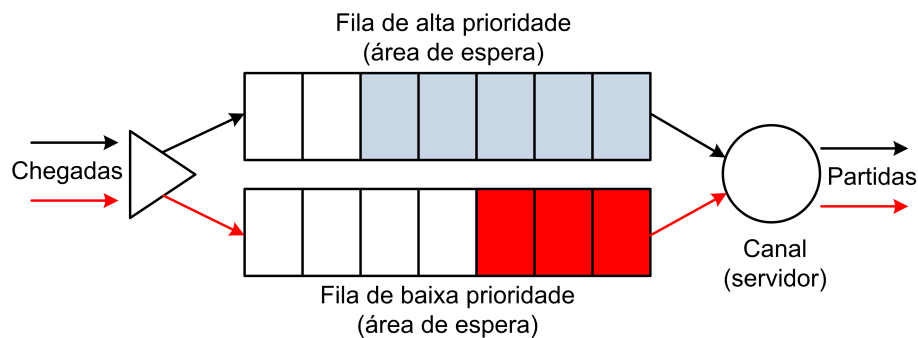


Figura 3.9: *Modelo PQ* [34]

A operação da disciplina PQ está ilustrada na Figura 3.10 com duas classes de prioridades [34], com os pacotes 1, 3 e 4 pertencentes à classe de alta prioridade e os pacotes 2 e 5 pertencentes a uma classe de baixa prioridade.

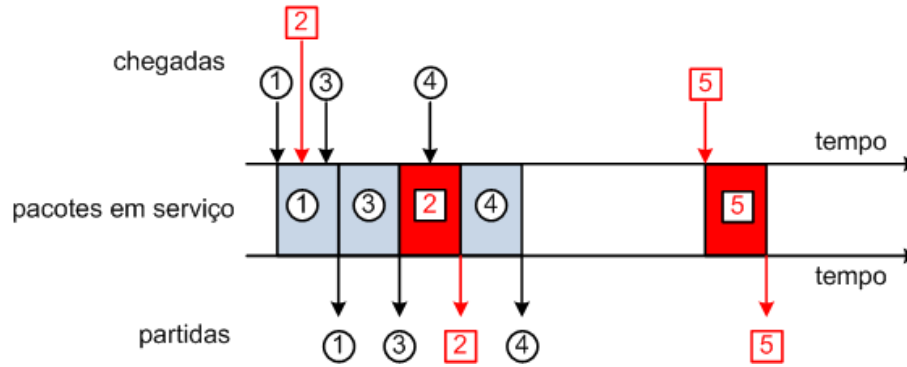


Figura 3.10: Operação da disciplina PQ [34]

O pacote 1 chega e encontra o *link* disponível, inicia a transmissão; durante a transmissão do pacote 1, os pacotes 2 e 3 chegam e são enfileirados nas filas de baixa e alta prioridade, respectivamente. Depois da transmissão do pacote 1, o pacote 3 é selecionado por ter maior prioridade. Ao final da transmissão do pacote 3, a transmissão do pacote 2 será iniciada. Os pacotes da fila de baixa prioridade serão selecionados somente quando não existir pacotes na fila de maior prioridade e, assim, segue até as filas ficarem vazias [34].

3.5.3 RR - *Round robin* (varredura cíclica)

Na disciplina de escalonamento RR, também chamada de escalonador cíclico, os pacotes são rearranjados em classes, as quais são atendidas ciclicamente uma por vez, não oferecendo prioridade que é primordial para o oferecimento de QoS. O escalonador percorre as filas em círculo servindo um pacote de cada fila, favorecendo os fluxos que contém pacotes com maior comprimento. Em um ciclo do escalonador RR será transmitido um pacote de cada fila. Caso uma fila esteja vazia, o escalonador passará para a próxima fila até que todas as filas fiquem vazias. A Figura 3.11 mostra a operação desta disciplina com duas classes [34].

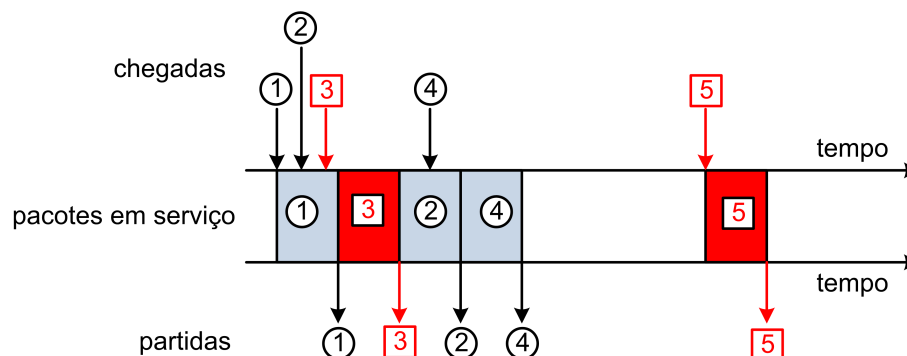


Figura 3.11: Operação da disciplina RR com duas filas [34]

Os pacotes 1, 2 e 4 pertencem à fila de alta prioridade e os pacotes 3 e 5, à fila de baixa prioridade. Primeiro é transmitido o pacote 1, seguido pelos pacotes 3 e 2 e depois os pacotes 4 (fila de maior prioridade vazia) e cinco.

3.5.4 WFQ - *Weighted fair queuing* (enfileiramento com justiça ponderada)

Na disciplina WFQ, os pacotes que chegam são classificados e enfileirados de acordo com sua prioridade e cada fila recebe uma quantidade de serviço diferenciada. Em WFQ, as filas têm pesos diferentes, ponderando a utilização da largura de banda do canal. A Figura 3.12 ilustra a operação da disciplina WFQ com três filas de prioridades [34].

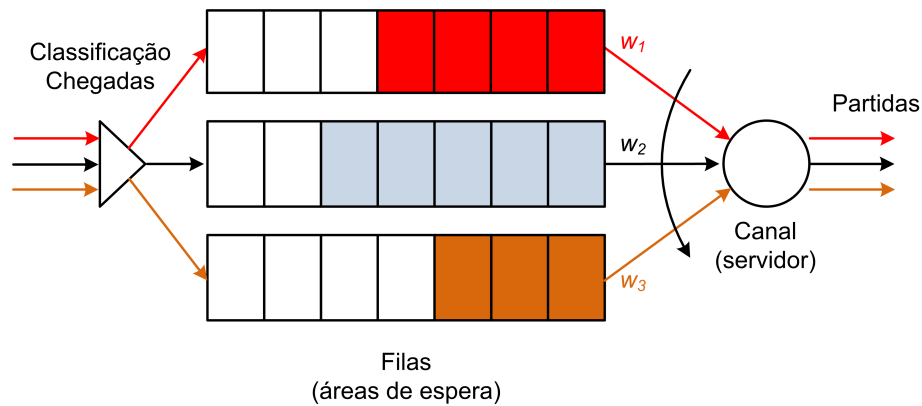


Figura 3.12: Operação da disciplina WFQ com três filas [34]

Inicialmente os pacotes que chegam são classificados e enfileirados de acordo com sua prioridade. Na sequência, as filas são atendidas de maneira circular. A cada classe i é atribuído um peso w e é garantida à fila um escalonamento proporcional ao seu peso. Uma fila de menor prioridade será atendida de acordo com seu peso (*weight*) juntamente com a fila de maior prioridade, provendo a justiça (*fair*) e permitindo que cada uma das conexões obtenha uma porção da largura de banda do canal proporcional ao seu peso [34].

3.5.5 WRR - *Weighted round robin* (varredura cíclica ponderada)

No escalonamento WRR, as filas de espera possuem prioridades diferentes e os fluxos de serviços são classificados e adicionados a essas filas de acordo com sua prioridade. As filas são servidas utilizando a forma RR. Assim, como as filas possuem pesos diferentes,

o WRR serve os pacotes de tamanhos variados sem prejudicar os pacotes de tamanho menor, distribuindo a banda disponível entre as filas de uma forma ponderada [34].

3.5.6 DRR - *Deficit round robin*

Este tipo de escalonador evita a fragmentação do pacote. Portanto, para um pacote ser escalonado deverá ter seu tamanho menor ou igual ao tamanho do *frame*. O DRR associa um quantum fixo (Q_i) e um contador de déficit (DC_i) para cada fluxo i . O quantum terá um tamanho igual ao frame dividido pela quantidade de filas. A Figura 3.13 e a tabela 3.1 mostram o funcionamento do escalonador DRR [28].

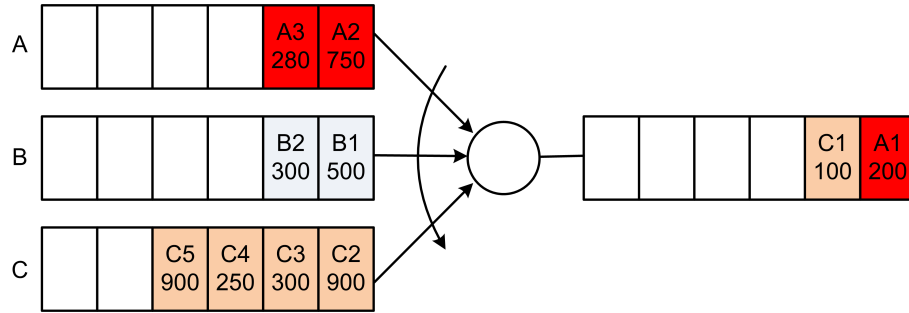


Figura 3.13: Operação da disciplina DRR [28]

No início de cada ciclo, DC_i é incrementado por Q_i para cada fluxo i ; a cabeça da fila i será eleita para ser enviada se DC_i for menor que o tamanho do pacote esperado para ser enviado (L_i), então DC_i é decrementado por L_i . Em cada ciclo, será selecionado um pacote de cada fluxo.

Tabela 3.1: Funcionamento da disciplina DRR

Ciclo	DC1	L1	DC2	L2	DC3	L3	Escalonados
1	350	A1=200	350	B1=500	350	C1=100	A1 e C1
2	150	A2=750	700	B1=500	250	C2=900	B1
3	500	A2=750	200	B2=300	600	C2=900	-
4	850	A2=750	550	B2=300	950	C2=900	A2, B2 e C2
5	100	A3=280	250	-	50	C3=300	-
6	450	A3=280	?	-	400	C3=300	A3 e C3
7	170	-	?	-	100	C4=250	-
8	?	-	?	-	450	C4=250	C4
9	?	-	?	-	200	C5=900	-
10	?	-	?	-	550	C5=900	-
11	?	-	?	-	900	C5=900	C5
12	?	-	?	-	0	-	-

Esta disciplina requer uma taxa mínima reservada para cada fluxo de pacotes antes do início do escalonamento. Pode ser utilizado em redes *WiMAX*, pois as SSs normalmente requerem uma alocação mínima de recursos [28].

3.5.7 *WF²Q - Worst-case fair weighted fair queueing*

A política de escalonamento *WF²Q* foi proposta em [35] para corrigir as falhas da WFQ sobre o GPS (*Generalized Processor Sharing*). A justiça adotada define o pior caso para um pacote ser escalonado em uma disciplina de serviço. Para uma sessão i , a qualquer momento, a demora de um pacote D_i deverá manter a relação definida pela equação 3.3.

$$D_i < a_i + \frac{Q_i}{r_i} + C_i \quad (3.3)$$

Onde:

r_i - vazão garantida;

a_i - tempo para a sessão i ;

Q_i - tamanho da fila no tempo a_i para a sessão i ;

C_i - constante independente das filas, compartilhando o mesmo multiplexer.

Em WFQ, o próximo pacote a ser transmitido é escolhido entre os pacotes acumulados, observando o pacote que possuir maior peso. Em *WF²Q*, o próximo pacote é selecionado entre os pacotes que estão para atingir a situação de pior caso.

3.5.8 *EDF - Earliest deadline first*

A EDF é uma técnica de escalonamento em que os pacotes enfileirados que tem menor *deadline* terão prioridade para serem transmitidos no *link* básico. Esta técnica é dinâmica, com a prioridade do pacote aumentando à medida que seu tempo de espera na fila aumenta. Os requisitos de atraso são definidos em um vetor não negativo $D = [D_1, D_2, \dots, D_i, \dots, D_N]$. Para uma sessão i , um pacote não será atrasado no escalonador em mais de D_i unidades de tempo. O prazo final para um pacote k , na sessão i , chegando em um tempo t_k , é definido pela equação 3.4.

$$d_k^i = t_k + D_i \quad (3.4)$$

Os escalonadores do tipo EDF podem ser classificados em preemptivo (PEDF) e não preemptivo (NPEDF) [10]. O PEDF usa uma política que, em qualquer instante, os pacotes de menor *deadline* serão escalonados em primeiro lugar. Para o NPEDF, a decisão de escalonar o pacote com menor *deadline* é tomada apenas no momento da conclusão da transmissão de pacotes ou na chegada de um novo pacote em um sistema vazio.

