

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA**

**UMA ARQUITETURA DE QoS E MODELO DE  
SIMULAÇÃO PARA O PADRÃO IEEE 802.16d COMO  
SUPORTE A SERVIÇOS MULTIMÍDIA  
DISTRIBUÍDOS**

**Renzo Que devez Malini**

**Dissertação de Mestrado em Informática**

**Vitória, Maio de 2007**

# **Livros Grátis**

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA**

**UMA ARQUITETURA DE QoS E MODELO DE  
SIMULAÇÃO PARA O PADRÃO IEEE 802.16d COMO  
SUPORTE A SERVIÇOS MULTIMÍDIA  
DISTRIBUÍDOS**

**POR:**

**RENZO QUEDEVEZ MALINI**

**ORIENTADOR:**

**PROF. DR. ANILTON SALLES GARCIA**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA À UNIVERSIDADE  
FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO COMO PARTE DOS PRÉ-REQUISITOS  
NECESSÁRIOS À OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM INFORMÁTICA.**

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: REDES DE COMPUTADORES**

**VITÓRIA, ES – BRASIL**

**2007**

**UMA ARQUITETURA DE QoS E MODELO DE  
SIMULAÇÃO PARA O PADRÃO IEEE 802.16d COMO  
SUPORTE A SERVIÇOS MULTIMÍDIA  
DISTRIBUÍDOS**

**Renzo Quevedez Malini**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO COMO REQUISITO PARCIAL PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM INFORMÁTICA.**

**APROVADA EM 18/05/2007 POR:**

---

**PROF. DR. ANILTON SALLES GARCIA, UFES**

---

**PROF. DR. MOISÉS RENATO NUNES RIBEIRO, UFES**

---

**DR. AMAURY KRUEL BUDRI, B2TW TELECOM. E INFORMÁTICA**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**

**VITÓRIA, MAIO DE 2007**

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

M251a Malini, Renzo Quevedez, 1981-  
Uma arquitetura de QoS e modelo de simulação para o padrão IEEE  
802.16d como suporte a serviços multimídia distribuídos / Renzo  
Quevedez Malini. – 2007.  
108 f. : il.

Orientador: Anilton Salles Garcia.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Espírito Santo,  
Centro Tecnológico.

1. Redes metropolitanas de computação. 2. Redes de computação -  
Protocolos. 3. Serviços multimídia. 4. Qualidade de serviço. I. Garcia,  
Anilton Salles. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro  
Tecnológico. III. Título.

CDU: 004

---

## *Dedicatória*

Dedico este trabalho aos meus pais, Valmecir Carlos Malini e Marise Que devez Malini, cujos exemplos foram e continuam sendo o maior diferencial para o meu sucesso.

## *Agradecimentos*

Aos meus pais, Valmecir Carlos Malini e Marise Quevedez Malini, e meus irmãos, Franco Quevedez Malini, Sandro Quevedez Malini e Ana Carolina Quevedez Malini, pelo apoio e incentivo constantes. Apesar de não entenderem muito sobre Redes de Computadores e Padrão IEEE 802.16, eles têm grande participação neste trabalho. Nós formamos uma equipe e tanto!

Ao meu orientador, Prof. Dr. Anilton Salles Garcia, por sua dedicação, confiança depositada e estímulo para a concretização deste trabalho.

Ao Amaury Kruehl Budri, grande parceiro neste trabalho, cuja “consultoria” foi de grande valia e, por diversas vezes, apontou caminhos a serem seguidos.

Aos colegas do grupo WiMAX UFES, que enriqueciam as discussões sobre WiMAX em nossas reuniões e que, assim, contribuíram de maneira importante para este trabalho.

Aos colegas do LPRM, pela amizade e por manterem a infra-estrutura sempre operacional.

Ao amigo Ricardo Emanuel Vaz Vargas, que às vezes me lembrava que eu deveria acabar logo este trabalho! Agradeço também aos amigos que, de alguma forma, deram sua valiosa contribuição (em ordem alfabética): Camilo Zardo Calvi, Carlos Eduardo Andrião, Rodrigo Bonfá Drago e Thiago Nico Delfino.

Ao Prof. Dr. Moisés Renato Nunes Ribeiro, pelo tempo e atenção dedicados para avaliação deste trabalho.

Aos professores e funcionários da UFES, pelo trabalho desempenhado.

À Petróleo Brasileiro S.A. – Petrobras, que, apesar do pouco tempo, já faz parte da minha vida e tem me ensinado tanto. *O desafio é a nossa energia!*

Finalmente, não posso deixar de agradecer ao Edson Rabelo de Moraes, da Companhia Vale do Rio Doce, e ao pessoal da Motorola e da Kofre Telecomunicações. Essas pessoas me abriram uma porta valiosíssima, e eu sempre me lembrarei disso.

A todos vocês, muito obrigado!!!

## *Lista de Tabelas*

Tabela 7.1. Conexões de aplicação na rede IEEE 802.16 simulada.....	90
Tabela 7.2. Distribuição da geração de tráfego entre as classes de serviço no Cenário 1.....	95
Tabela 7.3. Atraso médio para cada classe de serviço no Cenário 1.....	95
Tabela 7.4. Distribuição da geração de tráfego entre as classes de serviço no Cenário 2.....	97
Tabela 7.5. Atraso médio para cada classe de serviço no Cenário 2.....	97



## *Lista de Figuras*

Figura 2.1. A arquitetura de QoS para o protocolo MAC de IEEE 802.16 [9] .....	24
Figura 2.2. Arquitetura de QoS proposta para IEEE 802.16 [13] .....	27
Figura 2.3. Arquitetura de escalonamento de QoS para IEEE 802.16 [14].....	28
Figura 3.1. Possível cenário de aplicação de IEEE 802.16 [23].....	39
Figura 3.2. Camadas de protocolo do padrão IEEE 802.16 .....	40
Figura 3.3. Formato do cabeçalho MAC genérico .....	41
Figura 3.4. Formato do cabeçalho MAC de requisição de banda.....	43
Figura 3.5. Quadro MAC TDD do padrão IEEE 802.16 [6] .....	51
Figura 3.6. Encapsulamento dos conjuntos de parâmetros de QoS de um fluxo de serviço [22] .....	55
Figura 3.7. Modelo de objetos da camada MAC de IEEE 802.16 [22].....	56
Figura 5.1. Arquitetura de QoS proposta para a camada MAC de IEEE 802.16 .....	67
Figura 6.1. NS sob o ponto de vista do usuário (visão simplificada) [31] .....	75
Figura 6.2. Arquitetura do NS [31].....	76
Figura 6.3. Formato e exemplo de conteúdo de um arquivo <i>trace</i> [31] .....	77
Figura 6.4. Exemplos de redes <i>ad-hoc</i> e infra-estruturadas .....	78
Figura 6.5. Esquema de um nó móvel do NS [32] .....	80
Figura 6.6. Diagrama de classes simplificado do modelo de simulação .....	83
Figura 6.7. Relacionamento entre objetos envolvidos com o controle de fluxos entre BS e SSs .....	85
Figura 6.8. Estabelecimento de nova conexão entre a BS e uma SS.....	85
Figura 6.9. Transmissão de um pacote da BS para uma SS .....	86
Figura 6.10. Algoritmo de QoS proposto .....	87
Figura 7.1. Esquema da rede IEEE 802.16 simulada .....	90
Figura 7.2. <i>ServiceFlows</i> gerados na simulação a partir das conexões da Tabela 7.1 .....	91

Figura 7.3. Utilização média de banda para cada classe de serviço no Cenário 1 .....	96
Figura 7.4. Tamanho médio das filas para cada classe de serviço no Cenário 1.....	96
Figura 7.5. Utilização média de banda para cada classe de serviço no Cenário 2 .....	98
Figura 7.6. Tamanho médio das filas para cada classe de serviço no Cenário 2.....	99

## *Lista de Acrônimos*

<b>3G</b>	– <i>Third Generation</i>
<b>4G</b>	– <i>Fourth Generation</i>
<b>AAS</b>	– <i>Advanced Antenna System</i>
<b>ARQ</b>	– <i>Automatic Repeat reQuest</i>
<b>BE</b>	– <i>Best Effort</i>
<b>BR</b>	– <i>Bandwidth Request</i>
<b>BS</b>	– <i>Base Station</i>
<b>BSN</b>	– <i>Block Sequence Number</i>
<b>BWA</b>	– <i>Broadband Wireless Access</i>
<b>CBR</b>	– <i>Constant Bit Rate</i>
<b>CDMA</b>	– <i>Code Division Multiple Access</i>
<b>CID</b>	– <i>Connection Identifier</i>
<b>CPS</b>	– <i>Common Part Sublayer</i>
<b>CRA</b>	– <i>Contention Resolution Algorithm</i>
<b>CRC</b>	– <i>Contention Ratio Calculator</i>
<b>CS</b>	– <i>Convergence Sublayer</i>
<b>CSA</b>	– <i>Contention Slot Allocator</i>
<b>CSMA/CA</b>	– <i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Avoidance</i>
<b>CSMA/CD</b>	– <i>Carrier Sense Multiple Access with Collision Detection</i>
<b>DCD</b>	– <i>Downlink Channel Descriptor</i>
<b>DIUC</b>	– <i>Downlink Interval Usage Code</i>
<b>DL-MAP</b>	– <i>Downlink Map</i>
<b>ERB</b>	– <i>Estação Rádio-Base</i>
<b>ETSI</b>	– <i>European Telecommunications Standards Institute</i>

<b>FCH</b>	– <i>Frame Control Header</i>
<b>FDD</b>	– <i>Frequency Division Duplexing</i>
<b>FIFO</b>	– <i>First In First Out</i>
<b>FTP</b>	– <i>File Transfer Protocol</i>
<b>GSM</b>	– <i>Global System for Mobile Communication</i>
<b>HCS</b>	– <i>Header Check Sequence</i>
<b>HiperMAN</b>	– <i>High Performance Metropolitan Area Network</i>
<b>HT</b>	– <i>Header Type</i>
<b>IE</b>	– <i>Information Element</i>
<b>IEEE</b>	– <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<b>IFq</b>	– <i>InterFace of queue</i>
<b>IP</b>	– <i>Internet Protocol</i>
<b>LL</b>	– <i>Link Layer</i>
<b>LOS</b>	– <i>Line of Sight</i>
<b>MAC</b>	– <i>Medium Access Control</i>
<b>NetIF</b>	– <i>Network InterFace</i>
<b>nrtPS</b>	– <i>non-real-time Polling Service</i>
<b>NS</b>	– <i>Network Simulator</i>
<b>OFDM</b>	– <i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
<b>OTCL</b>	– <i>Object-oriented Tool Command Language</i>
<b>PHY</b>	– <i>Physical Layer</i>
<b>PMP</b>	– <i>Point-to-MultiPoint</i>
<b>QoS</b>	– <i>Quality of Service</i>
<b>RTG</b>	– <i>Receiver-transmitter Turnaround Gap</i>
<b>rtPS</b>	– <i>real-time Polling Service</i>
<b>SAP</b>	– <i>Service Access Point</i>

<b>SDMA</b>	– <i>Space Division Multiple Access</i>
<b>SDU</b>	– <i>Service Data Unit</i>
<b>SFID</b>	– <i>Service Flow ID</i>
<b>SNMP</b>	– <i>Simple Network Management Protocol</i>
<b>SS</b>	– <i>Subscriber Station</i>
<b>TCL</b>	– <i>Tool Command Language</i>
<b>TDD</b>	– <i>Time Division Duplexing</i>
<b>TFTP</b>	– <i>Trivial File Transfer Protocol</i>
<b>ToS</b>	– <i>Type of Service</i>
<b>TTG</b>	– <i>Transmitter-receiver Turnaround Gap</i>
<b>UCD</b>	– <i>Uplink Channel Descriptor</i>
<b>UGS</b>	– <i>Unsolicited Grant Service</i>
<b>UIUC</b>	– <i>Uplink Interval Usage Code</i>
<b>UL-MAP</b>	– <i>Uplink Map</i>
<b>UML</b>	– <i>Unified Modeling Language</i>
<b>VINT</b>	– <i>Virtual InterNetwork Testbed</i>
<b>VoIP</b>	– <i>Voice over IP</i>
<b>WFQ</b>	– <i>Weighted Fair Queuing</i>
<b>WiMAX</b>	– <i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
<b>WLAN</b>	– <i>Wireless Local Area Network</i>
<b>WMAN</b>	– <i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
<b>WPAN</b>	– <i>Wireless Personal Area Network</i>
<b>WRR</b>	– <i>Weighted Round Robin</i>

# Sumário

<b>1</b>	<b><i>Introdução</i></b> .....	<b>18</b>
1.1	<i>Motivação</i> .....	18
1.2	<i>Definição do problema</i> .....	19
1.3	<i>Objetivos da dissertação</i> .....	20
1.4	<i>Organização da dissertação</i> .....	21
<b>2</b>	<b><i>Revisão Bibliográfica e Trabalhos Relacionados</i></b> .....	<b>23</b>
2.1	<i>O trabalho de Chu, Wang e Mei</i> .....	24
2.2	<i>O trabalho de Cho, Song, Kim e Han</i> .....	26
2.3	<i>O trabalho de Maheshwari</i> .....	28
2.4	<i>Conclusão</i> .....	32
<b>3</b>	<b><i>Introdução às Redes de Acesso Sem Fio de Banda Larga</i></b> .....	<b>33</b>
3.1	<i>Serviços banda larga</i> .....	33
3.2	<i>QoS em redes BWA</i> .....	35
3.3	<i>Mobilidade em redes BWA</i> .....	36
3.4	<i>O padrão IEEE 802.16</i> .....	38
3.4.1	MAC Common Part Sublayer.....	41
3.4.2	Construção e transmissão de PDUs MAC .....	43
3.4.3	Mecanismo <i>Automatic Repeat reQuest</i> (ARQ).....	45
3.4.4	Serviços de escalonamento de dados.....	46
3.4.5	Mecanismos para alocação e requisição de banda .....	48
3.4.6	Suporte de MAC à camada PHY .....	50
3.4.7	Operação do protocolo da camada MAC para suporte a QoS .....	53
3.5	<i>O padrão ETSI HiperMAN</i> .....	57
3.6	<i>O WiMAX Forum</i> .....	58
<b>4</b>	<b><i>Redes de Acesso Sem Fio de Banda Larga como Suporte a Serviços Multimédia Distribuídos</i></b> .....	<b>60</b>
4.1	<i>Evolução de IEEE 802.16 para 4G</i> .....	61
4.2	<i>Aspectos de camada MAC</i> .....	63