Uma deficiência desta disciplina é a inanição das classes nrtPS e BE com o aumento dos tráfegos originados para os fluxos UGS e rtPS, que ocorre em escalonadores homogêneos.

3.6 Escalonadores propostos para *WiMAX*

Para atender os requisitos de QoS especificados pelo padrão IEEE 802.16, encontram-se, na literatura, propostas destinadas especificamente para atender redes baseadas nesse padrão, destacando-se as apresentadas a seguir.

3.6.1 Escalonador com remoção temporária de pacotes

Este mecanismo de escalonamento, apresentado em [36], identifica os pacotes que chegam quando o sinal de RF está abaixo de um limiar mínimo e remove esses pacotes da lista do escalonador por um tempo T_R . A lista do escalonador contém todas as SSs que podem ser atendidas no próximo *frame*. Quando T_R expira, o pacote removido é analisado e, se as condições permanecem abaixo do limiar mínimo definido, o pacote é removido por outro tempo T_R , repetindo o processo por L vezes. Quando o pacote é removido pelo tempo $(L * T_R)$, ele será incluído na lista do escalonador, independentemente das condições do sinal.

Um tempo de penalidade T_P impede que o pacote seja suspenso novamente pelo mecanismo de escalonamento. Nas piores condições, o pacote sofrerá um atraso adicional de $L * T_R$. Este mecanismo de escalonamento pode ser combinado com outros escalonadores para melhorar o atraso sofrido pelo pacote.

3.6.2 O-DRR - Escalonador oportunista com DRR

Em [33] foi utilizado um mecanismo de escalonamento *uplink* oportunista baseado na disciplina DRR. Neste mecanismo de escalonamento, a BS sonda todas as SSs periodicamente a cada k *frames* para determinar o conjunto de SSs elegíveis para transmitir

suas requisições de largura de banda. A SS é elegível se a relação de interferência sinal ruído (SINR - *Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*) do *link* sem fio está acima de um *threshold* mínimo ($SINR_{TR}$) e sua fila não está vazia. Uma SS será escalonada se permanecer elegível durante um dado *frame* no período de escalonamento corrente. O conjunto escalonado muda dinamicamente de acordo com o estado do *link* de cada SS eleita. No início de cada período de escalonamento, a BS reinicia as SSs eleitas e o conjunto escalonado e executa o processo novamente.

3.6.3 Escalonador *uplink* associado com mecanismo de CAC

O mecanismo de CAC é baseado no princípio do *token bucket*, que é usado para controlar a taxa de tráfego na rede. Primeiro, todas as conexões UGS são atendidas. Então, é aplicado o CAC para os pacotes rtPS. Os diferentes *deadlines* desses pacotes são calculados. Determinados os *deadlines*, é aplicado o escalonador EDF (*Earliest Deadline First*) para a definição das prioridades para as conexões rtPS. O EDF atribui prioridades diferentes para os pacotes de acordo com seus *deadlines*. Depois da alocação de recursos para as conexões UGS e rtPS, são alocados recursos para as conexões nrtPS se há largura de banda sobrando e os requisitos dessas conexões estão abaixo do *threshold* (T_{nrtPS}). Se há recursos de sobra, são alocados para as conexões BE se os requisitos de largura de banda estão abaixo do *threshold* (T_{BE}). Havendo sobra de banda, são atribuídas para nrtPS e BE até o uso de toda banda disponível [23].

3.6.4 Escalonador *cross-layer* com suporte a QoS

Mecanismos de escalonamento cross-layer baseiam-se na atribuição do nível de prioridade requerido para cada conexão, observando as condições do canal de comunicação e analisando o nível de potência do sinal de RF, a taxa de erros e a taxa de perda de pacotes para definir a ordem de transmissão dos pacotes.

Serviço UGS tem uma quantidade fixa dos recursos garantida, caracterizada pelo número constante de *slots* alocados; para esta classe de serviço, o modo de transmissão é selecionado e permanece o mesmo durante todo tempo de serviço. Para os serviços rtPS e nrtPS, são garantidas a latência e a taxa mínima reservada; enquanto que, para o serviço BE não há garantia, mas mantém-se a taxa de pacotes errados (PER - *Packet Error Rate*).

Depois de servir todas as conexões UGS, o escalonador aloca todos os *slots* de tempo restantes para as conexões rtPS, nrtPS, e BE que têm a prioridade máxima definida pela PFR (*Priority Function Rate*). As PFRs para as conexões rtPS, nrtPS e BE dependem do indicador de atraso, da taxa de transmissão média sobre a taxa mínima reservada e da qualidade normalizada do canal [32].

3.6.5 Escalonador híbrido baseado nas disciplinas EDD e WFQ

Utiliza as disciplinas de escalonamento EDD (*Earliest Due Date*), baseada em prioridade dinâmica, para serviços de tempo real e WFQ (*Weighted Fair Queue*) para serviço não de tempo real. Na fila EDD, os pacotes são classificados em ordem de seus valores *deadline*. O tempo de espera (*deadline*) de um pacote é calculado pela adição do tempo de chegada do pacote e o tempo de serviço máximo desse pacote. A taxa de vazão requerida para cada serviço é provida pela WFQ, com o atraso definido pela equação 3.5 [31].

$$D_{WFQ} = (\sum_{i=1}^n w_i) / (R * w_i) \quad (3.5)$$

Onde:

- n : número de serviços;
- w_i : peso dado para a fila i ;
- R : taxa de transmissão do *link*.

3.6.6 Escalonador com registro de *frames* em árvore

Em [37] é apresentada uma proposta de escalonamento em árvore, composta por seis níveis: raiz, tempo do *frame*, tipo de modulação, SS, serviço de QoS e nível de conexão, que visam classificar as transmissões de maneira conveniente pela lógica de qualidade de serviço. Para o escalonamento, cada nó pode armazenar o número total de pacotes que as conexões de cada subárvore contêm e o número de símbolos necessários para suas transmissões, como indicadores para seus filhos.

A tarefa principal do escalonador que reside na BS é decidir sobre os pacotes a serem transmitidos e suas ordens em cada *frame*. Cada pacote que chega à fila de saída *downlink* da BS e cada pedido enviado pelas SSs para transmissões de pacotes no *uplink* são inseridos na estrutura da árvore de acordo com os requisitos de QoS. Em seguida, o escalonador

proposto cria ou atualiza as subárvores operando em quatro etapas:

- Chegada de pacotes/requisições;
- Criação do *frame*;
- Mudança do tipo de modulação do assinante ou
- Mudança no serviço de QoS da conexão.

3.6.7 Escalonador adaptativo para tráfego rtPS

Usado somente para a classe de QoS rtPS. É baseado na predição de chegada dos pacotes rtPS. Como definido pelo IEEE 802.16, a BS aloca largura de banda para o tráfego rtPS depois de receber a requisição de largura de banda. Quando a requisição é atendida pela BS, o assinante pode receber novos pacotes rtPS da camada superior que esperarão o próximo *grant* para serem enviados, sofrendo um atraso extra. O escalonador rtPS adaptativo propõe um processo de requisição de largura de banda em que a SS requer *slot* de tempo para os dados presentes na fila rtPS e para os dados que chegarão, através de algoritmo de predição estocástico para estimar a ordem de chegada dos dados [38].

3.6.8 Esquema adaptativo de alocação de largura de banda

O padrão IEEE 802.16 especifica a estrutura do *frame*, com a divisão em DL e UL definida pelo operador. Em [39] é definido um escalonador para sistemas TDD com o objetivo de determinar as taxas apropriadas para a largura de banda *downlink* e *uplink* de forma dinâmica. No início de cada *frame*, com as informações dos requisitos de largura de banda e número de conexões DL e UL, a BS determina o número de *slots* alocados para cada *subframe* e ajusta a divisão do *frame* entre as duas partes. Em seguida, a BS informa às SSs sobre sua decisão usando as mensagens de gerenciamento DL-MAP e UL-MAP.

3.6.9 Serviço de *polling* adaptativo

Em [40], é proposto um mecanismo de escalonamento que ajusta o período do *polling* com base nas requisições de largura de banda recebidas. A BS utiliza a taxa média dos pacotes que chegam para inicializar o período do *polling* com T_{min} . Se a BS não receber

requisição de largura de banda, após N *polls*, ela incrementa exponencialmente o período do *polling* até atingir T_{max} , que é determinado usando o atraso tolerável da conexão. Ao receber uma requisição de largura de banda, a BS reinicia o processo atribuindo o período de *polling* para T_{min} .

3.7 Resumo comparativo das disciplinas de escalonamento

A Tabela 3.2 mostra um resumo das disciplinas de escalonamento com suas características e principais aplicações, conforme apresentadas neste capítulo.

Tabela 3.2: *Resumo comparativo das disciplinas de escalonamento*

Escalonador	Características Básicas	Parâmetros Utilizados
<i>Round Robin</i>	Atende as filas ciclicamente sem oferecer prioridade às classes de serviços.	-
<i>Weighted Round Robin</i>	Atribui pesos diferentes às filas para prover a justiça no atendimento de pacotes com tamanhos diferentes. Pode ser utilizado para tráfegos DL e UL.	Pesos estáticos.
<i>Deficit Round Robin</i>	Não fragmenta os pacotes, requerendo pacotes menores ou iguais ao tamanho do frame. Pode ser usado somente no DL, pois a BS desconhece a fila da SS.	Quantum fixo e contador de déficit variável.
<i>Temporary Removal Scheduler</i>	Remove, temporariamente, os pacotes com nível de RF abaixo de um limiar mínimo. Para tráfegos DL e UL.	Tempo de remoção (T_R), n° de repetições (L) e tempo de penalidade (T_P).
<i>Opportunistic Deficit Round Robin</i>	A SS é elegível para transmitir suas requisições de largura de banda se o SINR estiver acima de um limiar mínimo. Para tráfegos DL e UL.	<i>Polling interval</i> e <i>minimum threshold</i> do SINR ($NINR_{TH}$).
<i>Uplink scheduler</i> com mecanismo de CAC	Utiliza um mecanismo de CAC baseado em <i>token bucket</i> para controlar a taxa de dados na rede. Proposta para tráfego UL.	Parâmetros de <i>token bucket</i> , <i>threshold</i> CAC (T_{nrtPS} e T_{BE}).
<i>Cross-layer</i>	Baseado em prioridades para cada conexão. Pode ser usado para tráfegos nas direções DL e UL.	A SNR média no receptor.
Híbrido (EDD+WFQ)	EDD com prioridade dinâmica para serviço de tempo real e WFQ para serviço não de tempo real, usada para tráfegos nas direções DL e UL.	Peso para o escalonador WFQ.
<i>Frame Registry Tree Scheduler</i>	Baseado em em três operações: chegada requisição/pacote; criação do frame; mudança no tipo de modulação do assinante ou mudança no serviço de QoS da conexão. Para tráfegos nas direções DL e UL.	Modulação do assinante e classe de serviço da conexão.
rtPS adaptativo	Baseada na predição de chegada dos pacotes rtPS, com QoS na direção <i>uplink</i> .	Algoritmo preditivo estocástico.

Cada disciplina de escalonamento apresenta características específicas que, quando utilizada em conjunto com outras disciplinas, permitem que o mecanismo de escalonamento gerencie os recursos do canal de *uplink*, atendendo os requisitos de QoS das aplicações que estão associadas a cada classe de serviço definida pelo padrão IEEE 802.16.

3.8 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo foram apresentados os conceitos de qualidade de serviço em redes WiMAX, através dos parâmetros que quantitativamente representam os requisitos de QoS das aplicações, com os mecanismos criados para permitir a distribuição dos recursos da rede atendendo tais parâmetros.

Foram destacados os procedimentos adotados pelos mecanismos de CAC para controlar a admissão de conexões na rede, de forma que o sistema possa atender os requisitos de QoS de uma nova conexão sem prejudicar o desempenho das conexões existentes.

Também foram apresentadas as classes de serviços com seus respectivos parâmetros de QoS; e, visando um melhor entendimento dos mecanismos de alocação e distribuição dos recursos do canal de comunicação, diferentes propostas de algoritmos de escalonamento para redes WiMAX foram descritas, as quais buscam o atendimento dos requisitos de QoS que são expressos em termos de parâmetros, tais como: atraso fim-a-fim, vazão e *jitter*, conforme definidos pelo padrão IEEE 802.16.

Capítulo 4

Um estudo de escalonamento *uplink* considerando a camada física OFDM do padrão IEEE 802.16

4.1 Introdução

O escalonamento *uplink* é realizado pela BS com o objetivo de atribuir largura de banda para transmissão UL e/ou oportunidades para solicitação de largura de banda a cada SS subordinada, permitindo a utilização do canal físico de maneira eficiente e justa. Todavia, soluções tradicionais desenvolvidas com base em redes cabeadas consideram somente o tráfego e o *status* da fila das conexões na elaboração do mecanismo de escalonamento, não analisando as possibilidades de variações das características do meio físico inerentes aos canais de comunicação sem fio, tais como o nível do sinal de RF e o valor da SNR na SS.

Neste capítulo, apresenta-se o escalonamento *uplink* considerando os esquemas de modulação e codificação da camada física OFDM e os parâmetros definidos pelo padrão IEEE 802.16 para provisão de QoS em redes WiMAX. Na Seção 4.2, descreve-se o problema a ser abordado, a Seção 4.3 traz a solução proposta com a implementação realizada, na Seção 4.4 descreve-se os trabalhos relacionados e, na Seção 4.5, conclui-se o capítulo.

4.2 Descrição do problema

Na literatura pesquisada, encontrou-se várias propostas de mecanismos de escalonamento [4, 41, 42, 43, 44, 45, 46], as quais foram avaliadas sem considerar as características do meio físico.

O padrão IEEE 802.16 define a interface aérea e o protocolo de acesso ao meio para prover QoS às aplicações dos usuários de redes de acesso banda larga sem fio, incluindo os mecanismos de escalonamento e de controle de admissão de conexões, deixando em aberto a forma de implementar tais mecanismos como fator de diferenciação dos produtos. Todavia, os mecanismos de escalonamento tradicionais, implementados com base em redes cabeadas, não consideram a possibilidade de variação das características do meio físico, tornando-se inadequados para o uso em sistemas de comunicação sem fio. Tais características, como a potência do sinal de radiofrequência no receptor, variam conforme a distância entre a SS e a BS e com os efeitos de propagação multipercurso, conhecidos como efeito de *fading*, que influenciam de modo significativo o desempenho do enlace de comunicação sem fio.

Dessa forma, em redes sem fio, nas quais as características do meio físico variam no tempo, faz-se necessário um mecanismo de escalonamento que considere os diferentes esquemas de modulação e codificação (MCS - *modulation coding scheme*) utilizados nos enlaces SS/BS, para prover seu compartilhamento adequado entre as aplicações implementadas.

4.3 Solução proposta

Considerando o problema descrito na Seção anterior, propõe-se neste trabalho uma avaliação mais realista da proposta de mecanismo de escalonamento descrita na referência [4], a partir da disciplina de escalonamento PQ (*Priority Queuing*), por meio de modelagem e simulação, considerando os parâmetros de QoS que caracterizam as classes de serviço para as conexões de transporte da camada MAC e as possibilidades de variações das características do meio de propagação do sinal de RF, levando-se em conta as especificações para a camada física OFDM e os parâmetros de modulação e codificação definidos no padrão IEEE 802.16.

Para tanto, será incluída ao módulo WiMAX apresentado em [3] a camada física

OFDM desenvolvida em [5] e será estendido o mecanismo de escalonamento apresentado em [4] para utilizar a camada física OFDM e, a partir do valor da SNR na SS, aplicar o MCS que permita maior eficiência na utilização do canal de comunicação. O valor da SNR na SS será por ela informado no momento em que se registra na rede.

Os parâmetros da camada física OFDM definem, dentre outros fatores, a taxa de transmissão do canal de comunicação para cada conexão a partir da quantidade de *bits* codificados por símbolo OFDM, especificada pelo esquema de modulação e codificação selecionados de forma apropriada para prover eficiência na utilização dos recursos do canal físico, permitindo, ao sinal transmitido, a robustez exigida pelos parâmetros que qualificam o canal de comunicação sem fio.

Portanto, neste trabalho, com a inclusão da camada física OFDM que implementa as características definidas pelo padrão IEEE 802.16, torna-se possível ao mecanismo de escalonamento selecionar o MCS levando-se em conta o valor da SNR na SS, o qual é definido em função dos fatores que qualificam o canal de comunicação sem fio. Tais fatores, como a potência do sinal de RF no receptor, variam com a distância entre SS e BS e com o desvanecimento do sinal transmitido provocado pelo efeito de propagação multipercurso. Assim, de acordo com as condições do canal de comunicação entre a SS e a BS, o mecanismo de escalonamento *uplink* da BS selecionará o MCS que ofereça robustez ao transporte dos dados, com o melhor aproveitamento do canal, permitindo taxas de transmissão de 13 Mbps para QPSK_{1/2} a 60 Mbps para 64QAM_{3/4}, com uma largura de banda de 20 MHz e prefixo cíclico de 0,25.

A robustez oferecida pelo esquema de modulação e codificação utilizado na transmissão, proporciona eficiência na utilização da largura de banda alocada para a SS, evitando a perda dos pacotes transmitidos devido às variações do meio físico causadas pelos fatores que afetam o canal de comunicação sem fio. Dessa forma, espera-se que a utilização da camada física OFDM com MCSs adequados permitam que os requisitos de QoS das conexões sejam atendidos pelos mecanismos de escalonamento, mesmo com redução da taxa de transmissão da conexão.

4.4 Descrições das implementações a serem realizadas para permitir o estudo do escalonamento *uplink* no padrão IEEE 802.16

Para o estudo do escalonamento *uplink* foi utilizada a ferramenta de simulação NS-2 (*Network Simulation, version 2*) [47] com o módulo WiMAX apresentado em [3] e a camada física OFDM desenvolvida pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*) [5], cuja integração foi realizada neste trabalho.

4.4.1 Inclusão da camada física OFDM ao módulo WiMAX

Buscando uma avaliação mais realista do mecanismo de escalonamento proposto em [4], a camada física OFDM será incluída ao módulo WiMAX a ser utilizado neste trabalho e sua configuração será feita usando a linguagem de programação para *scripts* TCL (*Tool Command Language*) para atribuir os valores da largura de banda e do prefixo cíclico (CP - *cyclic prefix*) que será utilizado na definição do tempo de guarda do símbolo OFDM [5].

A camada física OFDM suporta os esquemas de modulação QPSK, 16-QAM e 64-QAM, empregando um esquema para correção de erros FEC (*Forward Error Correction*) com taxa de codificação 1/2, 2/3 e 3/4, que utiliza códigos convolucionais como mandatórios. O esquema de modulação BPSK (*Binary Phase Shift Keying*) destina-se ao envio de mensagens de gerenciamento do sistema durante a entrada da SS na rede [1].

A Tabela 4.1 [1] relaciona o MCS e a SNR com a taxa de dados para a largura de banda de 20 MHz e prefixo cíclico de 0,25, mostrando a eficiência proporcionada pelo MCS e a capacidade do símbolo OFDM.

Tabela 4.1: *Relação entre MCS e Taxa de dados (BW=20 MHz e CP=0,25)*

MCS	Eficiência (bps/Hz)	Bits/Símbolo OFDM	SNR no Receptor (dB)	Taxa de Dados (Mbps)
BPSK_1/2	0,5	88	6,4	6,336
QPSK_1/2	1,0	184	9,4	13,248
QPSK_3/4	1,5	280	11,2	20,160
16-QAM_1/2	2,0	376	16,4	27,072
16-QAM_3/4	3,0	568	18,2	40,896
64-QAM_2/3	4,0	760	22,7	54,720
64-QAM_3/4	4,5	856	24,4	61,632

O número de *bits* codificados por símbolo OFDM é determinado pela Equação 4.1 e a taxa de transmissão do canal *uplink* é dada pela Equação 4.2. Ao final de cada símbolo OFDM é adicionado um *byte* de “zeros” para inicializar o codificador. Assim, para BPSK 1/2 tem-se 88 *bits* codificados por símbolo OFDM e taxa de dados de 6,336 Mbps para o canal de comunicação.

$$bpsymbol = N_{user} * E - k \quad (4.1)$$

$$Tx_{UL} = \left(\frac{1}{T_S} * bpsymbol \right) / 2 \quad (4.2)$$

Onde:

- bpsymbol* - Número de *bits* por símbolo OFDM;
- N_{user}* - Número de subportadoras de dados do usuário;
- E* - Eficiência do MCS;
- k* - *Byte* de zeros utilizados para inicializar o codificador ($k = 8$);
- T_S* - Tempo total do símbolo OFDM;
- Tx_{UL}* - Taxa de transmissão do canal na direção *uplink*.

A camada física OFDM inclui funções auxiliares chamadas pela camada MAC na transmissão de dados, tais como:

- *getTrxTime* - retorna o tempo necessário para enviar um pacote, dado o seu tamanho e a modulação utilizada;
- *getMaxPktSize* - retorna o tamanho máximo de pacote, dado o número de símbolos OFDM disponíveis e a modulação utilizada;
- *getBpsymbol* - retorna a quantidade de *bits* por símbolo OFDM, dado a modulação utilizada.

4.4.2 Extensão do mecanismo de escalonamento *uplink* para utilizar a camada física OFDM

O módulo WiMAX desenvolvido em [3] utiliza a versão 2.28 da ferramenta de simulação NS-2 (*Network Simulator, version 2*) e segue as especificações do padrão IEEE 802.16 para

a topologia PMP e o modo de acesso TDD, incorporando mecanismos de escalonamento que seguem a política *Strict Priority*, na qual a fila de um serviço de maior prioridade é sempre servida antes da fila de um serviço de menor prioridade.

No entanto, o referido módulo não incorpora a camada física OFDM definida pelo padrão IEEE 802.16 e o mecanismo de escalonamento não considera as diferentes modulações utilizadas pelas estações clientes. Então, foi incluída ao módulo a camada física OFDM e o mecanismo de escalonamento foi alterado para alocar os recursos de acordo com o MCS utilizado pela SS, conforme alterações descritas na Seção seguinte.

4.4.2.1 O módulo WiMAX

A Figura 4.1 mostra a estrutura do módulo WiMAX base desenvolvido em [3], que se baseia em um módulo para simulação do padrão DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specifications*) que se destina à transmissão de vídeo em redes cabeadas, com a alocação de banda baseada nas requisições enviadas pelas estações clientes e nos requisitos de QoS das conexões, controlada pela estação base (BS).

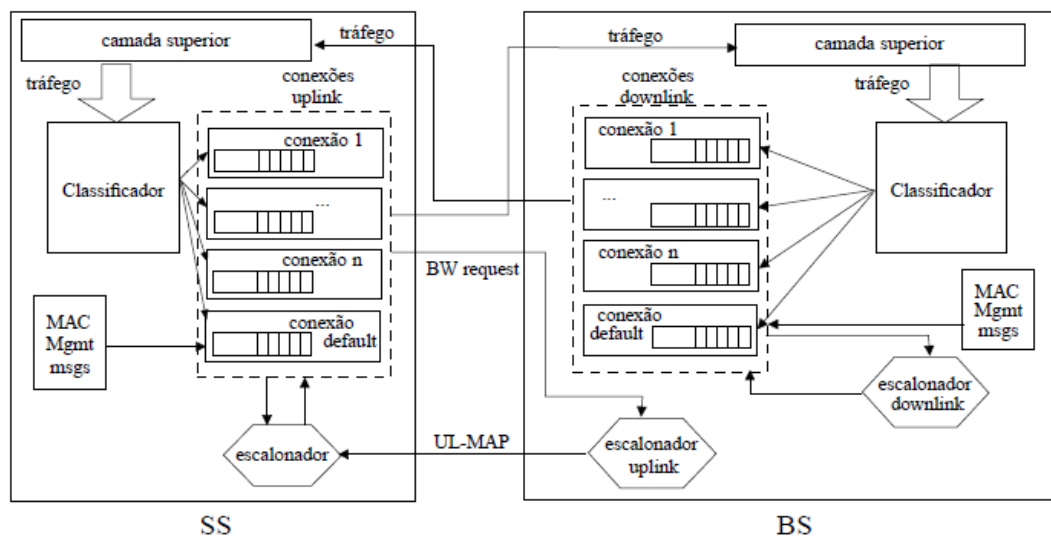


Figura 4.1: Estrutura do Módulo WiMAX base [3]

O tráfego que chega da camada superior é classificado para um fluxo de serviço de acordo com os parâmetros de QoS especificados pela aplicação do usuário. Cada nó da rede terá uma conexão padrão para transmitir mensagens de gerenciamento e o tráfego que não puder ser mapeado para as outras conexões. Inicialmente, as SSs se registram na BS informando seus parâmetros de QoS e recebem um identificador único que é armazenado em uma tabela e associado com as seguintes informações: tipo de serviço, parâmetros de

QoS, se a conexão utilizará concatenação, fragmentação, *piggybacking*.

Na BS, o escalonador de *downlink* determina quais pacotes serão transmitidos em cada *subframe downlink* com base nos requisitos de QoS e na situação da fila de cada conexão; Então, o escalonador de *uplink* decide quais SSs terão direito de transmitir em cada *subframe uplink* e quantos *slots* poderão ser utilizados por cada SS, de acordo com seus requisitos de QoS e as requisições de banda recebidas. O escalonador da SS determinará quais pacotes vindos da camada superior serão transmitidos nos *slots* recebidos [4, 48].