4.3	<i>Implementação de QoS na camada MAC</i> .....	64
4.4	<i>Prospecção sobre possíveis desafios no tocante à mobilidade</i> .....	65
5	<i>Arquitetura de QoS Proposta para o Padrão IEEE 802.16</i> .....	66
5.1	<i>Blocos funcionais da arquitetura</i> .....	68
5.1.1	SS/BS Data Classifier.....	68
5.1.2	SS/BS Data Shaper.....	68
5.1.3	SS Uplink Scheduler.....	69
5.1.4	BS Admission Control.....	69
5.1.5	BS Traffic Policing.....	69
5.1.6	BS Periodic Grant Generator.....	69
5.1.7	BS Frame Partitioner.....	70
5.1.8	BS Uplink Map Generator.....	70
5.1.9	BS Downlink Scheduler.....	70
5.2	<i>Fluxo de dados na arquitetura: a SS</i> .....	70
5.3	<i>Fluxo de dados na arquitetura: a BS</i> .....	71
5.4	<i>Conclusão</i> .....	72
6	<i>Modelo de Simulação para a Arquitetura Proposta</i> .....	73
6.1	<i>Introdução ao Network Simulator</i> .....	74
6.2	<i>Redes infra-estruturadas no Network Simulator</i> .....	77
6.3	<i>Modelo de simulação</i> .....	82
7	<i>Resultados Computacionais</i> .....	89
7.1	<i>Estrutura geral dos testes realizados</i> .....	89
7.2	<i>Cenário de teste 1</i> .....	95
7.3	<i>Cenário de teste 2</i> .....	97
7.4	<i>Conclusão</i> .....	99
8	<i>Conclusão</i> .....	100
8.1	<i>Trabalhos futuros</i> .....	101
	<i>Referências Bibliográficas</i> .....	103
	<i>Apêndice A - Detalhamento da Composição de cada Tráfego nos Cenários de Simulação</i> .....	106

*A.1 Cenário 1.....106*

*A.2 Cenário 2.....107*



## *Resumo*

Nos próximos anos, é esperado um grande aumento na demanda e na oferta de serviços multimídia distribuídos, mas a tecnologia de rede para atender esses serviços ainda não está definida. A tecnologia de base deve prover suporte às necessidades de QoS das diversas aplicações, em termos de parâmetros como largura de banda mínima, atraso, variação do atraso, entre outros, os quais são negociados no estabelecimento da conexão entre a BS e a SS. Além disso, essa tecnologia deve ser projetada de maneira a permitir que os equipamentos de rede operem eficientemente. Este trabalho apresenta o padrão IEEE 802.16 como uma tecnologia viável para esse contexto. É proposta uma arquitetura de QoS para o protocolo MAC de IEEE 802.16d e é apresentado, para essa arquitetura, um algoritmo para alocação de largura de banda e escalonamento de pacotes. Como exigido pelo padrão do IEEE, a arquitetura proposta oferece níveis de serviço adequados para tráfegos de alta e baixa prioridade. Também é apresentado um modelo de simulação extensível e flexível para redes IEEE 802.16. As análises do atraso de enfileiramento, utilização de banda e tamanho das filas obtidos através de simulação atestam o bom funcionamento da arquitetura proposta e encorajam novos trabalhos.

Palavras-chave: Padrão IEEE 802.16d, Subcamada MAC, Serviços Multimídia Distribuídos, Arquitetura de QoS.

## *Abstract*

Both demand and offer of distributed multimedia services are expected to increase heavily in the next few years, but the network technology to attend these services is not yet defined. The basis technology must support the QoS requirements of the different applications, in terms of parameters such as minimum bandwidth availability, delay, jitter, among others, which are negotiated at the connection establishment between the BS and the SS. Besides, this technology must be designed in such a way that allows network equipments to work efficiently. This work presents the IEEE 802.16 standard as a possible technology for this context. It is here proposed a QoS architecture for the IEEE 802.16d MAC protocol and it is presented, for this architecture, an algorithm for bandwidth allocation and packet scheduling. As required by the IEEE standard, the proposed architecture provides suitable service levels for both high and low priority traffics. It is also presented a flexible, extensible simulation model for IEEE 802.16 networks. The analysis of queuing delay, bandwidth utilization and queues size obtained by simulation process assures the good performance of the proposed architecture and encourages further works.

Keywords: IEEE 802.16d Standard, MAC Sublayer, Distributed Multimedia Services, QoS Architecture.

# Capítulo 1

## 1 Introdução

A idéia para este trabalho surgiu a partir dos estudos realizados pelo grupo de pesquisa de WiMAX da UFES. Quando a pesquisa foi iniciada, em março de 2005, a versão atual do padrão IEEE 802.16, lançada em outubro do ano anterior, constituía um padrão para redes banda larga sem fio ainda pouco explorado e que poderia suprir diversas necessidades tecnológicas para a oferta de novos serviços multimídia e de telecomunicações. Dessa forma, o novo padrão se mostrou um campo de estudo promissor e, acima de tudo, bastante empolgante, sobretudo por suas características em termos da qualidade do serviço oferecido e dos baixos custos de implantação e operação quando comparado com tecnologias já existentes para o mesmo propósito, o que contribui para sua penetração no mercado.

### 1.1 Motivação

Atualmente, as redes banda larga têm revolucionado a maneira como certos serviços são oferecidos. É o caso de VoIP e do *streaming* multimídia. Espera-se que essa evolução nos serviços continue, impulsionada sobretudo pela concorrência entre os provedores e pela própria demanda dos usuários. Nesse aspecto, as tecnologias de rede deverão evoluir em paralelo, para que possam suportar adequadamente os serviços trafegados.

O padrão IEEE 802.16 é parte dessa evolução das redes. Por suas características particulares, como provisionamento de qualidade de serviço e oferta de altas taxas de dados num ambiente sem fio de cobertura metropolitana, a tecnologia deve provocar modificações significativas no mercado, sendo por isso um objeto de estudo bastante atraente.

A fase inicial de estudos sobre o padrão do IEEE realizada pelo grupo WiMAX da UFES revelou que havia, à época, poucos trabalhos que propunham utilizações de fato da nova tecnologia. A maioria dos trabalhos publicados constituía *white papers*, estudos cujo objetivo era apresentar à comunidade interessada a nova tecnologia proposta, suas características, potencialidades e possíveis cenários de aplicação. Isso era compreensível por se tratar de uma tecnologia recentemente lançada.

Em muitos aspectos, o padrão IEEE 802.16 propõe diretrizes sobre *o que* fazer, mas deixa a cargo do desenvolvedor *como* fazer. Essa é uma característica marcante das questões

envolvendo qualidade de serviço no padrão. Ainda assim, a pesquisa bibliográfica realizada mostrou que poucos eram os trabalhos que exploravam tais pontos em aberto. Diante disso, e considerando a revolução que o padrão poderia causar na oferta de serviços multimídia distribuídos, o grupo de pesquisa decidiu realizar um trabalho sólido e de longo prazo, que permitisse que várias pessoas pudessem contribuir, individualmente e em épocas diferentes, para a construção de um conhecimento coletivo. O objetivo do grupo de pesquisa WiMAX da UFES foi e continua sendo a construção de conhecimento sobre o padrão IEEE 802.16 e a transferência deste para que outras pessoas possam utilizá-lo e desenvolvê-lo.

O padrão IEEE 802.16 abrange as camadas MAC e física da pilha de protocolos TCP/IP, e vários trabalhos já haviam proposto arquiteturas para modelar os conceitos especificados pelo padrão. Como este trabalho foi o primeiro iniciado dentro do grupo WiMAX, coube a ele definir uma arquitetura que refletisse as idéias do grupo ou, mais especificamente, a interpretação do grupo sobre o modo de operação da camada MAC do padrão IEEE 802.16. Isso exigiu um estudo inicial bastante aprofundado sobre as bases do padrão. Além disso, antes que qualquer nova idéia fosse proposta e desenvolvida, era preciso haver um modelo de simulação fiel ao padrão, para que as propostas pudessem ser testadas e avaliadas. Esse modelo básico já existe e está pronto para ser incrementado com contribuições de trabalhos futuros.

Diante do exposto, pode-se resumir a motivação deste trabalho como sendo, por um lado, o potencial do padrão IEEE 802.16 para a melhoria dos serviços banda larga já existentes e para a oferta de novos serviços, e por outro, a falta de uma base de conhecimento estabelecida sobre o padrão e seus possíveis pontos a serem explorados.

## **1.2 Definição do problema**

A base de todo o trabalho desenvolvido nesta dissertação é o provisionamento de qualidade de serviço aos serviços banda larga oferecidos por provedores a usuários comuns através de uma rede baseada no padrão IEEE 802.16. Como dito anteriormente, o padrão especifica o que deve ser feito para atingir tal objetivo, mas não descreve como isso deve ser feito.

No padrão do IEEE, o provisionamento de qualidade de serviço baseia-se principalmente nos seguintes aspectos:

- Diferenciação dos pacotes de dados de acordo com a aplicação a que se referem. No estabelecimento de cada fluxo de dados, são negociados os parâmetros de tráfego mínimos que devem ser garantidos àquele fluxo, cujo cumprimento, daí em diante, é responsabilidade da rede;
- Alocação eficiente de largura de banda às estações envolvidas na comunicação;
- Escalonamento eficiente dos pacotes a serem transmitidos na banda alocada.

A camada MAC proposta no padrão IEEE 802.16 é responsável por atender tais objetivos. Naturalmente, deve-se considerar as dificuldades usuais envolvidas em problemas desse tipo. Em primeiro lugar, a largura de banda de transmissão é um recurso escasso em sistemas de rádio, uma vez que o espectro de frequências é limitado e deve ser compartilhado por todos os serviços. A demanda pelo espectro hoje supera a capacidade da banda que pode ser utilizada com os recursos tecnológicos atuais de forma eficiente. Para que o sistema possa utilizar de forma otimizada a banda disponível, esta deve ser compartilhada de maneira racional entre cada tipo de tráfego. Conseqüentemente, é preciso definir o nível de qualidade aceitável para cada tipo de aplicação, e até que ponto um fluxo de dados pode ser privilegiado em detrimento de outros. Finalmente, a camada MAC, além de ter de operar com eficácia sobre os recursos disponíveis e sobre os dados a serem transmitidos, deve fazê-lo com eficiência, pois o tempo de operação constitui uma restrição em tecnologias desse tipo.

A implementação de um sistema aderente ao padrão IEEE 802.16 exige a criação de um modelo de arquitetura de camada MAC que esteja de acordo com o protocolo e que seja capaz de prover a qualidade adequada a cada serviço, utilizando com eficiência os recursos disponíveis, num tempo de processamento aceitável.

### **1.3 Objetivos da dissertação**

Devido às necessidades levantadas durante a fase de revisão bibliográfica, e com base nas características do padrão IEEE 802.16, este trabalho tem como objetivos:

- Construir uma base unificada de conhecimento sobre o padrão IEEE 802.16, relacionando seus principais aspectos diferenciais à forma como eles podem ser utilizados para prover suporte a uma nova geração de serviços multimídia de banda larga;

- Apresentar possíveis pontos de pesquisa a serem explorados no padrão para direcionar pesquisas futuras;
- Propor um modelo de arquitetura para a camada MAC do padrão IEEE 802.16 e implementar sobre esta arquitetura um algoritmo de alocação de largura de banda e escalonamento de pacotes que incorpore qualidade de serviço;
- Estabelecer um modelo de simulação que produza resultados compatíveis com o padrão e fiéis ao mundo real, e que seja facilmente extensível para trabalhos futuros.

Os objetivos apresentados deixam claro que este trabalho se propõe a ser o primeiro de vários produzidos pelo grupo de pesquisa, em vez de constituir um esforço pontual e isolado.

#### **1.4 Organização da dissertação**

Além desta introdução, o capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica e discute alguns dos principais trabalhos relacionados à qualidade de serviço na camada MAC de IEEE 802.16, encontrados na literatura pesquisada.

O capítulo 3 faz uma introdução teórica às redes de acesso sem fio de banda larga. São abordadas algumas das questões mais significativas relativas à tecnologia, como os serviços a serem suportados pelas redes, a oferta de qualidade de serviço, e os desafios no tocante à mobilidade. O capítulo também apresenta os dois principais padrões de redes de acesso sem fio de banda larga do mercado, IEEE 802.16 e ETSI HiperMAN, e se encerra com uma seção sobre o WiMAX Forum, associação com o objetivo de promover a adoção dos padrões IEEE 802.16 e ETSI HiperMAN, e facilitar a implantação de redes baseadas neles.