4.4.2.2 Alterações no módulo WiMAX e no mecanismo de escalonamento para a inclusão da camada física OFDM

A camada MAC aloca rajadas que podem utilizar diferentes perfis de MCSs de acordo com as variações das características do meio físico, que afetam a taxa de transmissão de dados e o tempo de transmissão do pacote. Com a inclusão da camada física OFDM, o mecanismo de escalonamento *uplink* passa a considerar as diferentes modulações utilizadas pelas SSs, as quais permitirão diferentes taxas de transmissão para as conexões, influenciando diretamente no tamanho do *minislot* que é a unidade básica de alocação no *subframe uplink*.

Na versão apresentada em [4], o canal de comunicação tem taxa de transmissão fixa de 40 Mbps, com o tamanho do *minislot* definido para 250 *bytes* e o tempo para transmissão de um pacote variando somente em função do tamanho do pacote, haja vista que a taxa de dados do canal é fixa.

Na versão do módulo WiMAX estendida neste trabalho, a camada física OFDM recebe os valores da largura de banda do canal de comunicação e do prefixo cíclico para determinar os demais parâmetros OFDM. Inicialmente, são calculadas a frequência de amostragem e o espaçamento entre as subportadoras pelas Equações 4.3 e 4.4, respectivamente, utilizando o fator de amostragem n e o valor de referência 8000 para garantir um número inteiro de subportadoras durante o tempo do símbolo OFDM.

$$F_S = \text{floor}(n * BW/8000) * 8000 \quad (4.3)$$

$$\Delta_f = \frac{F_S}{N_{FFT}} \quad (4.4)$$

Onde:

- F_S - Frequência de amostragem;
- n - Fator de amostragem;
- BW - Largura de banda nominal do canal;
- Δ_f - Espaçamento das subportadoras;
- N_{FFT} - Número total de subportadoras;

Com o valor do espaçamento entre as subportadoras, calcula-se o tempo útil (T_b), o tempo guarda (T_g) e o tempo total do símbolo (T_s) pelas Equações 4.5, 4.6 e 4.7, respectivamente.

$$T_b = \frac{1}{\Delta_f} \quad (4.5)$$

$$T_g = g * T_b \quad (4.6)$$

$$T_s = T_b + T_g \quad (4.7)$$

Onde:

- T_b - Tempo útil do símbolo OFDM;
- T_g - Tempo de guarda do símbolo OFDM;
- T_s - Tempo total do símbolo OFDM;
- g - Fator do prefixo cíclico (CP) que define o tempo de guarda do símbolo OFDM.

A Figura 4.2 mostra a estrutura do símbolo OFDM no domínio do tempo, identificando o tempo de guarda e o tempo útil, com o tempo de duração total determinado pelo método *getSymbolTime* utilizando a Equação 4.8.

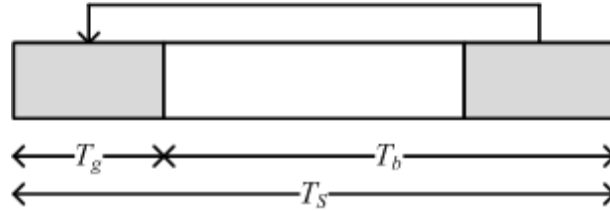


Figura 4.2: *Símbolo OFDM no domínio do tempo [1, 2]*

$$T_s = (1 + g) * \frac{N_{FFT}}{F_s} \quad (4.8)$$

A Figura 4.3 apresenta o símbolo OFDM no domínio da frequência, o qual é formado por múltiplas subportadoras que são transparentes para a camada MAC, porque todas são utilizadas na composição do símbolo OFDM que é mapeado diretamente para o *slot*, sendo visto pelo escalonador como um canal lógico.

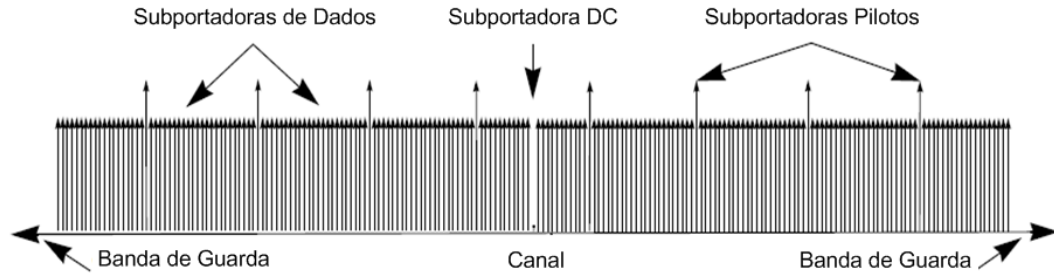


Figura 4.3: *Símbolo OFDM no domínio da frequência [1, 2]*

No *uplink*, a unidade de alocação padrão é o *minislot*, o qual tem o tamanho (*size_slot*) definido por um agrupamento de *slots*, com sua capacidade definida em cada rajada de acordo com o perfil de modulação e codificação utilizados, conforme a Equação 4.9.

$$bytes_pminislot = size_mslot * \frac{bpsymbol}{8} \quad (4.9)$$

Tomando o tamanho do pacote *sdusize* dado em *bytes*, o tempo de duração do símbolo em *ms* e a quantidade de *bits* por símbolo, calcula-se o tempo de transmissão do pacote como definido na Equação 4.10.

$$T_X(pkt) = sdusize * 8 * \frac{T_s}{bpsymbol} \quad (4.10)$$

O método *getBpsymb* determina a quantidade de *bits* por símbolo OFDM de acordo com o MCS selecionado conforme o valor da (*SNR*), definido na Tabela 4.1, o qual é informado pela SS no momento que ela entra na rede.

Os valores do tempo do símbolo OFDM e do tamanho do *minislot* são utilizados pelo mecanismo de escalonamento como valores de referência nas definições dos demais parâmetros utilizados na alocação dos recursos do canal *uplink*, os quais juntamente com a taxa de transmissão passam a variar em função do MCS utilizado, uma vez que a largura de banda e o prefixo cíclico são parâmetros fixos durante a comunicação. A Tabela 4.2 apresenta as principais diferenças entre o módulo WiMAX base [3] e o módulo WiMAX estendido, desenvolvido neste trabalho.

Tabela 4.2: *Diferenças entre o módulo WiMAX base e o módulo WiMAX estendido*

Parâmetros	Módulo WiMAX base [3]	Módulo WiMAX Estendido
Camada Física	Nativa do NS-2, desenvolvida para o padrão IEEE 802.11.	OFDM [5], implementa as características do padrão IEEE 802.16.
Taxa de dados	Fixa (40 Mbps).	Definida em função da BW, CP e MCS.
Capacidade do <i>minislot</i>	Fixa (250 <i>bytes</i>).	Definida em função do símbolo OFDM (BW, CP e MCS).
Tempo de transmissão do pacote	Definido pelo tamanho do pacote em função da taxa de dados.	Definido pelo tamanho do pacote em função da BW, CP e MCS.
Alocação de largura de banda	Com base na capacidade do <i>minislot</i> (fixa).	Com base na capacidade do símbolo OFDM (variável).

Com a utilização do módulo WiMAX estendido neste trabalho, a transmissão de cada rajada de dados ocorre com o perfil de modulação e codificação ajustado às condições do canal de comunicação, considerando o valor da relação sinal-ruído indicada pela SS.

4.5 Trabalhos relacionados

A maioria dos trabalhos encontrados na literatura para redes sem fio abordam mecanismos de escalonamento que foram desenvolvidos com base nos mecanismos existentes para redes cabeadas e não consideram a possibilidade de variação das características do meio físico, desprezíveis em sistemas conectados por cabo.

Os trabalhos apresentados em [3, 4, 27, 41, 42, 48, 49] analisam o mecanismo de escalonamento *uplink* a partir da disciplina de escalonamento PQ sem considerar os parâmetros definidos pelo padrão IEEE 802.16 para a camada física OFDM. Em [3, 49], um módulo WiMAX é apresentado, o qual foi desenvolvido com base em um módulo para o padrão DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specifications*) que se destina à transmissão de sinais de vídeo sobre redes cabeadas, nas quais a variação das características do canal é desprezível. Assim, a taxa de transmissão do canal é constante e os valores dos parâmetros da camada física não se alteram nos ambientes simulados.

Os trabalhos apresentados em [4, 27, 41, 42, 48] consideraram a camada física OFDM existente na ferramenta de simulação NS-2, a qual foi implementada para simulações de redes sem fio no padrão IEEE 802.11 e baseia-se em uma FFT com 52 subportadoras. Todavia, para redes WiMAX, a camada física OFDM é definida com uma FFT de 256 subportadoras, o que proporciona maior duração do símbolo OFDM no domínio do tempo,

permitindo eliminar as interferências intersimbólicas causadas pelo atraso do sinal provocado pela dispersão na propagação, fazendo com que o sinal transmitido possa alcançar uma maior distância.

Em [39] é apresentado um estudo para alocação dinâmica de largura de banda para os *subframes* DL e UL, considerando a variação da taxa de dados em DL e UL de acordo com o perfil de tráfego, proporcionando uma alta vazão. No entanto, não leva em conta a variação das características do meio físico no atendimento aos requisitos de QoS, o que altera os resultados para as métricas de vazão e atraso.

Uma proposta simples de alocação de *slots* baseada nos requisitos de QoS das conexões aceitas na rede e no tamanho da requisição de largura de banda é apresentado em [50]. A proposta apresenta justiça no compartilhamento dos recursos livres; no entanto, não considera todos os tipos de tráfegos no mesmo cenário para a análise da variação dos parâmetros da camada física OFDM definidos pelo padrão IEEE 802.16.

Uma proposta de um mecanismo de escalonamento que cria uma árvore de registro com informações baseadas nos requisitos de QoS, incluindo o tipo de modulação, é apresentada em [37]. No entanto, o algoritmo de escalonamento é complexo e os cenários analisados consideram somente o MCS 64QAM, não avaliando o comportamento do mecanismo com os demais MCSs, de igual importância para a análise de um sistema mais realista.

Em [33] os autores apresentam uma proposta de escalonamento *uplink* oportunista baseada na disciplina DRR (O-DRR) para a atribuição de *slots* às solicitações das SSs. Contudo, a análise apresentada é parcial, pois não considera as possibilidades de variação dos perfis de modulação e codificação associados à camada física.

Em [36] é apresentada uma proposta de mecanismo de escalonamento que se baseia na remoção temporal dos pacotes que estão na fila para serem escalonados e que o canal de comunicação está com o nível do sinal de RF abaixo de um parâmetro *threshold* estipulado. Todavia os parâmetros da camada física OFDM não são considerados pelo mecanismo de escalonamento.

Em [24] é proposto um mecanismo de escalonamento que combina as disciplinas *Strict Priority*, EDF e WFQ, no qual a banda é distribuída entre os diferentes tipos de serviços utilizando a disciplina *Strict Priority*. O serviço rtPS utiliza a disciplina EDF na distribuição dos recursos recebidos, enquanto o serviço nrtPS utiliza a disciplina WFQ; o serviço BE distribui a largura de banda recebida de forma igualitária e o serviço UGS

utiliza largura de banda fixa. Todavia, a influência da camada física no processo de escalonamento não é considerada.

Em [29] os autores analisam a performance de algoritmos baseados no padrão IEEE 802.16, para o escalonamento *uplink*, comparando o comportamento de várias disciplinas de escalonamento (EDF, WFQ, WRR, EDF+WFQ). No entanto, não são consideradas as variações dos parâmetros da camada física.

Em [51] é apresentada uma proposta de algoritmo de escalonamento para a provisão de QoS à classe de serviço rtPS, baseada na camada física OFDM. Porém, os resultados apresentados pelas simulações realizadas não consideram todas as classes de serviços com as variações dos parâmetros definidos para a camada física utilizada.

Uma análise baseada no padrão IEEE 802.16, utilizando a camada física OFDM, é apresentada em [14]. Todavia, os resultados apresentados não incluem todas as classes de serviços especificadas pelo padrão IEEE 802.16.

Outras propostas são encontradas na literatura [32, 52, 53, 54, 55, 56, 57], direcionadas para o atendimento dos requisitos de QoS definidos para a camada MAC, comparando as diversas disciplinas de escalonamento apresentadas no Capítulo 3. No entanto, o canal de comunicação, na maioria dessas propostas, apresenta taxa de transmissão constante e as SSs utilizam o mesmo perfil para os esquemas de modulação e codificação ou não são analisados todas as classes de serviços especificadas pelo padrão IEEE 802.16.

4.6 Considerações finais do capítulo

Neste capítulo, levanta-se a necessidade de uma análise mais realista do escalonamento *uplink* em redes de acesso banda larga sem fio e propõe-se uma extensão do mecanismo de escalonamento *uplink* descrito em [4] para que sejam considerados os esquemas de modulação e codificação definidos pelo padrão IEEE 802.16 para a camada física OFDM.

Dessa forma, inclui-se a camada física OFDM no módulo WiMAX apresentado em [3] e estende-se o mecanismo de escalonamento *uplink* para considerar os parâmetros que caracterizam o canal de comunicação sem fio. Com isso, seleciona-se o esquema de modulação e codificação mais adequado ao canal de comunicação, com base no valor da SNR que é informado pela SS durante a fase de registro na rede, proporcionando ao sinal de RF transmitido, maior resistência às interferências do meio físico e maior eficiência no

transporte de dados dos usuários.

Portanto, espera-se um melhor aproveitamento dos recursos do enlace físico e taxas de transmissão de dados que reflitam as condições do canal de comunicação sem fio.

Capítulo 5

Análise de escalonamento *uplink* considerando a camada física OFDM do padrão IEEE 802.16

5.1 Introdução

Neste capítulo analisa-se, por meio de modelagem e simulação, o comportamento do escalonamento *uplink* considerando a camada física OFDM definida pelo padrão IEEE 802.16. Os cenários modelados são compostos por SSs distanciadas aleatoriamente da BS e MCSs variados de acordo com as condições do canal sem fio indicadas pela SNR na SS, bem como diferentes tipos de aplicações implementadas em cada SS.

A Seção 5.2 descreve o ambiente de simulação e a definição dos parâmetros utilizados, a Seção 5.3 apresenta os cenários simulados e uma análise dos resultados obtidos. A Seção 5.4 apresenta as considerações finais do capítulo.

5.2 Descrição do ambiente de simulação

Para a realização dos experimentos de simulação foram utilizadas a ferramenta de simulação NS-2 e o Módulo WiMAX estendido neste trabalho, conforme apresentados no Capítulo 4.

Os cenários de simulação são compostos por uma BS conectada a um nó fixo por um enlace de 100 Mbps e atraso de 2 ms, e um número de SSs distribuídas na área de cober-

tura da BS conforme ilustrado na Figura 5.1, as quais utilizam MCSs de acordo com as condições do canal de comunicação sem fio, com o limite da faixa de comunicação indicado por um *threshold* na recepção ($RXThreshold$), definido pelo modelo de propagação.

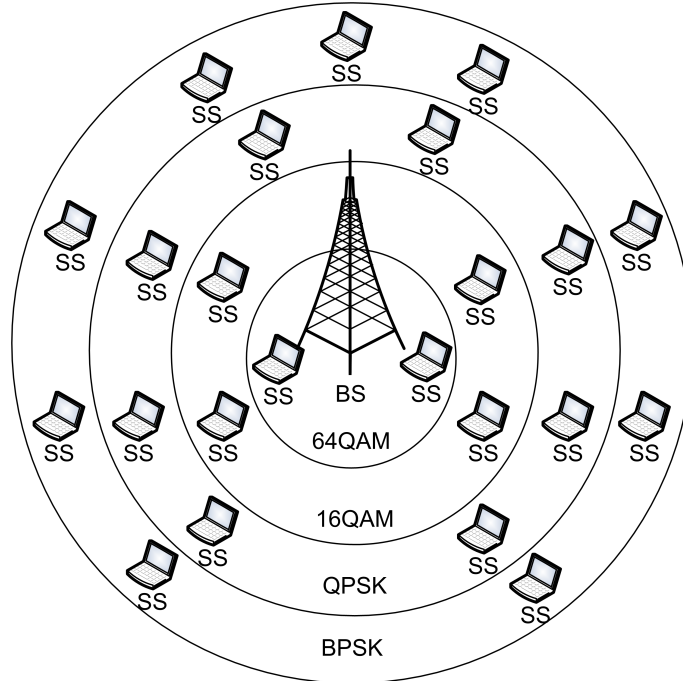


Figura 5.1: Posicionamento das SSs em relação à BS e ao MCS utilizado

São considerados os parâmetros apresentados na Tabela 4.1, que relacionam os MCSs com as taxas de dados do canal, juntamente com os parâmetros listados na Tabela 5.1, que atendem as especificações do padrão IEEE 802.16.

Tabela 5.1: Parâmetros de Simulação

Parâmetros	Valores Utilizados
Camada Física	OFDM
Antena	Omnidirecional
Modelo de Propagação	<i>Two-ray Ground</i>
Modo de Duplexação	TDD
Largura de Banda	20 MHz
Duração do <i>frame</i>	0,005 s
Símbolos por <i>frame</i>	360
Prefixo Cíclico	0,25
Taxa UL/DL	1:1
<i>Slot</i> de contenção	3
Atraso máximo UGS / rtPS	20ms / 100ms
Banda mínima nrtPS	200 kbps

São utilizadas fontes de tráfego para simular as aplicações de voz, voz com supressão

de silêncio, vídeo, transferência de arquivos e navegação Web, as quais são mapeadas na camada MAC para as classes de serviço UGS, ertPS, rtPS, nrtPS e BE, respectivamente.

O tráfego de voz é gerado por uma fonte *on/off* [58]. Durante os períodos “*on*” são gerados pacotes de 66 *bytes* a cada 20 ms, seguindo uma distribuição exponencial. O tráfego de voz com supressão de silêncio utiliza a codificação EVRC (*Enhanced Variable Rate Codec*), com pacotes gerados a cada 20ms. Pacotes de tamanhos variando entre 200 e 1000 *bytes* são gerados periodicamente simulando o tráfego de vídeo MPEG, fornecendo uma taxa média de 240 kbps .

O tráfego FTP é gerado utilizando mensagens de comprimentos exponencialmente distribuídos e média de 512 Kbytes. O tráfego Web segue uma distribuição híbrida Log-normal/Pareto, com o corpo da distribuição correspondendo a uma área de 0,88 que é modelado por uma distribuição Lognormal com média 7247 bytes, enquanto a cauda é modelada por uma distribuição Pareto com média 10558 bytes [59].

Os serviços UGS e ertPS recebem *grants* a cada 20ms conforme o período de geração de pacotes. *Grants unicast* são gerados a cada 20ms para o serviço rtPS e a cada segundo para o serviço nrtPS, possibilitando o envio de requisição de largura de banda por esses serviços. O serviço BE não tem requisito de QoS. No entanto, recebe *grants unicast* a cada dois segundos para evitar a inanição do serviço.

5.3 Apresentação e análise dos resultados

Para os cenários simulados nesta seção, cada intervalo de simulação teve duração de 200 segundos, replicadas cinco vezes com sementes diferentes, e os resultados mostram a média obtida com um intervalo de confiança de 95%.

5.3.1 Cenário 1 - Vazão em ambientes com diferentes MCSs

Nesta primeira simulação analisa-se a vazão da rede versus a carga de tráfego na rede, considerando MCSs selecionados de acordo com o valor da SNR indicada na SS. Para este cenário, uma fonte de tráfego CBR (*Constant Bit Rate*) gera pacotes de 1000 *bytes* e ajusta-se a taxa geração para saturar a capacidade do canal de comunicação *uplink* para cada MCS utilizado.

A Figura 5.2 mostra a vazão na camada MAC considerando os diferentes perfis de

MCSs na camada física OFDM. Nota-se que enquanto a carga de tráfego aplicada na rede não ultrapassa a capacidade de transmissão proporcionada pelo MCS utilizado (conforme apresentados na Tabela 4.1), a vazão na camada MAC apresenta um desempenho linear de acordo com a eficiência do MCS. A curva superior corresponde à vazão para o MCS 64-QAM 3/4 e a curva inferior representa a vazão para o MCS BPSK 1/2. Após atingir o ponto de saturação do canal *uplink* para a camada MAC, a vazão permanece constante independente do aumento da carga de tráfego aplicada na rede [60].

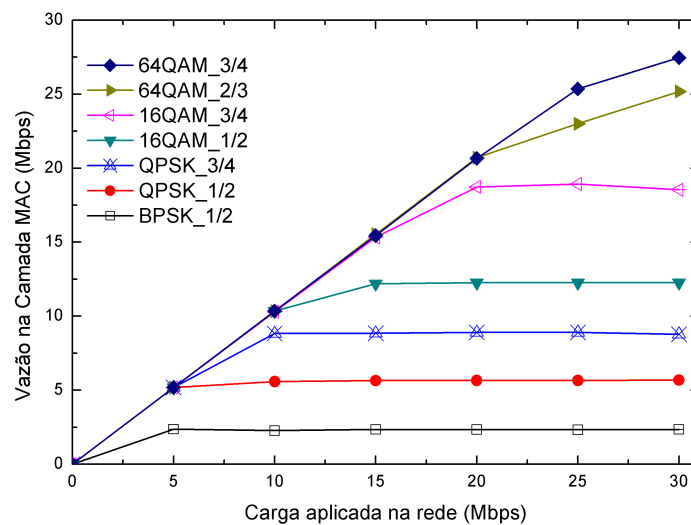


Figura 5.2: Vazão na camada MAC por MCS vs. carga de tráfego na rede [60]

A Figura 5.3 [60] apresenta a vazão calculada na camada física utilizando a equação 4.2, representando a capacidade máxima do canal *uplink* para cada MCS de acordo com a Tabela 4.1, e a vazão obtida por simulação.

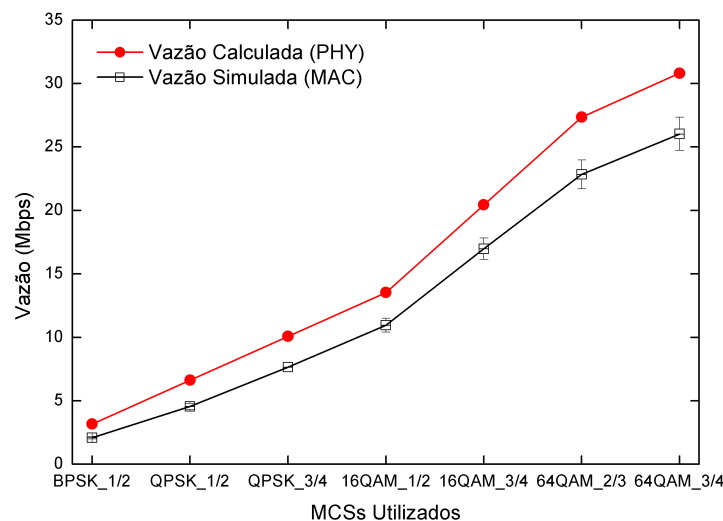


Figura 5.3: Vazão por MCS (calculada vs. simulada) [60]

Nota-se que a vazão obtida por simulação apresenta o mesmo comportamento da vazão calculada. O valor inferior apresentado pela vazão simulada sofre o efeito do *overhead* da camada MAC e pelo fato da alocação no *subframe uplink* ser realizada em *minislot*, o qual tem sua capacidade variando 44 a 428 *bytes*, conforme o perfil de MCS utilizado, não sendo totalmente preenchido em todos os *frames* transmitidos [60].

5.3.2 Cenário 2 - Ambiente com tráfego homogêneo

O objetivo deste experimento é analisar o percentual de utilização do canal de comunicação *uplink* e a vazão média para cada perfil de MCS utilizado, operando com a camada física OFDM. Para tanto, o cenário é composto por uma BS e o número de SSs variando de 10 a 30, cada SS possui uma conexão nrtPS associada a uma fonte gerando uma taxa de dados de 600 kbps, conforme experimentos realizados com o módulo base apresentado em [41].

Na Figura 5.4, a vazão média na camada MAC apresenta um comportamento de acordo com a eficiência espectral proporcionada pelo MCS utilizado, conforme apresentada na Tabela 4.1.

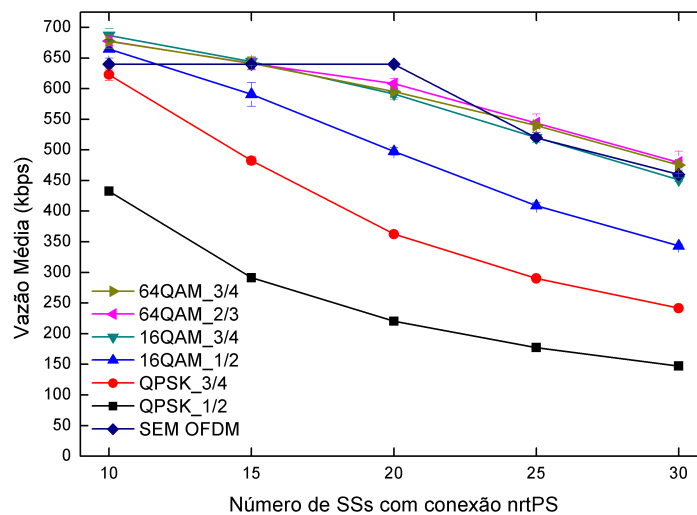


Figura 5.4: Vazão média das conexões nrtPS em relação à carga de tráfego aplicada [61]

Para o mesmo perfil de MCS, a vazão média diminui com o aumento da carga de tráfego na rede devido ao compartilhamento dos recursos entre os fluxos de tráfegos das SSs. Perfis mais robustos apresentam uma menor vazão média devido à limitação da taxa de dados do canal provocada pela quantidade de *bits* codificados por símbolo OFDM utilizada na

modulação. No entanto, permitem ao sinal transmitido atingir maiores distâncias entre a BS e as SSs [61].