O capítulo 4 discute uma possível aplicação das redes de acesso sem fio de banda larga como suporte a serviços multimídia distribuídos. É traçado um cenário hipotético de evolução das redes baseadas no padrão IEEE 802.16 para que estas se tornem a base da nova tecnologia de quarta geração das redes de comunicação. Para esse cenário, são considerados aspectos relativos à camada MAC, à implementação de qualidade de serviço e à mobilidade nas redes sem fio.

O capítulo 5 apresenta a arquitetura proposta para a camada MAC do padrão IEEE 802.16. Inicialmente, cada bloco funcional da arquitetura é descrito separadamente. Depois, é explicado o fluxo dos dados através dos blocos, o que auxiliará na compreensão geral da arquitetura.

O capítulo 6 detalha o modelo de simulação do padrão IEEE 802.16 utilizado para a arquitetura proposta, bem como o algoritmo desenvolvido para alocação de banda e escalonamento de pacotes. Antes, porém, o capítulo se inicia com uma breve introdução à ferramenta de simulação *Network Simulator*, usada para a construção do modelo de simulação proposto.

O capítulo 7 apresenta as simulações realizadas e os resultados computacionais obtidos. Nesse capítulo é detalhada a estrutura geral adotada nos testes e são apresentados dois cenários particulares concebidos para a avaliação da arquitetura proposta. Os resultados de desempenho obtidos em cada cenário são apresentados e analisados.

O capítulo 8 apresenta as conclusões desta dissertação, as considerações finais e sugestões de trabalhos futuros.

Por fim, o apêndice A faz o detalhamento da composição de cada tráfego de aplicação para os cenários de simulação abordados neste trabalho.

## Capítulo 2

### 2 Revisão Bibliográfica e Trabalhos Relacionados

O padrão IEEE 802.16 introduz no mercado uma nova tecnologia de redes banda-larga sem fio. Os primeiros equipamentos só foram lançados no início de 2006, quatro anos após a aprovação da primeira versão do padrão, e mesmo assim são dispositivos que implementam apenas os requisitos básicos da tecnologia.

Por tratar-se de uma tecnologia nova, é possível classificar a bibliografia produzida até o momento em um dos três grupos descritos a seguir. Esses grupos possuem uma sobreposição no tempo, mas de maneira geral representam fases distintas da abordagem de pesquisa sobre IEEE 802.16.

Os primeiros trabalhos publicados dedicaram-se a apresentar o padrão – são os chamados *white papers*, produzidos principalmente por fabricantes de equipamentos e provedores de serviços de rede como Intel [1] e Fujitsu [2] [3]. Nessa mesma classe de publicações estão os documentos comparando o novo padrão com algumas tecnologias sem fio existentes, como Wi-Fi e 3G [4]. A produção desses trabalhos é compreensível diante das incertezas trazidas pela tecnologia recém-lançada: ela viera para substituir ou para complementar os recursos de comunicação existentes?

Em seguida surgiram os trabalhos científicos produzidos por universidades e centros de pesquisa com a finalidade de apresentar o padrão e seus pontos em aberto, que são as primeiras áreas de pesquisa potenciais a serem exploradas. Nesse contexto pode-se citar o suporte a QoS [5], a oferta de *Space Division Multiple Access* (SDMA – Acesso Múltiplo por Divisão do Espaço) possivelmente com o emprego de *Advanced Antenna System* (AAS – Sistema de Antena Avançado) [6], e mais recentemente o gerenciamento de mobilidade [7] [8].

Finalmente, começaram a ser divulgados os resultados dos primeiros trabalhos que propunham soluções de fato para os pontos em aberto enumerados até então. Particularmente, surgiram as primeiras propostas de arquiteturas de QoS para a camada MAC do padrão IEEE 802.16. Em linhas gerais, esses trabalhos propõem arquiteturas em alto nível das



funcionalidades a serem oferecidas e apresentam pouco ou nenhum resultado computacional. Mesmo assim, eles são boas referências do estado da arte, e por isso devem ser considerados com atenção. Os principais trabalhos estudados são apresentados com mais detalhes a seguir.

## 2.1 O trabalho de Chu, Wang e Mei

Em seu trabalho *A QoS Architecture for the MAC Protocol of IEEE 802.16 BWA System* [9], Chu, Wang e Mei propõem que uma arquitetura de QoS seja incorporada à subcamada MAC do padrão IEEE 802.16. O esquema da arquitetura proposta é apresentado na Figura 2.1.

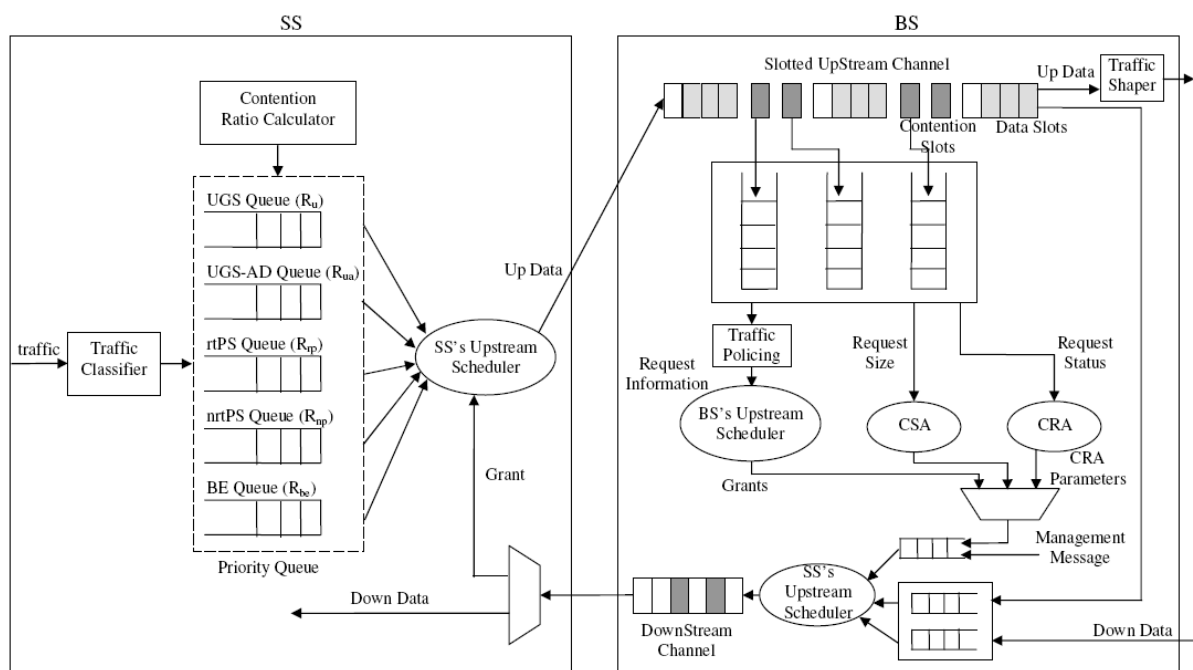


Figura 2.1. A arquitetura de QoS para o protocolo MAC de IEEE 802.16 [9]

Os principais componentes da arquitetura são o *Traffic Classifier* (classificador de tráfego de entrada), *SS's Upstream Scheduler* e *BS's Upstream Scheduler* (escalonadores de tráfego *upstream* na BS e na SS), *Downstream Scheduler* (escalonador de tráfego *downstream*), *Traffic Policing* (policimento de tráfego), *Traffic Shaper* (ajustador de tráfego) e os blocos *Contention Slot Allocator* (CSA), *Contention Resolution Algorithm* (CRA) e *Contention Ratio Calculator* (CRC), além das filas para armazenamento dos pacotes de dados.

O CSA é usado pela BS para distribuir dinamicamente a banda de *uplink* entre os *slots* de contenção e aqueles concedidos às SSs especificamente. Esse ajuste tem impacto significativo no desempenho do sistema: poucos *slots* de contenção aumentam a chance de colisão na requisição de banda, reduzindo a quantidade de dados que podem ser transmitidos, enquanto

muitos *slots* de contenção reduzem a largura de banda para a transmissão dos dados. Os autores frisam a necessidade de um algoritmo para o CSA que utilize a banda de maneira eficiente, mas não apresentam nenhuma proposta.

A saída do CSA alimenta o bloco CRA, que define a utilização dos *slots* de contenção e as regras que controlam o processo. Segundo os autores, como apenas os tráfegos nrtPS e BE realizam requisição de banda por contenção, um algoritmo simples pode ser usado no CRA. Assim como no CSA, a escolha do algoritmo fica em aberto.

O padrão IEEE 802.16 define uma abordagem de alocação de banda de *uplink* às SSs segundo a qual as conexões nas SSs fazem requisições de banda individuais e independentes, mas o escalonador da BS concede uma quantidade única de banda à SS. Assim, cabe à SS distribuir a largura de banda recebida de maneira justa entre todas as suas conexões, de forma a atender aos requisitos de QoS estabelecidos, o que exige um escalonador de tráfego *uplink* em cada SS. Essa abordagem apresenta a grande vantagem de responder mais rapidamente às mudanças nas necessidades de tráfego de cada conexão. Isso porque as SSs, que fazem a distribuição final da banda às conexões, possuem informações mais atualizadas sobre os dados trafegados.

Para que os requisitos de QoS sejam atendidos, as conexões não podem simplesmente ser multiplexadas em uma fila FIFO comum. Como visto na Figura 2.1, são empregadas cinco filas com prioridades, para os fluxos de serviço UGS, UGS-AD (UGS com detecção de atividade – não especificado no padrão IEEE 802.16), rtPS, nrtPS e BE. As políticas de prioridade são bem definidas para cada uma das filas, sendo baseadas em abordagens como *Wireless Fair Queueing*, proposta em [10], e a clássica *Weighted Round Robin* (WRR) [11]. Cabe ao *Traffic Classifier* distinguir o tráfego entrante na SS e encaminhá-lo à fila correspondente, de acordo com a prioridade do tráfego.

O CRC atribui dinamicamente parâmetros de competição às filas. De acordo com esses parâmetros, o *SS's Upstream Scheduler* determina diferentes frequências para que a banda recebida seja alocada aos tráfegos UGS, UGS-AD, rtPS, nrtPS e BE, bem como as frequências de disputa dos tráfegos pelos *slots* de contenção. Para a SS, Chu, Wang e Mei propõem o uso de um *Upstream Scheduler* anteriormente definido na literatura [12], mas não fazem considerações sobre o escalonador da BS.

De acordo com os autores, a alocação arbitrária de banda da BS às SSs pode alterar o padrão de tráfego das conexões, o que pode resultar na violação dos parâmetros de QoS

negociados. Para prevenir esse problema, é proposto um *Traffic Shaper* na saída da camada MAC, com a finalidade de ajustar o tráfego que será entregue às redes interconectadas.

Finalmente, as SSs podem exceder os parâmetros de tráfego negociados durante o estabelecimento das conexões, intencionalmente ou não, sobrecarregando a rede. Para evitar que isso ocorra, a BS deve empregar alguma política de *Traffic Policing*, para assegurar que cada conexão obedeça aos parâmetros de tráfego negociados. Uma função de *Traffic Policing* ideal deve detectar e corrigir a violação de tráfego rapidamente, de forma transparente às conexões.

O trabalho de Chu, Wang e Mei tem o mérito de ser a primeira proposta de arquitetura de QoS para o padrão IEEE 802.16 encontrada na literatura, e só esse fato já confere importância ao trabalho. Entretanto, há algumas limitações que devem ser destacadas:

- O algoritmo do escalonador é abordado de maneira muito simplista para a SS e não é considerado para a BS;
- A Figura 2.1 apresenta dois conjuntos de filas na BS, um na saída do canal *upstream* e outro para receber os dados de entrada do *downlink*. Essas filas não são explicadas no artigo;
- Não há um *Traffic Classifier* na BS, para classificar os dados de entrada do *downlink*;
- Não é definido um objeto *Frame Partitioner*, que faça a divisão do quadro MAC entre *uplink* e *downlink* na BS. Subentende-se que essa tarefa fica a cargo do *BS's Upstream Scheduler*, mas isso não está claro.

Essas limitações impulsionam o desenvolvimento de novos trabalhos que venham a contemplar os pontos deixados em aberto.

## **2.2 O trabalho de Cho, Song, Kim e Han**

Em *Performance Analysis of the IEEE 802.16 Wireless Metropolitan Area Network* [13], Cho, Song, Kim e Han propõem uma arquitetura de QoS um pouco mais abrangente do que a de Chu, Wang e Mei. Em seu trabalho eles consideram o processo de comunicação de dados entre BS e SS desde o estabelecimento da conexão e negociação dos parâmetros de tráfego, como largura de banda e atraso. Entretanto, a abordagem não é mais aprofundada do que a de [9]. A Figura 2.2 mostra o esquema geral da arquitetura.

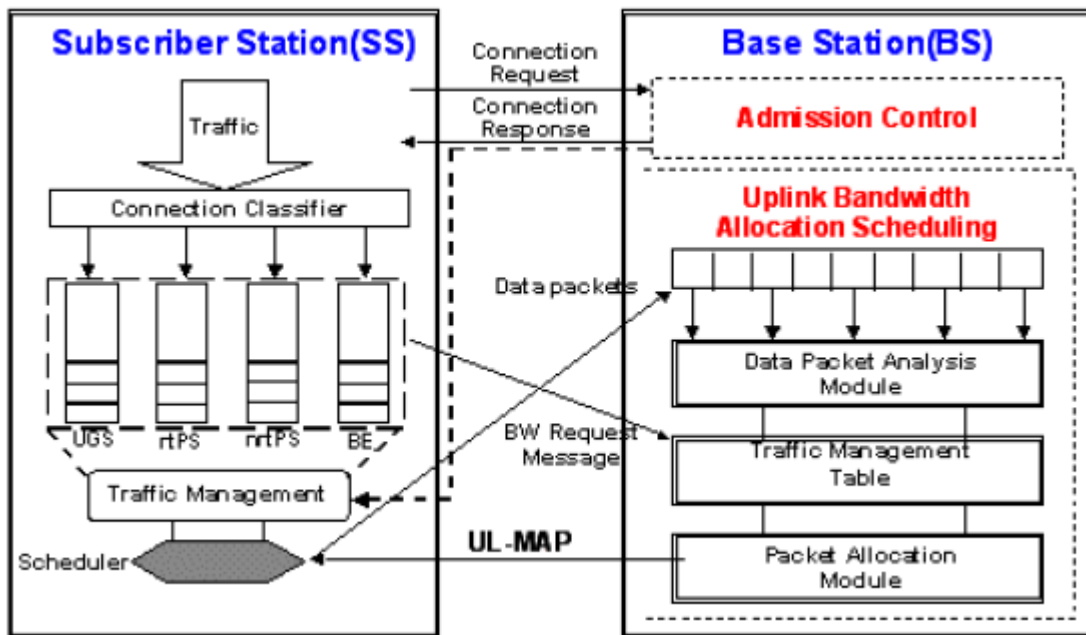


Figura 2.2. Arquitetura de QoS proposta para IEEE 802.16 [13]

Na BS, o componente *Data Packet Analysis Module* verifica o tamanho das filas na SS a partir das requisições de banda recebidas no quadro MAC anterior. É interessante notar que essa é uma adaptação implícita feita pelos autores em relação ao padrão IEEE 802.16, já que o padrão não prevê tal informação em suas mensagens de requisição de banda. O *Data Packet Analysis Module* processa as informações de tamanho de filas coletadas e então atualiza a *Traffic Management Table*. Finalmente o *Packet Allocation Module*, que tem funcionalidade análoga ao *BS's Upstream Scheduler* de [9], recupera a informação a partir do *Traffic Management Module* e gera o UL-MAP, que é transmitido a todas as SSs. Na SS, o componente *Scheduler* escolhe nas filas os pacotes para transmissão de maneira a utilizar totalmente a banda recebida no UL-MAP, de forma similar ao *SS's Upstream Scheduler* de [9].

Ao contrário de [9], as funcionalidades da arquitetura proposta não são separadas em blocos bem definidos, o que faz com que o fluxo de dados e ações da arquitetura seja impreciso.

Ao longo do artigo, os autores desenvolvem formulações matemáticas da utilização do canal para cada classe de serviço, e apresentam resultados de simulações com a utilização do canal pelos tráfegos UGS, rtPS, nrtPS e BE à medida que a carga submetida à rede aumenta. Entretanto, apesar dos resultados apresentados, o trabalho deixa a desejar por não abordar adequadamente os blocos funcionais propostos no esquema da arquitetura.

### 2.3 O trabalho de Maheshwari

O trabalho *An Efficient QoS Scheduling Architecture for IEEE 802.16 Wireless MANs* [14] constitui, tomando-se por base a literatura pesquisada, a proposta mais completa de arquitetura de QoS para a camada MAC do padrão IEEE 802.16. O diagrama de blocos da arquitetura de escalonamento de QoS proposta é mostrado na Figura 2.3.

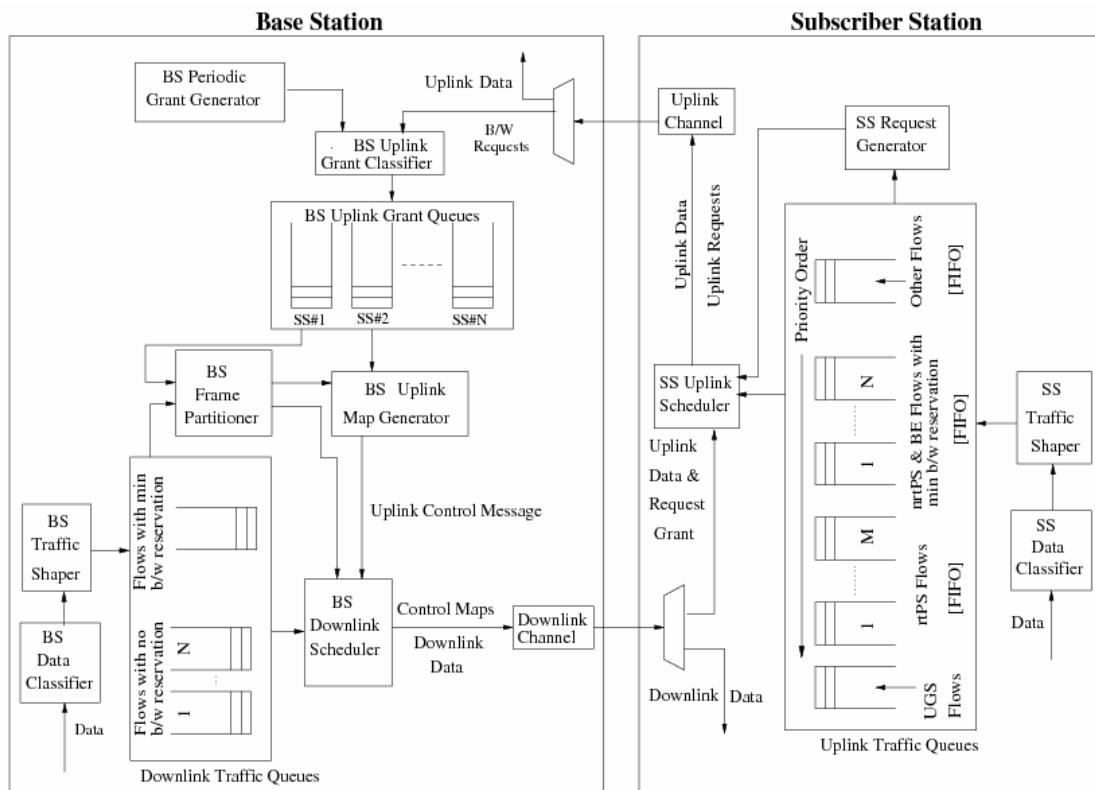


Figura 2.3. Arquitetura de escalonamento de QoS para IEEE 802.16 [14]

Os eventos que acontecem na camada MAC da BS são os seguintes:

- O pacote IP recebido é classificado em uma das conexões, ajustado e inserido em uma das filas de tráfego *downlink*;
- A BS também recebe dados de *uplink* e requisições de banda enviadas pelo canal de *uplink* por diversas SSs. Os pacotes de dados são encaminhados às camadas superiores enquanto as requisições de banda são classificadas e colocadas na fila de concessão de *uplink* correspondente. Dados e requisições de concessão gerados periodicamente pela BS são tratados da mesma maneira das requisições de banda de *uplink*;

- As filas de tráfego de *downlink* e concessão de *uplink* são examinadas pela BS e a largura de banda total é dividida apropriadamente entre os subquadros de *downlink* e *uplink*;
- A BS então escalona os pacotes de dados de *downlink* na banda fornecida anteriormente e cria a mensagem DL-MAP;
- Também aloca banda de *uplink* para as SSs atendidas com base em suas demandas de banda e codifica essa informação na mensagem UL-MAP;
- No início do quadro MAC, a BS transmite as mensagens DL-MAP e UL-MAP no canal de *downlink*, seguidas pelos dados de *downlink* para as várias SSs.

Os eventos que acontecem na camada MAC da SS são os seguintes:

- O pacote IP recebido é classificado em uma das conexões, ajustado e inserido em uma das filas de tráfego *uplink*;
- Eventualmente, a SS recebe as mensagens DL-MAP e UL-MAP enviadas pela BS no canal de *downlink*. A SS escuta o canal de *downlink* por toda a duração do subquadro de *downlink* para descobrir se há pacotes de dados destinados a ela. Em caso positivo os pacotes de dados são encaminhados para a camada superior;
- A SS determina o instante de início de sua transmissão de *uplink* e a duração da transmissão decodificando a mensagem UL-MAP;
- Ela também gera as requisições de largura de banda a serem enviadas à BS;
- A SS então escalona os pacotes de dados de *uplink* e os pacotes de requisição de banda nos *slots* concedidos pela BS para *uplink*, e realiza a transmissão de maneira apropriada;
- Após completar a transmissão de *uplink*, a SS torna a escutar o canal de *downlink* com o início do próximo quadro.

Uma descrição detalhada da arquitetura em nível de componentes é feita a seguir.

Os componentes *Data Classifier* na BS e na SS mapeiam cada pacote IP recebido para um CID particular e então o inserem na fila de tráfego *downlink* ou *uplink* correspondente. Um conjunto de classificadores é associado a cada CID. Cada classificador consiste de um conjunto de parâmetros tais como valor do campo TOS do cabeçalho IP, endereços IP de

origem e destino etc. Também é associada uma prioridade a cada classificador. Esses classificadores são aplicados a cada pacote em ordem decrescente de prioridade. O classificador de maior prioridade que corresponde exatamente ao pacote, com relação aos parâmetros especificados, determina o CID daquele pacote.

Assim como em [9], os blocos *Traffic Shaper* empregados na BS e na SS examinam todo o tráfego recebido com relação a seus parâmetros e ajustam os tráfegos que violam os parâmetros negociados no estabelecimento da conexão.

O bloco *BS Periodic Grant Generator* gera concessões de banda periódicas para transmissão de dados e requisições para os fluxos *uplink* que assim necessitam, a saber UGS, rtPS e nrtPS. Ele gera uma concessão de dados para cada intervalo nominal de concessão de um fluxo UGS de *uplink* ativo. De forma similar, são geradas concessões para requisição de banda para fluxos rtPS e nrtPS.

O componente *BS Uplink Grant Classifier* classifica cada concessão de banda recebida do *BS Periodic Grant Generator* e cada requisição de banda recebida do canal de *uplink* em uma das filas de concessão de *uplink*. A autora usa uma fila para cada SS, como se pode ver na Figura 2.3. A classificação é feita pelo mapeamento direto de CID para a SS correspondente. Isso significa que, para cada SS, as requisições feitas pelos fluxos de todas as classes de serviço são colocadas em uma única fila. Algumas questões ficam em aberto: isso permite um escalonamento eficiente? Os requisitos de QoS são atendidos para todos os fluxos? Não seria melhor criar, para cada SS, uma fila para cada classe de serviço?

O *BS Frame Partitioner* divide a largura de banda total do quadro entre os subquadros de *uplink* e *downlink*. Em suas simulações, a autora emprega um esquema de particionamento fixo que divide o quadro MAC igualmente entre *downlink* e *uplink*.

O destaque do trabalho é o componente *BS Uplink Map Generator*, responsável pela alocação de banda de transmissão *uplink* para cada SS. A decisão sobre a largura de banda concedida a cada SS é tomada com base nos seguintes aspectos: (1) largura de banda requisitada por cada SS para transmissão de dados *uplink*; (2) necessidades periódicas de banda dos fluxos UGS das SSs; (3) largura de banda necessária para que sejam feitas requisições adicionais de banda de transmissão. A autora apresenta um algoritmo detalhado para alocação de banda de *uplink* a cada SS. Ele toma como entrada a quantidade total de bytes requisitados por fluxo para cada SS, valor que é calculado pela BS a partir das filas de concessão de *uplink*.

O componente *BS Downlink Scheduler* é responsável pelo escalonamento dos pacotes das filas de tráfego *downlink* da BS para transmissão no canal de *downlink*. A estratégia proposta pela autora consiste em transmitir todos os pacotes das filas de mais alta prioridade primeiro, chamadas filas *Type 1*. Para retirar pacotes dessas filas e encaminhá-los aos fluxos de transmissão é empregada a política *Weighted Fair Queuing* (WFQ). Após a transmissão de todos os pacotes das filas *Type 1*, a largura de banda restante, caso haja, é então alocada aos pacotes das filas de prioridade mais baixa, denominadas filas *Type 2*. De acordo com esse esquema, é possível que as filas *Type 2* jamais sejam atendidas, caracterizando o fenômeno conhecido como *starvation*.

As requisições de largura de banda de *uplink* para as conexões atendidas pela SS são geradas pelo *SS Request Generator*. Para cada conexão, é gerada uma requisição de banda *agregada*, o que significa que o valor requisitado é assumido como novo valor absoluto de banda necessária para aquela conexão. A largura de banda necessária é calculada tendo como base o comprimento das filas de tráfego *uplink* na SS.

O bloco *SS Uplink Scheduler* escala os pacotes das filas de tráfego *uplink* e as requisições de banda para transmissão no canal de *uplink*, de acordo com as concessões de banda enviadas pela BS através do UL-MAP. A largura de banda de transmissão *uplink* alocada a cada SS deve ser distribuída adequadamente entre os diversos fluxos de serviço de forma a satisfazer seus requisitos de QoS. A autora propõe um esquema de filas *Type 1*, *Type 2*, *Type 3* etc, onde a fila 1 tem prioridade maior que a 2, que tem prioridade maior que a fila 3. Dessa forma, os fluxos UGS são mapeados para filas *Type 1*, rtPS para filas *Type 2*, nrtPS para filas *Type 3* e BE para filas *Type 4*. Na proposta da autora, o *SS Uplink Scheduler* emprega uma combinação de escalonamento com prioridade estrita e WFQ para servir os vários fluxos de *uplink*. De acordo com o algoritmo adotado, a SS transmite primeiro os pacotes das filas *Type 1*. Os pacotes das filas *Type 2* e *Type 3* são transmitidos no tempo restante, e então os pacotes das filas *Type 4* são transmitidos, depois de todos os pacotes das filas de maior prioridade terem sido enviados. Da forma colocada, o esquema aplica prioridades e pesos ponderados de transmissão isoladamente a pacotes de uma mesma classe de serviço, mas não inter-relaciona o escalonamento de pacotes de classes distintas. Assim como no *BS Downlink Scheduler*, essa abordagem pode levar à ocorrência de *starvation* dos fluxos de prioridades mais baixas.