Na Figura 5.5, tem-se a taxa de utilização do canal *uplink* por MCS em função da carga de tráfego aplicada na rede. Enquanto há recursos disponíveis na rede, a taxa de utilização do canal aumenta linearmente com a carga de tráfego na rede, até atingir um percentual de utilização próximo a 70% de sua capacidade máxima.

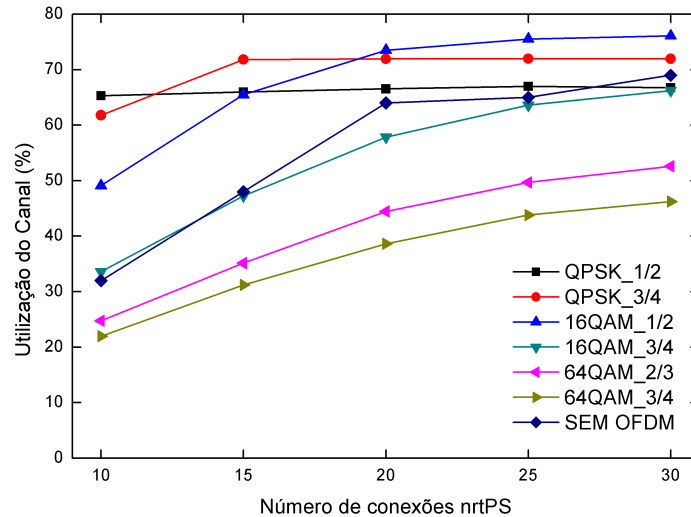


Figura 5.5: Percentual de utilização do canal por MCS [61]

Esse valor representa o ponto em que o canal é saturado pela carga de tráfego na rede e reflete a perda na utilização dos recursos alocados no *subframe uplink* e o *overhead* da camada MAC [61].

5.3.3 Cenário 3 - Ambiente com diferentes tráfegos

Para esta simulação, são utilizadas uma BS, 15 SSs com conexões UGS, 20 SSs com conexões nrtPS, 20 SSs com conexões BE e o número de SSs com conexões rtPS variando de 3 a 18. Todas as SSs utilizam o MCS 64-QAM 3/4 e o objetivo é analisar o comportamento do mecanismo de escalonamento quanto ao atendimento dos requisitos de QoS, levando em conta diferentes tipos de tráfegos aplicados na rede.

A Figura 5.6 mostra o atraso médio para os tráfegos UGS e rtPS, os quais foram definidos para os valores máximos de atraso médio de 20 e 100 ms, respectivamente, considerando o aumento na carga de tráfego na rede representada pelo número de SSs com conexão rtPS.

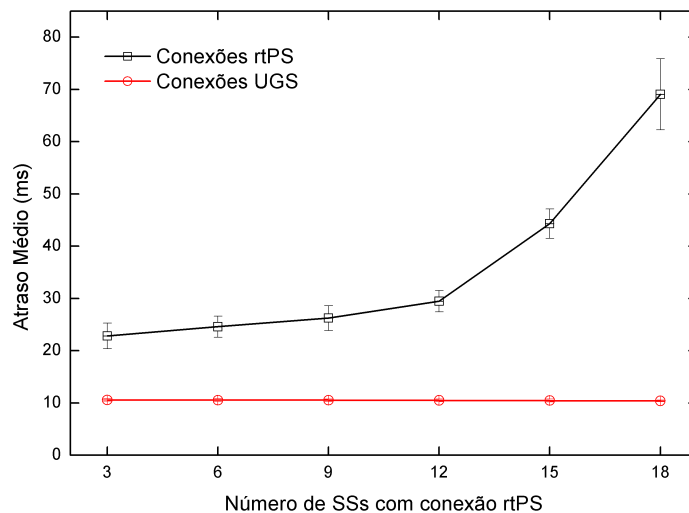


Figura 5.6: *Atraso médio das conexões UGS e rtPS vs. carga de tráfego rtPS [61]*

Nota-se que o atraso médio para o tráfego UGS na simulação é de aproximadamente 10 ms, enquanto o serviço rtPS permanece com um atraso médio inferior a 60 ms; esses valores estão abaixo dos valores máximos definidos para esses serviços, indicando que o requisito de de atraso máximo limitado foi atendido pelo mecanismo de escalonamento [61].

A Figura 5.7 mostra a vazão média para os tráfegos nrtPS e BE em função do aumento da carga de tráfego rtPS. Nota-se que o tráfego nrtPS é pouco afetado pelo aumento da carga de tráfego rtPS, mantendo-se acima do requisito de largura banda mínima estipulado de 200 kbps.

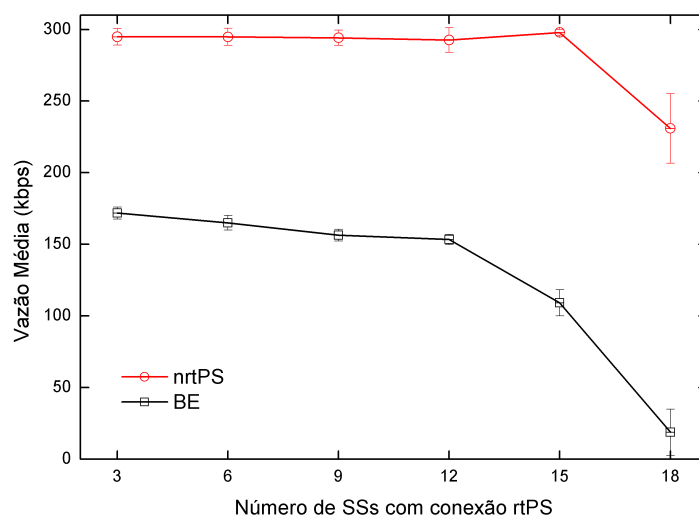


Figura 5.7: *Vazão média das conexões nrtPS e BE vs. carga de tráfego rtPS [61]*

No entanto, a demanda de largura de banda pelo serviço rtPS provoca uma queda

acentuada na vazão média do serviço BE, que não apresenta nenhum requisito de QoS [61]. O atraso médio dos fluxos de serviços de tempo real (UGS e rtPS), bem como a vazão média para os fluxos de serviços não tempo real (nrtPS e BE), têm comportamentos semelhantes aos resultados apresentados em [42].

Isso deve-se ao fato do perfil de MCS OFDM-64QAM_3/4 proporcionar um canal de comunicação com capacidade total aproximada de 61 Mbps, com uma atribuição de 30,5 Mbps para o *subframe uplink*. Nota-se, também, que a variação no tamanho do *minislot* de 250 *bytes* [42] (sem OFDM) para 428 *bytes* (OFDM-64QAM_3/4) não foi prejudicial para os fluxos de dados não tempo real, pois os mesmos apresentam pacotes de tamanho igual a 1000 *bytes* [61]; a variação na vazão desses serviços deve-se ao aumento da carga de tráfego do serviço rtPS na rede.

5.3.4 Cenário 4 - Ambiente com demanda de serviço UGS

Neste cenário analisa-se o comportamento do mecanismo de escalonamento no atendimento aos requisitos de QoS para tráfegos heterogêneos, diante de um aumento na demanda de serviço de tempo real, representado pelas SSs com fluxos de serviço UGS. Para tanto, o cenário é formado por 6 SSs com conexões rtPS, 20 SSs com conexões nrtPS, 20 SSs com conexões BE e o número de SSs com conexões UGS variando de 15 a 35. Utiliza-se o tempo de 200s em cada intervalo de simulação, para os diferentes perfis de MCSs indicados para a camada física OFDM.

A Figura 5.8 apresenta o atraso médio para as conexões UGS.

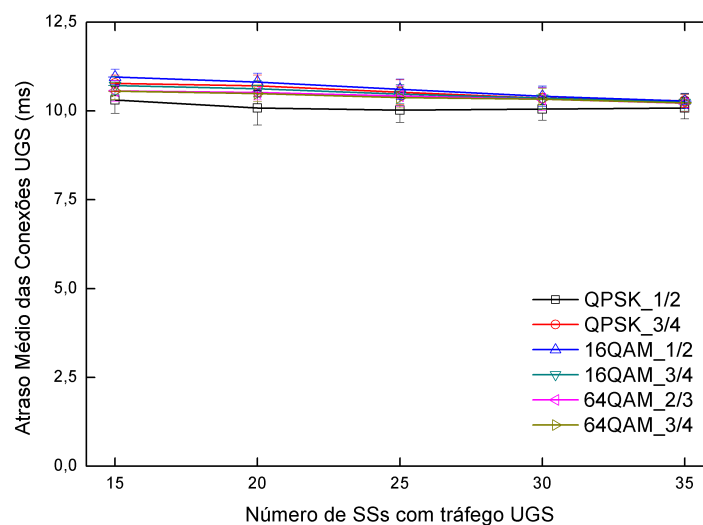


Figura 5.8: Atraso médio das conexões UGS vs. a carga de tráfego UGS

Nota-se que o aumento na carga de tráfego UGS e a variação dos perfis de MCSs provocam pouca variação no atraso médio dessas conexões. Isso porque essa classe de serviço possui largura de banda garantida e para todos os perfis de MCSs os recursos disponíveis na rede são suficientes para o fornecimento de *grants* periódicos para essas conexões como determina o padrão.

O atraso médio para as conexões tempo real com serviço rtPS versus a carga de tráfego UGS, representa pelo número de SSs na rede com conexão UGS, é mostrado na Figura 5.9 e reflete o efeito da variação da capacidade do *minislot* alocado no *subframe uplink* provocada pela mudança nos perfis dos esquemas de modulação e codificação (MCSs), conforme indicado na Tabela 4.1.

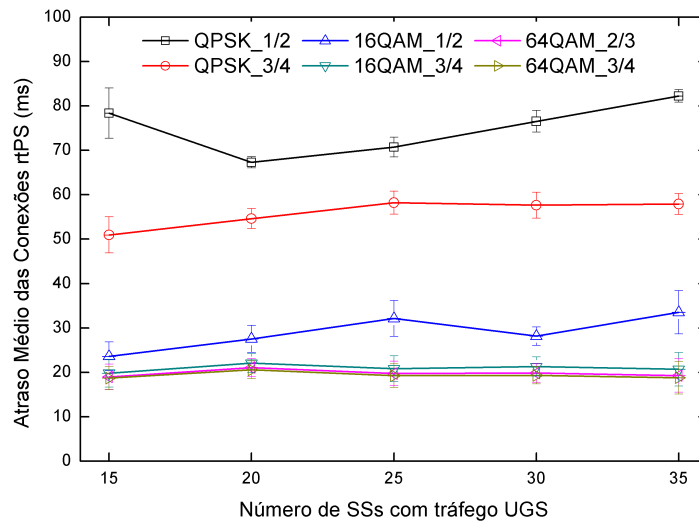


Figura 5.9: Atraso médio das conexões rtPS vs. a carga de tráfego UGS

Contudo, devido ao requisito de atraso máximo limitado da classe de serviço rtPS, o atraso médio simulado permanece abaixo dos 100ms, conforme definido para este cenário. O perfil de MCS 64QAM.3/4 permitiu um atraso médio de 20ms, enquanto no perfil QPSK.1/2 o atraso médio fica entre 60 e 80ms, dentro dos valores definidos para a esta classe de serviço.

A vazão média das conexões com tráfego nrtPS versus a carga de tráfego UGS é mostrada na Figura 5.10 e reflete a disponibilidade de recursos na rede que são alocados para esta classe de serviço. Com o aumento da carga de tráfego UGS, o mecanismo de escalonamento não consegue garantir a taxa mínima reservada pelos fluxos de serviço nrtPS, quando o perfil de modulação QPSK é utilizado. Isso se deve ao atendimento dos requisitos de QoS dos serviços de tempo real que possuem maior prioridade.

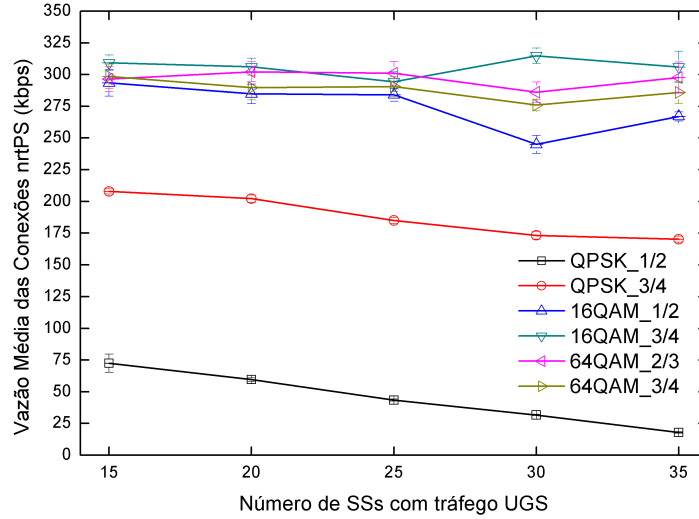


Figura 5.10: *Vazão média das conexões nrtPS vs. a carga de tráfego UGS*

O tráfego BE, por não apresentar requisitos de QoS, é afetado em todos os perfis de MCSs utilizados, conforme mostra a Figura 5.11, comprovando que todos os recursos da rede foram disponibilizados para os fluxos de maior prioridade.