O trabalho finaliza com a simulação da arquitetura proposta no simulador *QualNet Network Simulator* [15]. As métricas de desempenho utilizadas foram o atraso médio dos fluxos de *uplink* nas SSs e a utilização efetiva da largura de banda.

Em linhas gerais esse trabalho traz diversos avanços em relação aos anteriores, apresentando uma arquitetura mais elaborada, com blocos funcionais bem delimitados e que revelam claramente a preocupação com a oferta de QoS, além de esquemas de filas na BS e nas SSs mais refinados.

Com exceção do *BS Uplink Map Generator*, os componentes da arquitetura oferecem apenas funcionalidades restritas, como é possível perceber nos blocos *BS Downlink Scheduler* e *SS Uplink Scheduler*. Mesmo assim, esse trabalho é a referência mais completa de arquitetura de QoS para a camada MAC do padrão IEEE 802.16 que se encontrou na literatura na pesquisa realizada.

## **2.4 Conclusão**

Os trabalhos apresentados anteriormente deram uma grande contribuição à pesquisa sobre QoS na camada MAC do padrão IEEE 802.16. De certa forma, eles propõem um paradigma a ser seguido para a descrição de qualquer arquitetura de QoS proposta para o padrão IEEE 802.16. Sob outro ponto de vista, considerando suas limitações, eles constituem as bases de uma arquitetura genérica, pronta para ser estendida e especializada.

Este trabalho usa os melhores conceitos e as melhores idéias daqueles para propor uma arquitetura de QoS mais completa para o padrão IEEE 802.16, de maneira a atender os requisitos reais de tráfegos multimídia. A arquitetura proposta e a simulação das funcionalidades implementadas são apresentadas nos capítulos seguintes.

## *Capítulo 3*

### **3 Introdução às Redes de Acesso Sem Fio de Banda Larga**

O primeiro desafio das redes sem fio era prover conectividade em um meio inerentemente ruim. Esse desafio foi vencido com o desenvolvimento de técnicas eficientes de modulação e codificação, algoritmos de detecção e correção de erros e garantia de segurança. Entretanto, tecnologias resultantes desses esforços, como telefonia celular, transmissão via satélite e WLANs, não atendem por completo às necessidades do mercado. Isso porque algumas dessas tecnologias podem transmitir em longas distâncias, e outras delas a altas taxas, mas nunca ambos. Havia a demanda por uma rede de Acesso Sem Fio de Banda Larga (*Broadband Wireless Access – BWA*) que combinasse altas taxas de transmissão em longas distâncias, incorporando também mecanismos de garantia de QoS que pudessem suportar as novas aplicações trafegando sobre a rede, sobretudo tráfego multimídia e voz em tempo real. Tudo isso aliado a um baixo custo de implantação e manutenção.

Para preencher essa lacuna, entidades de padronização como o IEEE e o ETSI começaram a trabalhar no final da década de 90 em padrões de redes BWA que atendessem às necessidades do mercado: altas taxas de dados combinadas com longo alcance. O trabalho foi desenvolvido em parceria com empresas líderes do setor e os primeiros resultados foram publicados nos anos seguintes.

Neste capítulo são apresentados os principais padrões de redes BWA do mercado. Antes, porém, é feita uma introdução às questões mais significativas referentes à tecnologia: serviços a serem suportados, QoS e mobilidade.

#### **3.1 Serviços banda larga**

A evolução das MANs e WANs, cujas taxas de transmissão nos últimos anos passaram de alguns kilobits/segundo para valores da ordem de megabits/segundo, impulsionou também um incremento na qualidade dos serviços trafegados por elas. Provedores de Serviços atuais já oferecem aplicações multimídia como vídeos, jogos, voz sobre IP, além do tráfego convencional de dados em banda larga.

A qualidade dos serviços ofertados tem crescido junto com o aumento das taxas de transmissão das redes, impulsionada, principalmente, pela demanda dos usuários por novos e melhores serviços e pela concorrência entre diferentes provedores, cada um tentando inovar para conquistar fatias maiores do mercado. Dessa forma, nos últimos anos, surgiram diversos serviços de banda larga.

Talvez a primeira aplicação que vem à mente quando se fala de banda larga é a transmissão de voz sobre IP (Voice over IP – VoIP). Esse serviço já é uma realidade em aplicações de usuário ponto-a-ponto. Entretanto, o conceito da tecnologia vai muito além, e seu uso tende a aumentar nos próximos anos devido, principalmente, a duas utilizações possíveis. A primeira delas está relacionada ao emprego de redes IEEE 802.16 como *backhaul* de redes de telecomunicações, sobretudo celulares. Nesse caso, a transmissão de voz através de pacotes IP será uma aplicação crítica para o sucesso do negócio. O outro uso também está relacionado à telefonia celular, mas se apóia na integração entre Wi-Fi e Celular. Gigantes das telecomunicações, entre eles Motorola e Nokia, oferecem, desde o início de 2006, aparelhos móveis híbridos, que funcionam tanto em redes Wi-Fi como em redes de telefonia celular, dependendo do serviço que estiver disponível. Alguns executivos e analistas de mercado apontam essa integração entre as redes Wi-Fi e de Telefonia Celular como um possível primeiro passo em direção à tecnologia 4G [16] [17] [18] [19]. Assim, as redes BWA terão papel fundamental na transmissão de voz. É importante destacar a economia que essa tecnologia vai representar tanto para as operadoras quanto para os usuários.

As aplicações multimídia estão entre os principais serviços de banda larga. Vídeo sob demanda, emissoras de rádios da Internet e TV interativa têm grande procura pelos usuários, e a demanda só deve aumentar, já que as redes de banda larga permitem atingir grupos mais restritos, o que é inviável para as mídias convencionais de rádio e TV. O desafio no futuro será melhorar a qualidade do serviço prestado, em termos de resolução de áudio e vídeo, atraso de transmissão, disponibilidade do serviço etc.

Recentemente, novos serviços banda larga foram criados, como o serviço de localização e os jogos on-line. A localização não depende tanto da largura de banda, mas só é possível graças à mobilidade introduzida pelas redes sem fio. Essa aplicação é muito útil em sistemas de automação de força de vendas e controle de frota, entre outros. Os jogos on-line, por sua vez, necessitam de largura de banda para interconectar vários jogadores, transmitindo imagens gráficas (quanto maior a resolução, melhor), sons e mensagens diversas. O desenvolvimento dessa classe de aplicação está apenas começando.

Finalmente, não se pode esquecer do serviço de tráfego de dados convencionais. Esse tipo de serviço, que apóia a integração de sistemas de banco de dados, automação industrial, controle corporativo, entre outros, foi ampliado pelas redes de banda larga, em termos de velocidade e qualidade das aplicações suportadas. Adicionalmente, as redes BWA estão permitindo a criação do conceito de *mobilidade corporativa*, em que os usuários se conectam a seus sistemas de interesse através de aplicações e dispositivos móveis, desde o nível produtivo até o executivo.

Todos esses serviços surgiram como uma resposta dos provedores de serviços e empresas de telecomunicações às taxas de dados cada vez maiores das redes e à demanda dos usuários. Na verdade, esse segmento tem agora a possibilidade de ofertar (e lucrar com) serviços antes restritos às redes convencionais de telefonia, televisão etc, além de outros serviços que sequer existiam, como os jogos on-line. De fato, eles estão se aproveitando da tecnologia propiciada pelas redes BWA para inaugurar uma nova classe de serviços de telecomunicações: a conectividade *everywhere* (em todo lugar), qualquer que seja a aplicação pretendida pelo usuário.

### **3.2 QoS em redes BWA**

Atualmente, as redes MAN cabeadas convencionais, como xDSL e conexão via TV a cabo, têm largura de banda suficiente para suportar as taxas de dados exigidas pelos serviços de banda larga abordados anteriormente. O que lhes falta, entretanto, são mecanismos de tratamento eficiente dos dados transportados, para que sejam cumpridos os requisitos exigidos por cada tipo de aplicação, além de otimizar a utilização dos recursos físicos da rede. Dessa forma, pacotes transmitindo imagens e voz de uma vídeo-conferência em tempo real devem ter prioridade de tráfego sobre pacotes transportando um e-mail ou um arquivo via FTP. A forma como essa diferenciação no tratamento dos diversos tipos de tráfego é feita constitui a Qualidade de Serviço (*Quality of Service – QoS*) ofertada pela rede.

As redes WMAN propostas pelo IEEE e pelo ETSI já têm QoS incorporada nativamente, através da diferenciação dos tráfegos de aplicação em classes de serviço com diferentes prioridades, de acordo com parâmetros de atendimento negociados no estabelecimento das conexões. De fato, essa é uma das características primárias do padrão WiMAX e vem preencher a lacuna deixada pelas redes WLAN, que oferecem suporte limitado a QoS.

O primeiro passo para a oferta de QoS é a definição de diferentes classes de serviço. Sendo assim, a rede deve classificar os dados do usuário em uma das classes de serviço suportadas, de acordo com os parâmetros de QoS (banda mínima, atraso, *jitter* etc) negociados no estabelecimento da conexão entre a SS e a BS para aquele fluxo. Normalmente, são suportadas quatro classes de serviço:

- *Unsolicited Grant Service* (UGS): banda garantida, sem a necessidade de solicitações periódicas;
- *real-time Polling Service* (rtPS): a SS recebe, em intervalos fixos, a oportunidade de solicitar banda à BS;
- *non-real-time Polling Service* (nrtPS): a SS recebe, em intervalos variáveis, a oportunidade de solicitar banda à BS;
- *Best Effort* (BE): utiliza a banda restante.

Uma vez que os dados do usuário tenham sido classificados em uma das classes de serviço, a rede deve realizar uma política de atendimento justa daqueles dados, para que os mesmos possam ser encaminhados de maneira eficiente aos seus destinos. Normalmente, essa política consiste na execução de algoritmos de alocação de banda e atendimento das filas de serviço, para que os dados sejam transmitidos de acordo com os parâmetros de QoS negociados.

É importante entender que a oferta de QoS em uma rede não significa simplesmente atribuir prioridades fixas às classes de serviço. Se fosse assim, no caso da ocorrência de tráfego UGS intenso, as outras classes poderiam nem ser atendidas (ocorrência de *starvation*), violando os parâmetros estabelecidos e, por conseguinte, a política de QoS da rede.

QoS em redes WMAN é essencial para a oferta dos serviços de banda larga apresentados anteriormente. Ela assegura, por exemplo, que uma conversa de voz não será prejudicada pela transferência de um grande arquivo via FTP, mas também garante que o arquivo será entregue em um tempo aceitável, de acordo com a capacidade da rede.

### **3.3 Mobilidade em redes BWA**

Freqüentemente, o conceito de redes sem fio vem acompanhado da idéia de mobilidade. Essa associação não é verdadeira no caso dos primeiros padrões de redes BWA – baseados em IEEE 802.16-2004. A mobilidade só será possível com as redes baseadas no padrão IEEE

802.16e, aprovado em dezembro de 2005, e cujos primeiros equipamentos certificados pelo WiMAX Forum têm previsão de lançamento ao mercado somente no segundo semestre de 2007.

Os dois padrões mencionados contemplarão cinco tipos de acesso a uma rede WiMAX [20]:

- *Acesso fixo*: o equipamento usuário deve permanecer fixo em uma única localização geográfica durante todo o tempo de acesso à rede. Tipicamente, o equipamento estará associado à mesma célula ou setor de uma BS. Não há suporte a *handoff*;
- *Acesso nômade*: o equipamento usuário deve permanecer fixo em uma única localização geográfica pelo menos enquanto uma sessão de serviço de dados da rede está em operação. Se o equipamento usuário é movido para uma localização diferente na mesma rede sem fio (mudança de célula ou setor), a associação é reconhecida e uma nova sessão de serviço de dados deve ser estabelecida. Não há suporte a *handoff*;
- *Acesso com portabilidade*: o equipamento usuário mantém uma sessão de serviço de dados em operação enquanto se move em velocidade de caminhada em uma área de cobertura de rede limitada. Capacidades limitadas de *handoff* são oferecidas durante a operação de uma sessão de serviço de dados enquanto o equipamento usuário se move para outra célula ou para outro setor dentro da mesma célula. O *handoff* suportado é do tipo *hard handoff*, que emprega uma abordagem *break-before-make* – a associação do equipamento a um setor ou célula é desfeita antes que seja feita a associação com o novo setor ou célula. Dessa forma, o equipamento usuário está conectado a uma única BS em qualquer instante, o que é relativamente simples de implementar mas implica em uma maior latência na comunicação;
- *Acesso com mobilidade simples*: o equipamento usuário mantém uma sessão de serviço de dados em operação para aplicações não tempo real à medida que se move em velocidade veicular baixa dentro da área de cobertura da rede. *Handoffs* entre setores e BSs garantem continuidade para todas as aplicações não tempo real. São suportados somente *handoffs* do tipo *hard handoff*;
- *Acesso com mobilidade total*: o equipamento usuário mantém uma sessão de serviço de dados em operação à medida que se move em velocidade veicular alta dentro da área de cobertura da rede. *Handoffs* de desempenho garantido entre setores e BSs

asseguram a continuidade de serviço para todos os tipos de aplicações. Para isso, é oferecido suporte a *soft handoff*, comparáveis àqueles usados nas redes de telefonia celular. Eles empregam a abordagem *make-before-break*, permitindo ao equipamento usuário reter a conexão com a BS antiga até que ele esteja associado à nova, reduzindo a latência na transmissão.

O padrão IEEE 802.16-2004 suporta apenas os acessos fixo e nômade, enquanto 802.16e oferece os cinco tipos de acesso. É importante ressaltar que alguns dos serviços de banda larga apresentados anteriormente, como VoIP móvel e os jogos on-line, são altamente beneficiados pela baixa latência proporcionada pelo *soft handoff*. Por outro lado, serviços como vídeo sob demanda e tráfego de dados funcionam satisfatoriamente com *hard handoff* ou mesmo em redes sem mobilidade, podendo ser implantados nas primeiras redes WiMAX.

A mobilidade em redes WMAN também é coberta pelo padrão IEEE 802.20 [21], que ainda está em fase de especificação. Diferentemente de 802.16, este padrão incorporou mobilidade desde o início de seu desenvolvimento. Porém, seu futuro é incerto. Isso porque 802.20 teve seu desenvolvimento aprovado em dezembro de 2002, quando 802.16 tratava apenas de redes fixas, e havia interesse em um padrão de redes móveis sem fio de banda larga. Entretanto, com o desenvolvimento (e aprovação) de IEEE 802.16e, o padrão 802.20 perdeu atratividade. Enquanto os primeiros equipamentos de 802.16e já tem data estimada de lançamento, o padrão IEEE 802.20 não tem sequer previsão de aprovação, e o mercado poderá decretar o fim dessa tecnologia antes mesmo de seu lançamento.

Uma alternativa viável a 802.20 é concentrar-se em um nicho de mercado bastante específico, que não é coberto (atualmente) por 802.16e e no qual ele é notadamente excelente. Trata-se das aplicações em que as comunicações móveis de banda larga são necessárias para veículos movendo-se em altíssimas velocidades, como os trens rápidos japoneses e europeus. O padrão 802.20 suporta mobilidade veicular com velocidades de até 250 km/h.

A arquitetura proposta neste trabalho foi desenvolvida sobre o padrão IEEE 802.16-2004. Sendo assim, nenhuma questão relativa a aspectos de mobilidade é considerada.

### **3.4 O padrão IEEE 802.16**

O grupo de trabalho 802.16 foi criado pelo IEEE em julho de 1999, com a missão de desenvolver um padrão para sistemas BWA. A primeira versão do trabalho, IEEE 802.16-2001, foi lançada em 8 de abril de 2002, e operava na faixa de frequência de 10-66 GHz, o

que exigia Linha de Visada (*Line of Sight - LOS*) entre a BS e cada SS. As versões seguintes do padrão superaram essa e outras limitações, e adicionaram novas capacidades a ele. A versão ativa atualmente, IEEE 802.16-2004 [22], foi lançada em 1º de outubro de 2004 e incorpora a banda de 2 a 11 GHz. No dia 7 de dezembro de 2005, foi aprovado pelo IEEE o padrão 802.16e, adicionando mobilidade a 802.16-2004.

O padrão 802.16 define a comunicação sem fio entre a BS e uma ou mais SSs servindo a usuários domésticos ou comerciais. A tecnologia é uma alternativa às redes de acesso tradicionais como DSL e cabo, e um cenário possível de aplicação pode ser visto na Figura 3.1.

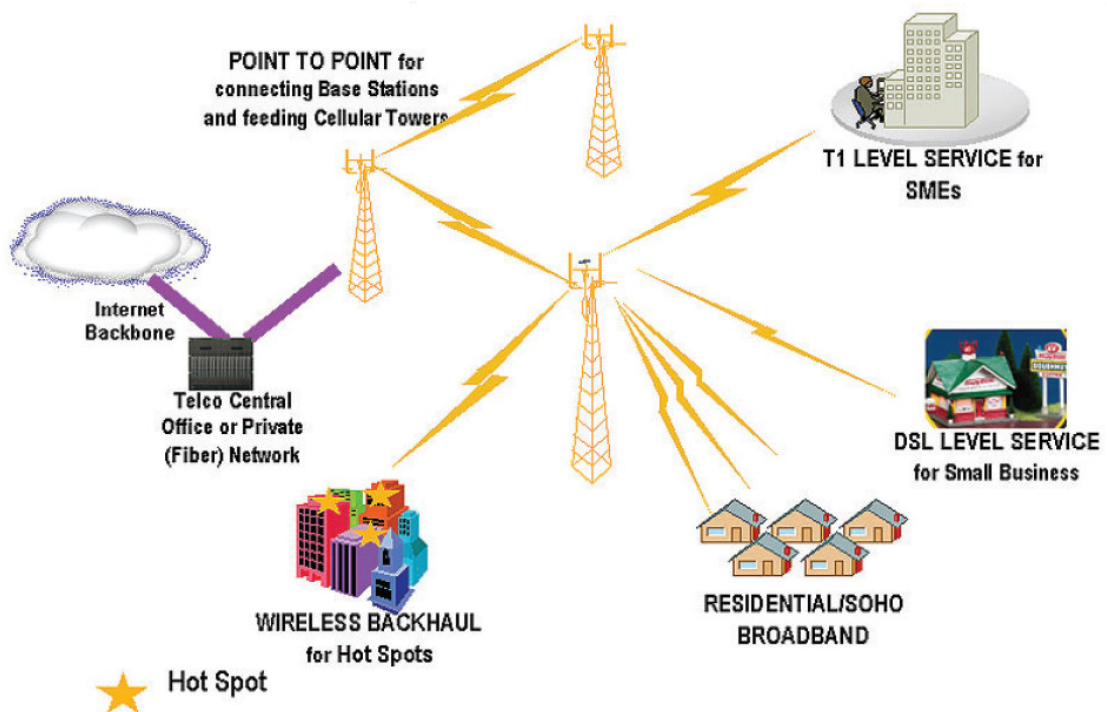


Figura 3.1. Possível cenário de aplicação de IEEE 802.16 [23]

A seguir são apresentadas as principais características definidas pelo IEEE para seu padrão de rede BWA.

O padrão IEEE 802.16 especifica a camada física (PHY) e a subcamada MAC da camada de enlace da pilha de protocolos TCP/IP. O esquema de camadas definido pelo padrão é mostrado na Figura 3.2.

A camada PHY inclui várias especificações de modulação, frequência e outros parâmetros de transmissão. Cada conjunto de especificações é adequado para um tipo de aplicação.



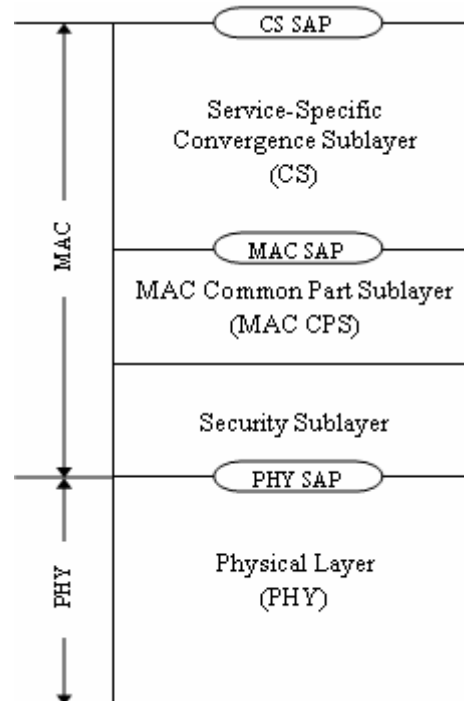


Figura 3.2. Camadas de protocolo do padrão IEEE 802.16

A subcamada MAC de IEEE 802.16 compreende três subníveis: *Service-Specific Convergence Sublayer (CS)*, *Security Sublayer* e *Common Part Sublayer (CPS)*.

O CS provê as transformações ou mapeamentos dos dados da rede externa, recebidos através do Ponto de Acesso a Serviço (*Service Access Point - SAP*) de CS, em Unidades de Dados de Serviço (*Service Data Units - SDUs*) recebidas pelo subnível CPS através do MAC SAP. Esse mapeamento inclui classificar as SDUs externas em um fluxo de serviço e associá-las a um Identificador de Conexão (*Connection Identifier - CID*). Também podem ser realizados outros procedimentos, como compressão de cabeçalho. O CS é específico para a rede externa à qual a subcamada MAC está conectada. Atualmente, o padrão IEEE 802.16 especifica CSs para redes ATM e para redes baseadas em pacotes (por exemplo, redes IP), mas outras especificações podem ser definidas de acordo com o tipo de rede utilizado.

*Security Sublayer*, o subnível responsável pela segurança da subcamada MAC, provê funcionalidades como autenticação, intercâmbio seguro de chaves e encriptação.

Finalmente, o subnível CPS provê as funcionalidades essenciais da subcamada MAC, a saber: acesso ao sistema, alocação de banda, estabelecimento de conexão e manutenção de conexão. Ele recebe dados dos vários CSs, através do MAC SAP, classificados em uma conexão MAC particular. O CPS é responsável por garantir QoS ao escalonamento e

transmissão de dados através da camada PHY. Por ser o subnível de MAC mais significativo, suas características são aprofundadas a seguir.

### 3.4.1 MAC Common Part Sublayer

O padrão IEEE 802.16 especifica duas topologias de operação da rede sem fio. A primeira delas é a *Point-to-MultiPoint* (PMP) em que deve existir uma estação base intermediando a comunicação entre todas as outras estações (assinantes), e entre elas e a rede externa. Na segunda topologia, *Mesh*, todas as estações se comunicam como numa malha de nós, sem a necessidade de um mediador. A topologia PMP é a utilizada na primeira geração de equipamentos IEEE 802.16 lançada no mercado, e é a única considerada neste trabalho.

O IEEE define dois tipos de cabeçalhos MAC: um de uso genérico e um de requisição de banda. O cabeçalho MAC genérico é ilustrado na Figura 3.3.

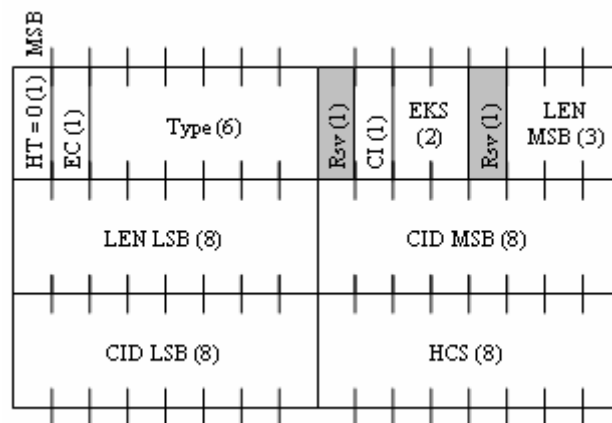


Figura 3.3. Formato do cabeçalho MAC genérico

Os campos do cabeçalho genérico são definidos da seguinte forma:

- *Header Type* (HT): especifica o tipo de cabeçalho.
    - 0 = cabeçalho MAC genérico.
    - 1 = cabeçalho de requisição de banda.
  - *Encryption Control* (EC): informa a utilização ou não de encriptação.
    - 0 = a carga útil não está encriptada.
    - 1 = a carga útil está encriptada.
- Se HT = 1, EC = 0 obrigatoriamente.

- *Type*: define 6 bits que especificam características adicionais do quadro transportado, como subcabeçalhos e cargas especiais. Quando presentes, os subcabeçalhos devem ser inseridos imediatamente após o cabeçalho MAC genérico.
- *CI (CRC Indicator)*: indica a presença ou não de um Código de Redundância Cíclica (*Cyclic Redundancy Check - CRC*) no quadro transmitido.  
0 = CRC não presente.  
1 = CRC presente.
- *EKS (Encryption Key Sequence)*: o índice do *Traffic Encryption Key (TEK)* e do vetor de inicialização usado no processo de encriptação da carga útil. Esse campo só é significativo se  $EC = 1$ .
- *LEN*: o comprimento em bytes da PDU MAC, incluindo cabeçalho e CRC, se presente.
- *CID*: identificador de conexão.
- *HCS (Header Check Sequence)*: valor semelhante ao CRC, calculado sobre os cinco primeiros bytes, usado para detectar erros no cabeçalho.

O padrão ainda reservou dois bits para uso futuro.

Conforme a necessidade do fluxo trafegado, podem ser utilizados um ou vários dos cinco subcabeçalhos definidos no padrão para o cabeçalho MAC genérico: *fragmentação, gerenciamento de concessão, empacotamento, malha e alocação de resposta rápida (FAST-FEEDBACK allocation)*.

A PDU de requisição de banda consiste apenas do cabeçalho de requisição de banda, sem qualquer carga útil. A Figura 3.4 exhibe o cabeçalho MAC de requisição de banda.

Para este cabeçalho, os campos HT, EC, CID e HCS têm o mesmo significado que no cabeçalho MAC genérico. O campo Type pode conter os valores “000” para requisição de banda *incremental* (o valor requisitado é somado à largura de banda já alocada à conexão) e “001” para requisição de banda *agregada* (o valor requisitado é a nova largura de banda absoluta alocada à conexão). O campo *Bandwidth Request (BR)* deve indicar o número de bytes requisitados para o *uplink* da conexão identificada por aquele CID.