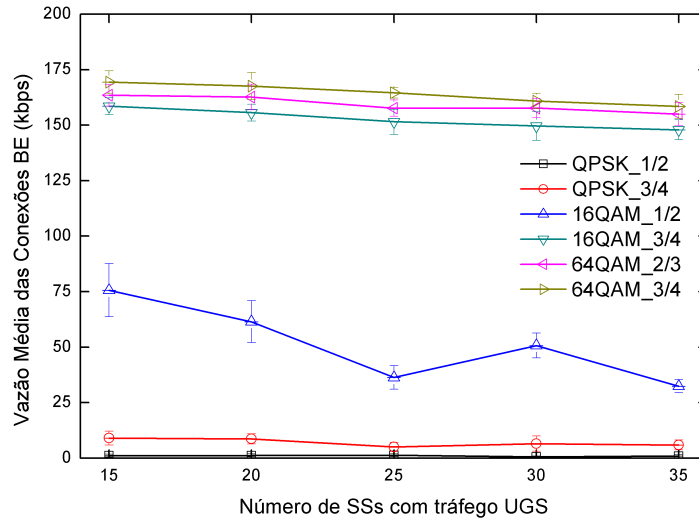


Figura 5.11: *Vazão média das conexões BE vs. a carga de tráfego UGS*

Todavia, os resultados dos experimentos de simulação realizados no cenário 4 apresentam comportamentos, de atraso médio e vazão média, compatíveis com a capacidade de transmissão do canal de comunicação *uplink* proporcionada pelo perfil de MCS utilizado e a carga de tráfego aplicada na rede.

5.3.5 Cenário 5 - Ambiente com tráfego heterogêneo para estudo dos serviços de tempo real com diferentes MCSs

Neste cenário analisa-se o atraso médio das conexões com serviços de tempo real em função do perfil de MCS utilizado. Ele foi composto por uma BS, oito SSs com conexões rtPS, oito SSs com conexões ertPS e oito SSs com conexões UGS. Também foram utilizadas oito SSs com conexões nrtPS e oito SSs com conexões BE como carga de *background*. Cada intervalo de simulação tem duração de 200 segundos e são simulados todos os perfis de MCSs definidos pelo padrão IEEE 802.16 para a camada física OFDM.

A Figura 5.12 mostra que o serviço UGS não é afetado pela variação do perfil de MCS, pois o mesmo recebe *grants* de acordo com o tamanho dos pacotes e sua taxa de geração.

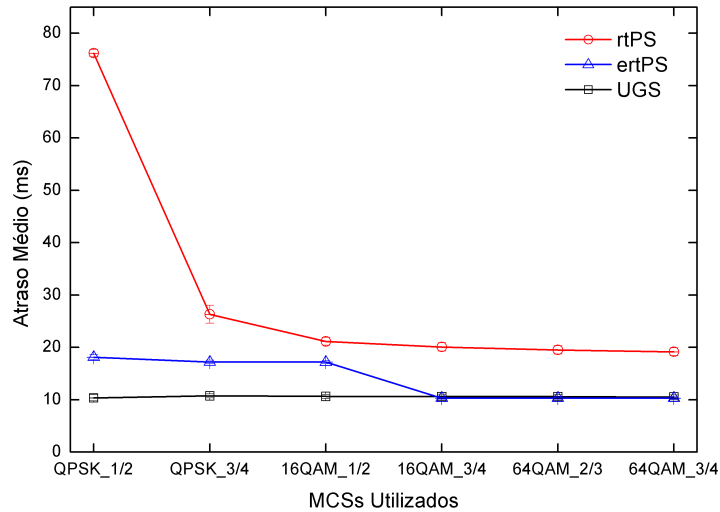


Figura 5.12: Atraso médio das conexões UGS, ertPS e rtPS vs. MCS utilizado

O serviço ertPS tem seus pacotes de tamanho variável gerados a cada 20ms, a uma taxa de 64kbps. Contudo, o atraso médio permanece abaixo dos 20ms devido ao fato dessa classe de serviço receber *grants* periódicos para a transmissão de dados, como a classe de serviço UGS, e solicitar largura de banda sob demanda como a classe de serviço rtPS, conforme determina o padrão IEEE 802.16.

Para as conexões com fluxos de serviço rtPS, o atraso médio apresenta uma variação relacionada diretamente com a eficiência do perfil de MCS utilizado, o qual determina a capacidade do *minislot* no *subframe uplink*. Assim, para o MCS 64QAM.3/4, que codifica 856 *bits* de dados por símbolo OFDM, o atraso médio fica abaixo de 20ms, enquanto que para QPSK_1/2, que codifica 184 *bits* de dados por símbolo OFDM, o atraso médio

aproxima-se de 80ms.

Este comportamento, apresentado pelos tráfegos de tempo real, indica que os recursos da rede foram suficientes para atender todas as conexões existentes, e a variação do esquema de modulação e codificação foi bem gerenciada pelo mecanismo de escalonamento.

5.4 Considerações finais do capítulo

O padrão IEEE 802.16 especifica a interface aérea para redes de acesso banda larga sem fio, definindo os requisitos de QoS para as classes de serviço da camada MAC e os parâmetros a serem utilizados na camada física. Neste Capítulo analisou-se, por meio de modelagem e simulação, o mecanismo de escalonamento *uplink* descrito na referência [4] e estendido neste trabalho conforme apresentado no Capítulo 4.

Os resultados obtidos mostram que a inclusão da camada física OFDM na modelagem e simulação permite à BS ajustar o perfil de modulação e codificação a ser utilizado pela SS, de acordo com a variação das características do meio físico, indicada pelo valor da SNR na SS, proporcionando diferentes taxas de transmissão para o canal de comunicação sem fio, com diferentes níveis de robustez.

Utilizando os perfis de MCSs definidos pela camada física OFDM, a vazão na camada MAC atinge percentuais próximos a 70% da capacidade máxima do canal calculada na camada física para cada MCS. Isto indica que há uma sobrecarga provocada pelo cabeçalho do pacote na camada MAC e pela subutilização dos *minislots* devido à variação de sua capacidade de 92 a 427 *bytes*, não sendo totalmente preenchidos em todos os *subframes uplink* transmitidos. No entanto, o percentual de utilização do canal permanece acima do valor apresentado sem a utilização dos parâmetros definidos pela camada física OFDM.

Com o adequado dimensionamento da rede, para evitar a saturação do enlace pela carga de tráfego aplicada, os requisitos de QoS para os serviços de tempo real mantém-se dentro dos valores definidos pelo padrão para cada classe de serviço. O atraso médio dos pacotes para os fluxos de serviço UGS não é afetado pela variação do MCS e o atraso no tráfego rtPS mantém-se abaixo do requisito de atraso máximo limitado definido para essa classe de serviço.

Em ambientes com tráfegos heterogêneos e utilizando o MCS 64-QAM 3/4 para todos os fluxos, o aumento na carga do tráfego rtPS não afeta o atraso das conexões UGS

e as conexões rtPS mantém atraso inferior aos 100ms, limiar máximo estipulado para essa classe. As conexões com fluxo de tráfego nrtPS apresentam uma vazão acima da taxa mínima reservada, enquanto a vazão das conexões com fluxo de tráfego BE sofrem acentuada queda devido ao fato desta classe de serviço não apresentar garantias de QoS.

Portanto, a utilização da camada física OFDM nos experimentos de simulação permite resultados mais realistas, ao levar em conta a capacidade de transmissão do canal comunicação e as variações das características do meio físico.

Capítulo 6

Conclusões

As recentes inovações tecnológicas na área da comunicação sem fio vêm proporcionando grandes transformações na maneira de viver, aprender e trabalhar dos indivíduos e da sociedade. Neste contexto, a tecnologia WiMAX fornece acesso em banda larga sem fio para longa distância, atendendo uma variedade de aplicações, como transmissão multimídia e interligação de redes locais, com o foco voltado para o provimento de qualidade de serviço, o que a torna promissora com o avanço tecnológico no campo das comunicações sem fio, possibilitando suporte para novas aplicações dos usuários.

Neste trabalho foi abordada a tecnologia para redes de acesso sem fio no padrão IEEE 802.16, destacando-se as camadas MAC e PHY, com as definições da estrutura da rede e especificações das faixas de frequências utilizadas, o modelo de referência de gerenciamento e o modelo de referência de rede. Foram detalhadas as características da camada física com as especificações para a frequência de operação, largura de banda e esquemas de modulação, codificação e técnicas para correção de erros.

Na camada PHY, a multiplexação por divisão de frequência ortogonal (OFDM) permite esquemas de modulação e codificação que possibilitam maior robustez ao sinal transmitido, com eficiência na utilização dos recursos do canal de comunicação sem fio. As técnicas de duplexação por divisão de tempo (TDD) e duplexação por divisão de frequência (FDD) permitem o compartilhamento do canal para transmissão *downlink* e *uplink*, com a divisão do *frame* em *subframe downlink* e *subframe uplink* separados no tempo ou na frequência. Para realizar o controle de acesso ao meio, a camada MAC está dividida em três subcamadas, as quais proveem interfaces com outras tecnologias de rede, segurança e gerenciamento dos recursos da rede para oferecer qualidade de serviço através das funções

associadas aos mecanismos de controle de admissão de conexões (CAC) e mecanismos de escalonamento.

A provisão de QoS no padrão IEEE 802.16 está definida na camada MAC pela especificação de cinco classes de serviço (UGS, rtPS, ertPS, nrtPS e BE), permitindo a classificação e priorização dos tráfegos, com essas funções atribuídas aos mecanismos de CAC e de escalonamento. O mecanismo de CAC gerencia a entrada de conexões na rede, evitando que a admissão de uma nova conexão prejudique o atendimento dos requisitos de QoS das conexões presentes na rede. Os serviços de escalonamento caracterizam-se por um conjunto de parâmetros que quantificam os aspectos do seu comportamento, sendo único para cada conexão. O escalonador da BS para o tráfego *uplink* tem a função de atribuir *grants* para as estações cliente enviarem requisições de largura de banda e dados nos *subframes uplink*, permitindo o atendimento de QoS dos tráfegos na direção *uplink*.

Para permitir uma análise mais realista do escalonamento *uplink* da BS, foi apresentada uma proposta de extensão do módulo WiMAX desenvolvido em [3], no qual foi incluída a camada física OFDM e ajustado o mecanismo de escalonamento *uplink* para permitir alocação de largura de banda para as SSs levando-se em conta o valor da SNR indicado pela SS, para selecionar uma técnica de modulação e codificação que permita maior aproveitamento do canal de comunicação. Dessa forma, a alocação de recursos no *subframe uplink* passa a ser definida em função da largura de banda do canal de comunicação, do prefixo cíclico e do MCS utilizado. Com a utilização da camada física OFDM e a adição do prefixo cíclico, aumenta-se o tempo do símbolo OFDM, o que o torna mais resistente às interferências intersimbólicas (ISI) e interportadoras (ICI), permitindo ao sinal transmitido alcançar maior distância entre a BS e a SS.

Experimentos realizados por meio de modelagem e simulação indicaram a necessidade do mecanismo de escalonamento *uplink* considerar as variações das características do meio físico, para aplicar técnicas de modulação que permitam melhor aproveitamento dos recursos do canal *uplink*.

Foram analisados os parâmetros de atraso médio para os fluxos de tempo real e a vazão média para os fluxos não tempo real, com a utilização dos esquemas de modulação definidos no padrão IEEE 802.16. Em todos os cenários, a latência média manteve-se abaixo do requisito de atraso máximo limitado definido para cada classe de serviço. A vazão média para os tráfegos nrtPS manteve-se acima da taxa mínima reservada, enquanto

os fluxos de tráfego BE só foram atendidos quando havia sobra de recursos disponíveis na rede. Com isso, faz-se necessário um dimensionamento da rede de acordo com as características de seus tráfegos, para que os seus recursos sejam suficientes para atender os requisitos de QoS de todas as conexões admitidas na rede.

As variações das características do meio de propagação exigem alterações dos perfis de modulação e codificação de maneira dinâmica. Tais alterações produzem mudanças na capacidade do *minislot*, exigindo do mecanismo de escalonamento *uplink* um melhor gerenciamento dos recursos do canal de comunicação a serem alocados, para evitar a subutilização dos *minislots* nos *frames* transmitidos.

Como trabalhos futuros, propõe-se um mecanismo de escalonamento *uplink* que considere as condições de propagação do sinal de RF no canal de comunicação sem fio e determine o valor da SNR dinamicamente de acordo com a variação da potência do sinal de RF no receptor, para permitir a seleção do MCS durante o processo de comunicação. Pode-se, também, estender o mecanismo de escalonamento *uplink* para considerar a possibilidade de variação da distância entre a SS e a BS durante o tempo da conexão, considerando um ambiente de rede com mobilidade do usuário, bem como o deslocamento do assinante entre áreas de coberturas atendidas por diferentes estações base.

Referências Bibliográficas

- [1] IEEE Std 802.16-2004. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part. 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*. New York, USA, Outubro 2004.
- [2] IEEE Std 802.16-2009. *IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part. 16: Air Interface Broadband Wireless Access Systems*. New York, USA, Maio 2009.
- [3] BORIN, J. F. & FONSECA, N. L. S. da. Simulator for WiMAX networks. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Elsevier, v. 16, n. 7, p. 817–833, 2008. ISSN 1569-190X.
- [4] BORIN, J. F. & FONSECA, N. L. S. da. Scheduler for IEEE 802.16 Networks. *IEEE Communications Letters*, v. 12, n. 4, p. 274 – 276, Abril 2008.
- [5] ROUIL, R. The network simulator NS-2 NIST add-on: IEEE 802.16 model (MAC+PHY). *Maryland, USA: National Institute of Standards and Technology*, 2007.
- [6] WiMAX Forum. <http://www.wimaxforum.org>. Setembro 2010.
- [7] IEEE Std 802.16e-2005 and IEEE Std 802.16-2004/Cor1-2005. *IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum 1*. New York, USA, Fevereiro 2006.
- [8] IEEE 802.16 Task Group m. <http://wirelessman.org/tgm/docs/80216m-07-002r10.pdf>. Janeiro 2010.

- [9] KURAN, M. & TUGCU, T. A survey on emerging broadband wireless access technologies. *Computer Networks*, Elsevier, v. 51, n. 11, p. 3013–3046, 2007. ISSN 1389-1286.
- [10] ZHANG, Y. *WiMAX Network Planning and Optimization*. Boca Raton: CRC Press, 2009.
- [11] PRASAD, R. & VELEZ, F. OFDMA WiMAX Physical Layer. *WiMAX Networks*, Springer, p. 63–135, 2010.
- [12] OHRTMAN, F. *WiMAX Handbook: Building 802.16 Wireless Networks*. New York: McGraw-Hill, 2005.
- [13] ANDREWS, J. G.; GHOSH, A. & MUHAMED, R. *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007.
- [14] HOYMAN, C. Analysis and performance evaluation of the OFDM-based metropolitan area network IEEE 802.16. *Computer Networks*, Elsevier, v. 49, n. 3, p. 341–363, 2005.
- [15] KHAN, M. & GHOURI, S. The WiMAX 802.16e physical layer model. In: IET. *Wireless, Mobile and Multimedia Networks, 2008. IET International Conference on*. [S.l.], 2008. p. 117–120.
- [16] NUAYMI, L. *WiMAX-Technology for Broadband Wireless Access*. Boca Raton: John Wiley & Sons, 2007.
- [17] PRASAD, R. & VELEZ, F. Medium Access Control Layer. *WiMAX Networks*, Springer, p. 137–190, 2010.
- [18] ALAVI, H.; MOJDEH, M. & YAZDANI, N. A quality of service architecture for IEEE 802.16 standards. In: *2005 Asia-Pacific Conference on Communications*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 249–253.
- [19] SO-IN, C.; JAIN, R. & TAMIMI, A. Scheduling in IEEE 802.16 e mobile WiMAX networks: key issues and a survey. *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on*, IEEE, v. 27, n. 2, p. 156–171, 2009. ISSN 0733-8716.
- [20] AHSON, S. & ILYAS, M. *WiMAX Standards and Security*. Boca Raton: CRC Press, 2008.

- [21] MA, M. & LU, J. QoS Provision Mechanisms in WiMax. *Current Technology Developments of WiMax Systems*, Springer, p. 85–114, 2009.
- [22] GE, Y. & KUO, G. An efficient admission control scheme for adaptive multimedia services in IEEE 802.16 e networks. In: *2006 IEEE 64th Vehicular Technology Conference, 2006. VTC-2006 Fall*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–5.
- [23] TSAI, T.; JIANG, C. & WANG, C. Cac and packet scheduling using token bucket for iee 802.16 networks. *Journal of Communications*, v. 1, n. 2, p. 30, 2006.
- [24] WONGTHAVARAWAT, K. & GANZ, A. Packet scheduling for QoS support in IEEE 802.16 broadband wireless access systems. *International Journal of Communication Systems*, v. 16, p. 81–96, Fevereiro 2003.
- [25] HOU, F.; HO, P. & SHEN, X. WLC17-1: Performance Analysis of a Reservation Based Connection Admission Scheme in 802.16 Networks. In: *IEEE Global Telecommunications Conference, 2006. GLOBECOM'06*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 1–5.
- [26] JIANG, C. & TSAI, T. Token bucket based CAC and packet scheduling for IEEE 802.16 broadband wireless access networks. v. 1, p. 183–187, 2006.
- [27] BORIN, J. F. & FONSECA, N. L. S. da. Algoritmos para controle de admissão e escalonamento do tráfego uplink em redes IEEE 802.16. *CSBC WPerformance - VIII Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação*, Bento Gonçalves - RS, p. 2273 – 2288, Julho 2009.
- [28] BELGHITH, A. & NUAYMI, L. Scheduling Techniques for WiMAX. *Current Technology Developments of WiMax Systems*, Springer, p. 61–84, 2009.
- [29] DHRONA, P.; ALI, N. A. & HASSANEIN, H. A performance study of uplink scheduling algorithms in point-to-multipoint WiMAX networks. *Comput. Commun.*, Butterworth-Heinemann, Newton, MA, USA, v. 32, n. 3, p. 511–521, 2009. ISSN 0140-3664.
- [30] CICCONE, C. et al. Performance evaluation of the IEEE 802.16 MAC for QoS support. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, Published by the IEEE Computer Society, p. 26–38, 2007.

- [31] VINAY, K. et al. Performance evaluation of end-to-end delay by hybrid scheduling algorithm for QoS in IEEE 802.16 network. In: *Wireless and Optical Communications Networks, 2006 IFIP International Conference on*. [S.l.: s.n.], 2006. p. 11–13.
- [32] LIU, Q.; WANG, X. & GIANNAKIS, G. B. A Cross-Layer Scheduling Algorithm with QoS Support in Wireless Network. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 55, n. 3, p. 839–847, Maio 2006.
- [33] RATH, H.; BHORKAR, A. & SHARMA, V. An opportunistic drr (o-drr) uplink scheduling scheme for ieee 802.16-based broadband wireless networks. In: *IETE, International Conference on Next Generation Networks (ICNGN), Mumbai*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 9.
- [34] KUROSE, J. F. & ROSS, K. W. *Redes de Computadores e a Internet: Uma Nova Abordagem Top-down*. 3. ed. São Paulo: Addison Wesley, 2006.
- [35] ZHANG, H. & BENNETT, J. WF2Q: worst-case fair weighted fair queueing. In: *Proceedings of IEEE Infocom'96*. [S.l.: s.n.], 1996. v. 1, p. 120–128.
- [36] BALL, C. F. et al. Performance Analysis of Temporary Removal Scheduling applied to mobile WiMAX Scenarios in Tight Frequency Reuse. *IEEE 16th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC 2005*, v. 2, p. 888–894, Setembro 2005.
- [37] XERGIAS, S. A.; PASSAS, N. & MERAKOS, L. Flexible Resource Allocation in IEEE 802.16 Wireless Metropolitan Area Networks. *The 14th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks, LANMAN 2005*, Chania, Greece, p. 18–21, Setembro 2005.
- [38] MUKUL, R. et al. An adaptive bandwidth request mechanism for QoS enhancement in WiMax real time communication. *IFIP International Conference on Wireless and Optical Communications Networks*, 2006.
- [39] CHIANG, C.; LIAO, W. & LIU, T. Adaptive downlink/uplink bandwidth allocation in ieee 802.16 (wimax) wireless networks: A cross-layer approach. In: *IEEE Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM'07*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 4775–4779.

- [40] NIE, C.; VENKATACHALAM, M. & YANG, X. Adaptive Polling Service for Next-Generation IEEE 802.16 WiMAX Networks. *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '07*, p. 4754 – 4758, Novembro 2007.
- [41] BORIN, J. F. & FONSECA, N. L. S. da. Uplink Scheduling with Quality of Service in IEEE 802.16 Networks. *IEEE Global Telecommunications Conference, GLOBECOM '07*, p. 2503 – 2508, Novembro 2007.
- [42] BORIN, J. F. & FONSECA, N. L. S. da. Escalonamento com Qualidade de Serviço em redes IEEE 802.16. *Redes IEEE 802.16 e em Malha, SBRC 2007*, p. 723–736, 2007.
- [43] SAYENKO, A.; ALANEN, O. & HÄMÄLÄINEN, T. Scheduling solution for the IEEE 802.16 base station. *Computer Networks*, Elsevier, v. 52, n. 1, p. 96–115, 2008. ISSN 1389-1286.
- [44] CHEN, J.; JIAO, W. & WANG, H. A service flow management strategy for IEEE 802.16 broadband wireless access systems in TDD mode. v. 5, p. 3422–3426, 2005.
- [45] WONGTHAVARAWAT, K. & GANZ, A. IEEE 802.16 based last mile broadband wireless military networks with quality of service support. In: IEEE. *Military Communications Conference, 2003. MILCOM 2003. IEEE*. [S.l.], 2004. v. 2, p. 779–784. ISBN 0780381408.
- [46] TARCHI, D.; FANTACCI, R. & BARDAZZI, M. Quality of service management in IEEE 802.16 wireless metropolitan area networks. In: IEEE. *Communications, 2006. ICC'06. IEEE International Conference on*. [S.l.], 2006. v. 4, p. 1789–1794. ISBN 1424403553.
- [47] The Network Simulator - ns-2. <http://www.isi.edu/nsnam/ns>. Janeiro 2009.
- [48] BORIN, J. F. *Mecanismos para provisão de Qualidade de Serviço em redes IEEE 802.16*. Tese (Doutorado) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas - SP, Janeiro 2010.
- [49] BORIN, J. F. & FONSECA, N. L. S. da. Um módulo para simulação de redes WiMAX no simulador ns-2. *SBC Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação, Wperformance*, Belém do Pará, PA, p. 180–199, Julho 2008.

- [50] SAYENKO, A. et al. Ensuring the QoS Requirements in 802.16 Scheduling. *International Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems Archive Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems*, New York, NY, USA, p. 108 – 117, Outubro 2006.
- [51] BELGHITH, A. & NUAYMI, L. Comparison of WiMAX scheduling algorithms and proposals for the rtPS QoS class. *14th European Wireless Conference, EW 2008*, p. 1–6, Junho 2008.
- [52] CHAN, S. et al. Algorithms for WiMAX scheduling. In: IEEE. *Microwave Conference, 2008. APMC 2008. Asia-Pacific*. [S.l.]. p. 1–4.
- [53] GAN, W. et al. A cross-layer designed scheduling algorithm for WiMAX uplink. In: IEEE. *Electronic Measurement & Instruments, 2009. ICEMI'09. 9th International Conference on*. [S.l.]. p. 1–122.
- [54] LIU, X.; CHONG, E. & SHROFF, N. Optimal opportunistic scheduling in wireless networks. In: IEEE. *Vehicular Technology Conference, 2003. VTC 2003-Fall. 2003 IEEE 58th*. [S.l.], 2000. v. 3, p. 1417–1421. ISBN 0780379543. ISSN 1090-3038.
- [55] LU, J. & MA, M. A cross-layer elastic CAC and holistic opportunistic scheduling for QoS support in WiMAX. *Computer Networks*, Elsevier, v. 54, n. 7, p. 1155–1168, 2010. ISSN 1389-1286.
- [56] LAKKAKORPI, J.; SAYENKO, A. & MOILANEN, J. Comparison of Different Scheduling Algorithms for WiMAX Base Station: Deficit Round-Robin vs. Proportional Fair vs. Weighted Deficit Round-Robin. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference, WCNC 2008*, p. 1991–1996, Março-Abril 2008.
- [57] SO-IN, C.; JAIN, R. & TAMINI, A.-K. A Deficit Round Robin with Fragmentation Scheduler for IEEE 802.16e Mobile WiMAX. *IEEE Sarnoff Symposium, SARNOFF '09*, p. 1–7, Março-Abril 2009.
- [58] BRANDY, P. Model for Generating On-Off Speech Patterns in Two-Way Conversation. *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 46, p. 109, 1969.

- [59] BARFORD, P. et al. Changes in web client access patterns - characteristics and caching implications. *World Wide Web*, v. 2, p. 15–28, 1998.
- [60] OLIVEIRA, A. N. & GUARDIEIRO, P. R. Um estudo do escalonamento uplink levando em conta a camada física especificada no padrão IEEE 802.16. *VIII Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica (CEEL)*, Uberlândia - MG, Outubro 2010.
- [61] OLIVEIRA, A. N. & GUARDIEIRO, P. R. Análise do escalonamento uplink em redes WiMAX considerando a camada física OFDM. *9th International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS)*, Rio de Janeiro - RJ, Dezembro 2010.