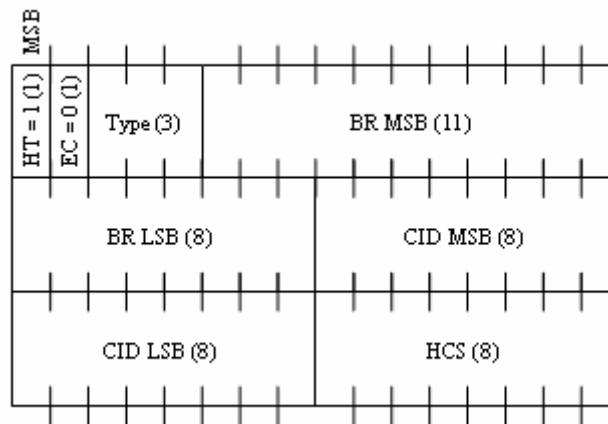


Figura 3.4. Formato do cabeçalho MAC de requisição de banda

O padrão define também diversas mensagens de controle. Essas mensagens têm um formato específico composto por um campo de tipo e um campo de carga útil, os quais devem ser inseridos no campo de carga útil da PDU MAC. As mensagens de controle MAC não devem ser enviadas através de conexões de transporte, devendo se restringir às conexões *Initial Ranging*, *Broadcast*, *Basic* e *Primary Management*. Dessa forma, nunca haverá dúvida sobre o conteúdo do campo de carga útil de um cabeçalho MAC genérico: se ele for recebido em uma conexão de transporte, conterà dados de usuário. Caso contrário, trata-se de uma mensagem de controle.

### 3.4.2 Construção e transmissão de PDUs MAC

Esta seção trata da composição da PDU a partir da qual são transmitidos os dados através da rede 802.16. Para isso, os dados do usuário, recebidos pela camada MAC na forma de uma SDU, devem ser inseridos adequadamente no campo de carga útil da PDU, o que implica que eles podem ser submetidos a processos de fragmentação, empacotamento, entre outros.

#### 3.4.2.1 Concatenação

A concatenação não acontece em nível de PDU MAC propriamente. Na realidade, trata-se de transmitir várias PDUs na mesma rajada física de transmissão. Não há restrição sobre o tipo de PDUs sendo transmitidas em conjunto: PDUs de dados do usuário, de mensagens de gerenciamento ou de requisição de banda. O receptor identificará corretamente o tipo da PDU através de seu CID.

### 3.4.2.2 Fragmentação

Fragmentação é o processo de dividir uma SDU em uma ou mais PDUs, de forma a obter o melhor aproveitamento da banda disponível e ao mesmo tempo atender aos requisitos de QoS de um fluxo de serviço.

Um fragmento é identificado pelo subcabeçalho de fragmentação inserido no cabeçalho MAC genérico. Esse subcabeçalho especifica se o fragmento sendo transportado é o primeiro de uma série, o último, um fragmento intermediário ou se não é um fragmento, mas uma SDU completa.

### 3.4.2.3 Empacotamento

Empacotamento constitui um recurso diferenciado de 802.16, que permite que uma única PDU MAC transporte várias SDUs ou fragmentos de SDUs destinadas à mesma conexão. Para controlar o empacotamento é utilizado um subcabeçalho de empacotamento inserido no cabeçalho MAC genérico.

Há duas possibilidades de empacotamento. No caso de SDUs de tamanho fixo, os empacotamentos são permitidos e as fragmentações são proibidas ao se estabelecer a conexão através da mensagem DSA-REQ. Essa mensagem deve informar também o tamanho da SDU. Dessa forma, o campo de comprimento (LEN) do cabeçalho MAC genérico indica implicitamente o número de SDUs empacotadas naquela PDU MAC. Note que não há qualquer adição de sobrecarga (*overhead*) à transmissão, já que não é necessária a adição de nenhum subcabeçalho de controle.

A outra forma de empacotamento se aplica a SDUs de tamanho variável e fragmentos. Nesse caso, há a necessidade de um subcabeçalho de empacotamento para cada SDU ou fragmento. Esse cabeçalho define individualmente o comprimento de cada unidade empacotada na PDU.

É importante observar que, no caso do empacotamento combinado com a fragmentação, não há necessidade de um subcabeçalho de fragmentação. A informação sobre a fragmentação é inserida no próprio subcabeçalho de empacotamento do fragmento, em um campo adequado.

### 3.4.2.4 Cyclic Redundancy Check (CRC)

Alguns fluxos de serviço podem exigir que um CRC seja anexado às PDUs MAC. Nesse caso, o CRC é calculado sobre o cabeçalho genérico e sobre a carga útil da PDU, conforme o

algoritmo de cálculo de CRC descrito no padrão IEEE 802.3 [24]. O CRC só pode ser aplicado às PDUs genéricas, nunca às PDUs de requisição de banda.

#### **3.4.2.5 Encriptação de PDUs MAC**

Algumas conexões entregam dados a associações seguras. Nesse caso, é necessário utilizar criptografia de dados para garantir a integridade da informação durante a transmissão. A encriptação é sinalizada no cabeçalho MAC genérico pelo bit EC, e só se aplica a PDUs genéricas. No caso de EC = 1, a carga útil da PDU está encriptada (mas o cabeçalho não), e o campo EKS do cabeçalho MAC genérico contém todas as informações necessárias para que o receptor realize a decriptação.

#### **3.4.2.6 Preenchimento de rajadas (Padding)**

Quando há um espaço não utilizado em uma rajada de dados previamente alocada, ele deve ser preenchido com o byte de preenchimento (*stuff byte*) 0xFF. Caso o espaço não utilizado seja grande o suficiente para comportar um cabeçalho MAC genérico, a região também pode ser preenchida com uma PDU MAC, codificada como explicado a seguir. O campo CID deve conter o valor padrão *Padding CID* (CID de preenchimento), definido como 0xFFFE. O campo de comprimento deve indicar o número de bytes não usados na rajada (incluindo o cabeçalho de preenchimento), o campo HCS deve ser calculado normalmente, e os demais campos devem ser definidos como zero.

#### **3.4.3 Mecanismo Automatic Repeat reQuest (ARQ)**

A implementação do mecanismo de ARQ no padrão 802.16 é opcional. Cada SDU MAC é particionada logicamente em blocos de tamanho fixo (exceto possivelmente o último bloco, composto pelos bytes restantes), sendo cada um deles identificado por um número de bloco. Esse particionamento é mantido até que todos os blocos da SDU sejam entregues com sucesso ao receptor, ou até que a máquina de estados do transmissor descarte a SDU.

Quando ARQ está habilitado, os subcabeçalhos de fragmentação e empacotamento definem o campo BSN (*Block Sequence Number*), que contém o número de seqüência do primeiro bloco do conjunto de blocos abrangido por aquele subcabeçalho.

No caso da perda de uma PDU, há dois tipos de reenvio: o primeiro deles com rearranjo, em que os fragmentos na PDU perdida dão origem a novas PDUs de transmissão, e o segundo sem rearranjo, em que a PDU perdida é retransmitida em seu formato original.

A resposta enviada pelo receptor ao transmissor indicando sucesso ou falha na transmissão é chamada *ARQ Feedback IE (Information Element)*. Essa estrutura pode ser enviada em uma PDU exclusiva ou pode ser empacotada em uma PDU com outros dados (*piggybacking*).

O padrão IEEE 802.16 define algumas constantes necessárias para o funcionamento do mecanismo de ARQ, tais como *ARQ\_WINDOW\_SIZE* (tamanho da janela deslizante), *ARQ\_BLOCK\_LIFETIME* (tempo que o transmissor espera pela confirmação de um bloco (re)transmitido, antes de descartá-lo), *ARQ\_BLOCK\_SIZE* (tamanho de bloco usado para particionar a SDU antes da transmissão), dentre outras.

O padrão utiliza duas políticas de confirmação. Na *confirmação cumulativa*, todos os blocos entre o início da janela e o valor de BSN enviado são confirmados. Já na *confirmação seletiva*, o receptor especifica exatamente quais blocos estão sendo confirmados.

Tanto o transmissor quanto o receptor implementam máquinas de estado que controlam o mecanismo ARQ das conexões, com base nas variáveis de estado (ex.: *ARQ\_RX\_WINDOW\_START*), parâmetros do padrão (ex.: *ARQ\_WINDOW\_SIZE*) e variáveis de temporização (ex.: *ARQ\_RETRY\_TIMEOUT*).

É importante observar que o padrão 802.16 utiliza *Selective Repeat* como política de retransmissão de blocos perdidos/confirmados negativamente. De fato, essa é a escolha mais natural, considerando que a transmissão é realizada em um meio de má qualidade e com alta incidência de erros. Nesse caso, é mais eficiente transmitir apenas os blocos defeituosos/perdidos, ainda que essa escolha implique em maior custo com buffers de armazenamento e sobrecarga de processamento.

Por fim, uma SDU MAC está pronta para ser entregue à camada superior quando todos os seus blocos ARQ foram corretamente recebidos dentro dos valores de *time-out* definidos.

#### **3.4.4 Serviços de escalonamento de dados**

Cada conexão IEEE 802.16 é associada a um único serviço de escalonamento de dados, definido por um conjunto de parâmetros de QoS que quantificam aspectos de seu comportamento. Esses parâmetros são gerenciados através das mensagens DSA e DSC. O IEEE especifica quatro tipos de serviço de escalonamento, que definem diferentes níveis de QoS: *Unsolicited Grant Service (UGS)*, *real-time Polling Service (rtPS)*, *non-real-time Polling Service (nrtPS)* e *Best Effort (BE)*.

#### 3.4.4.1 UGS

A classe de serviço UGS especifica transmissões do tipo *constant bit rate* (CBR). Nessa categoria se encaixam os tráfegos T1/E1 e VoIP sem supressão de silêncio. Os principais parâmetros de QoS que definem o tráfego UGS são: *Maximum Sustained Traffic Rate* (pico da taxa de dados do serviço em bits por segundo), *Maximum Latency* (atraso máximo entre o instante de recepção de um pacote pela BS ou SS em sua interface de rede e o encaminhamento do pacote à interface de RF), *Tolerated Jitter* (variação máxima do atraso para a conexão) e *Request/Transmission Policy* (provê a capacidade de especificar certos atributos para o fluxo de serviço, os quais incluem opções para formação de PDUs, para fluxos de serviço de *uplink*, e restrições no tipo de requisição de banda).

O subcabeçalho de gerenciamento de concessão (*Grant Management subheader*) é usado para passar informações adicionais sobre o estado da conexão UGS entre a SS e a BS. O bit *Slip Indicator* (SI) indica que houve uma sobrecarga na fila de transmissão do serviço, por algum problema ocorrido. Como resposta, a BS aloca temporariamente uma largura de banda extra à conexão, até que a situação se normalize, o que é indicado quando a SS desliga o bit SI. O bit *Poll-Me* (PM), por sua vez, pode ser usado pela SS para requisitar um *polling* para outra conexão, não-UGS.

Note que, na situação normal de operação, o tráfego UGS não gera qualquer sobrecarga causada por requisição de banda, já que a banda concedida periodicamente é acertada uma única vez, no estabelecimento da conexão.

#### 3.4.4.2 rtPS

O tráfego rtPS é adequado para fluxos de dados de tempo real com pacotes de tamanho variável, tais como vídeos MPEG. Os parâmetros de QoS principais para esse tráfego são: *Minimum Reserved Traffic Rate* (quantidade média mínima de dados em bits por segundo necessária para que haja transporte), *Maximum Sustained Traffic Rate* (idem UGS), *Maximum Latency* (idem UGS) e *Request/Transmission Policy* (idem UGS).

Para este serviço, a BS deve enviar oportunidades de requisição de banda no modo *unicast* à SS, em intervalos de tempo regulares, de forma que o tráfego rtPS possa especificar sua necessidade de transmissão (largura de banda).



### 3.4.4.3 nrtPS

O tráfego nrtPS define fluxos de dados tolerantes ao atraso com pacotes de tamanho variável, como FTP, sendo reservada uma taxa de dados mínima. Os parâmetros de QoS mais importantes para definir o tráfego nrtPS são: *Minimum Reserved Traffic Rate* (idem rtPS), *Maximum Sustained Traffic Rate* (idem UGS e rtPS), *Traffic Priority* (dados dois fluxos de serviço idênticos em todos os parâmetros de QoS exceto este, o fluxo de prioridade mais alta deve ter menor atraso e preferência de armazenamento em *buffer*) e *Request/Transmission Policy* (idem UGS e rtPS).

A requisição de banda pode ser feita tanto através de *unicast* a intervalos regulares (como no rtPS, porém com intervalos de *unicast* menos rígidos) como por *slots* de contenção.

### 3.4.4.4 BE

O serviço BE é voltado para fluxos de dados sem qualquer nível mínimo de serviço, sendo transportados quando há banda disponível. Os parâmetros de QoS que o definem são: *Maximum Sustained Traffic Rate* (idem anteriores), *Maximum Latency* (idem UGS e rtPS) e *Request/Transmission Policy* (idem anteriores).

Tanto *unicast* quanto contenção podem ser usados na requisição de banda. Porém, BE não estabelece um nível mínimo de serviço, e assim o mecanismo de *unicast* não oferece qualquer garantia de atendimento.

Os parâmetros apresentados anteriormente para a caracterização das classes de serviço são de suma importância em uma arquitetura de provisionamento de QoS para a camada MAC do padrão IEEE 802.16. Através deles pode ser feita a classificação das conexões em uma das quatro classes, quando de seu estabelecimento entre a BS e a SS. Eles também permitem o controle de admissão, em que a BS analisa se a rede possui recursos suficientes para atender uma nova conexão, com os requisitos de transmissão especificados. Da mesma forma, possibilitam o policiamento do tráfego, mediante a comparação dos valores de tráfego medidos e aqueles acertados no estabelecimento da conexão.

## 3.4.5 Mecanismos para alocação e requisição de banda

Os tráfegos rtPS, nrtPS e BE devem requisitar banda explicitamente à BS, de forma a suprir suas necessidades de transmissão. Essa requisição pode ser feita de duas formas: através de um cabeçalho de requisição de banda ou por meio de *piggybacking*, utilizando o

subcabeçalho de gerenciamento de concessão (*Grant Management Subheader*), caso essa funcionalidade seja suportada. Em ambos os casos, a SS especifica o número de bytes a serem alocados, de maneira incremental ou agregada. No cabeçalho de requisição, um bit especifica se a alocação é incremental ou agregada. A alocação por *piggybacking* é sempre incremental.

Para garantir o funcionamento do protocolo, periodicamente deve ser feita uma requisição agregada. Esse período é determinado em função do nível de QoS e da qualidade do enlace de transmissão.

Como visto antes, requisições de banda das SSs à BS são sempre feitas para cada CID individualmente. No entanto, a BS concede banda ao CID básico da SS, e cabe a esta escalonar a banda recebida entre todas as suas conexões.

#### **3.4.5.1 Polling**

*Polling* é o processo pelo qual a BS aloca banda às SSs especificamente para que sejam feitas requisições de banda. Essa alocação pode ser feita a uma SS individualmente ou a um grupo de SSs. O segundo caso caracteriza a requisição por contenção.

As alocações de banda para requisição são especificadas em IEs (*Information Elements*) no UL-MAP.

No caso de *unicast polling*, a banda de requisição é alocada individualmente à SS, no espaço exato para que esta responda com um cabeçalho de requisição de banda. Caso a SS não necessite de banda, o espaço é utilizado para transmissão de dados ou preenchido com bits de enchimento.

Caso a SS tenha uma conexão UGS ativa, o processo de *polling* não deve ser realizado periodicamente. Quando a SS deseja requisitar banda para alguma conexão não-UGS, ela simplesmente ativa o bit PM (*Poll-Me*) no subcabeçalho de gerenciamento de concessão.

Nas políticas de *multicast* e *broadcast* o mecanismo é o mesmo, exceto pelo fato de que todas as SSs abrangidas pelo grupo, e que necessitem de banda, aplicam o algoritmo de resolução de contenção para escolher um slot no qual farão sua requisição de banda. Se no quadro seguinte a SS for contemplada com banda para *uplink*, então a requisição é concluída com sucesso. Caso contrário é aplicado o processo de *backoff* e uma nova requisição deve ser feita.

### 3.4.6 Suporte de MAC à camada PHY

Duplexação é a forma como é feita a divisão do quadro MAC entre *uplink* e *downlink*. Diversas técnicas de duplexação são suportadas pelo protocolo da camada MAC. A escolha da técnica utilizada poderá afetar certos parâmetros da camada física e impactar nas funcionalidades que podem ser suportadas. Além disso, a técnica de duplexação escolhida poderá impactar a eficiência da transmissão de dados em cenários com tráfegos *uplink* e *downlink* assimétricos.

#### 3.4.6.1 Frequency Division Duplexing (FDD)

Em um sistema FDD os dados de *downlink* e *uplink* são transmitidos em canais de frequências diferentes, no mesmo intervalo de tempo. Esse sistema pode usar a funcionalidade de SSs com recurso de transmissão *full-duplex*, bastando que elas escutem o canal de *downlink* ao mesmo tempo em que transmitem dados no *uplink*. Também permite a operação de SSs *half-duplex*, exigindo para isso que o escalonador da BS aloque o *downlink* e o *uplink* para essas estações em intervalos de tempo não-sobrepostos.

Tanto o *uplink* como o *downlink* utilizam um quadro de duração fixa, o que simplifica os algoritmos de alocação de banda.

#### 3.4.6.2 Time Division Duplexing (TDD)

Nos sistemas TDD as transmissões *uplink* e *downlink* ocorrem em intervalos de tempo diferentes, usualmente na mesma frequência. Um quadro TDD tem uma duração fixa e contém os subquadros de *uplink* e *downlink*. A duração desses subquadros dentro do quadro TDD é variável, o que significa que a banda alocada para o *uplink* e para o *downlink* é adaptativa. A divisão do quadro TDD entre *downlink* e *uplink* é uma funcionalidade de sistema controlada pela camada MAC.

Os trabalhos publicados até o momento sobre o padrão IEEE 802.16 adotam TDD como forma de duplexação do quadro MAC, bem como os primeiros equipamentos de mercado que implementam o padrão. Por isso, este trabalho também assume quadros MAC TDD. A Figura 3.5 apresenta a estrutura de um quadro MAC TDD de IEEE 802.16.

O subquadro de *downlink* começa com um preâmbulo para fins de sincronização, seguido pelo Cabeçalho de Controle do Quadro (*Frame Control Header* - FCH) e por várias rajadas de transmissão *downlink*. A primeira rajada, em especial, contém as mensagens de controle MAC transmitidas em *broadcast*. São elas: *Downlink Channel Descriptor* (DCD) e *Uplink Channel*

*Descriptor* (UCD), que definem as características dos canais físicos, e *Uplink Map* (UL-MAP) e *Downlink Map* (DL-MAP), explicadas a seguir. As demais rajadas transmitem as PDUs MAC de dados *downlink* da rede. Todas as rajadas de *downlink* são ordenadas pelo seu modo de camada PHY, do mais robusto (e menos eficiente) para o menos robusto (e com maior capacidade de transmissão).

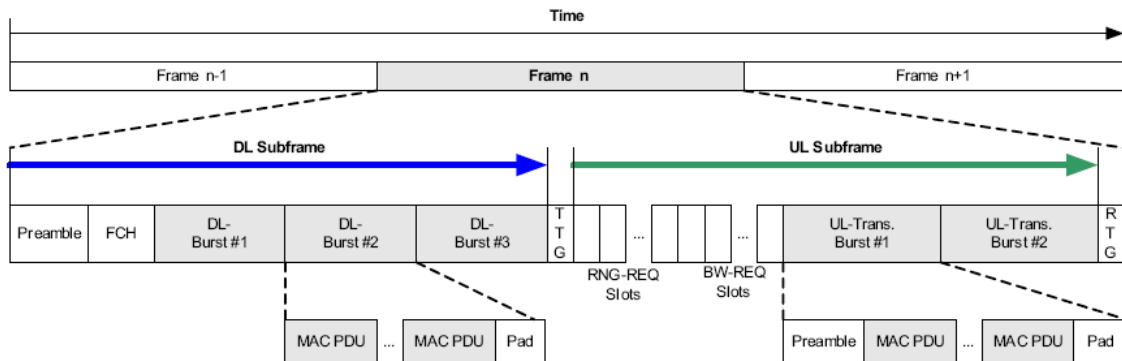


Figura 3.5. Quadro MAC TDD do padrão IEEE 802.16 [6]

O subquadro de *uplink* consiste de um intervalo de contenção para registro inicial de uma SS na rede (*initial ranging*), outro intervalo de contenção para requisição de banda pelos fluxos de menor prioridade (*bandwidth request*), e várias rajadas *uplink*, cada uma transmitida por uma SS para envio de dados e requisição de banda.

Entre os subquadros de *downlink* e *uplink* há o *Transmitter-receiver Turnaround Gap* (TTG), que é um intervalo de tempo necessário para que o modem da BS chaveie seu modo de operação, de transmissão para recepção, e vice-versa para o modem da SS. De maneira análoga, é definido o *Receiver-transmitter Turnaround Gap* (RTG) no fim da estrutura do quadro.

### 3.4.6.3 A mensagem Downlink Map (DL-MAP)

A mensagem DL-MAP define a alocação do intervalo de *downlink* entre as SSs. Para cada uma das  $n$  rajadas de transmissão que compõem o subquadro de *downlink*, o DL-MAP especifica um DL-MAP\_IE, que é um elemento de informação para aquela rajada de transmissão. O IE é dependente do modo de camada física utilizado.

O formato do DL-MAP\_IE para a OFDM-256 PHY (camada física adotada pelas primeiras implementações comerciais de 802.16) é descrito em detalhes no padrão IEEE 802.16-2004. Resumidamente, pode-se dizer que o DL-MAP\_IE define para cada rajada de transmissão *downlink*:

- O CID ao qual se destina a rajada, podendo ser *unicast*, *multicast* ou *broadcast*. Caso seja usado o CID de *broadcast* ou um CID de *multicast*, é possível concatenar MAC PDUs *unicast* (com diferentes CIDs) em uma única rajada de *downlink*;
- As características de camada física empregadas naquela rajada, definidas através do campo *Downlink Interval Usage Code* (DIUC);
- O instante de início da rajada, medido em unidades de símbolos OFDM a partir do início do subquadro de *downlink*.

No caso da concatenação de várias MAC PDUs *unicast* em uma rajada *broadcast* ou *multicast*, não é possível para uma SS saber o instante exato dentro da rajada em que há uma PDU destinada a ela. Sendo assim, as SSs associadas ao CID especificado no DL-MAP devem escutar toda a rajada em busca de MAC PDUs.

#### **3.4.6.4 A mensagem Uplink Map (UL-MAP)**

De maneira análoga ao DL-MAP, a mensagem UL-MAP descreve a divisão do subquadro de *uplink* entre as SSs. O formato do UL-MAP\_IE para a OFDM-256 PHY é apresentado no padrão IEEE 802.16-2004. São especificadas as seguintes informações para uma rajada de transmissão *uplink*:

- O CID ao qual se destina a rajada, podendo ser *unicast*, *multicast* ou *broadcast*. Quando a rajada for alocada como concessão de banda, o CID especificado deve ser o CID básico da SS;
- As características de camada física empregadas naquela rajada, definidas através do campo *Uplink Interval Usage Code* (UIUC);
- O instante de início da rajada, medido em unidades de símbolo OFDM a partir do instante de tempo definido pelo campo *Allocation Start Time* do UL-MAP;
- A duração da rajada, medida em unidades de símbolo OFDM.

No padrão 802.16 são definidos cinco tipos de UL-MAP\_IEs: *Request IE*, *Initial Ranging IE*, *Data Grant Burst Type IEs*, *End of map IE* e *Gap IE*.

Através do *Request IE*, a BS especifica um intervalo de *uplink* no qual requisições de banda de *uplink* podem ser feitas. Caso o CID especificado no IE seja de *multicast* ou *broadcast*, então as SSs abrangidas por ele devem requisitar banda por contenção. Se for um CID de *unicast*, então a SS requisita banda individualmente. PDUs transmitidas nesse

intervalo devem usar o cabeçalho de requisição de banda. Como implementação opcional, a SS pode decidir por usar aquela alocação para o envio de dados, requisição de banda explícita, ou requisição de banda via *piggybacking*.

O *Initial Ranging IE* especifica um intervalo de transmissão em que novas SSs podem se juntar à rede. Nesse intervalo, a nova estação transmite mensagens de gerenciamento necessárias para sua configuração. A transmissão pode se dar tanto por *unicast* quanto por contenção.

O *Data Grant Burst Type IE* especifica um intervalo de transmissão de uma ou mais PDUs de dados para uma SS específica. Essa oportunidade de transmissão pode ser tanto em resposta a uma requisição prévia da SS, ou devido a uma política de alocação de banda.

O *End of map IE* indica o fim da lista de IEs no UL-MAP, e o *Gap IE* indica pausas nas transmissões *uplink*. Nenhuma SS deve transmitir durante o intervalo definido pelo *Gap IE*.

### 3.4.7 Operação do protocolo da camada MAC para suporte a QoS

O principal mecanismo de IEEE 802.16d para a oferta de QoS é a associação dos pacotes trafegados pela MAC a um fluxo de serviço identificado pelo CID da conexão.

Um *fluxo de serviço (service flow)* consiste em um serviço de transporte da subcamada MAC que permite o transporte unidirecional de pacotes tanto no *uplink* quanto no *downlink*, ao qual é concedido um nível particular de QoS. Todo fluxo de serviço é caracterizado por um conjunto de *Parâmetros de QoS* tais como latência, *jitter* e largura de banda garantida, através dos quais é provido o nível de QoS acordado entre a BS e as SSs. O propósito básico dessas características de QoS é estabelecer uma ordem de transmissão e escalonamento na interface aérea.

Um fluxo de serviço é composto pelos seguintes atributos:

- *Service Flow ID (SFID)*: identificador do fluxo de serviço na rede. Todo fluxo de serviço tem pelo menos um SFID e uma direção;
- *Direction*: direção dos pacotes trafegados no fluxo de serviço – *uplink* ou *downlink*;
- *CID*: mapeamento para a conexão à qual o fluxo de serviço está associado. Este atributo só é válido para fluxos de serviço admitidos ou ativos;

- *ProvisionedQoSParamSet*: indica implicitamente o limitante máximo de recursos que o fluxo de serviço tem à sua disposição. Esses parâmetros são alocados por uma entidade fora do escopo do padrão IEEE 802.16, como o sistema de gerenciamento de rede, por exemplo;
- *AdmittedQoSParamSet*: conjunto de recursos reservados pela BS ao fluxo de serviço. Tais recursos não estão ativos, ou seja, não estão sendo utilizados pelo fluxo de serviço. O principal recurso a ser reservado é largura de banda, mas também se incluem nesse grupo quaisquer recursos necessários para a subsequente ativação do fluxo;
- *ActiveQoSParamSet*: especifica um conjunto de parâmetros de QoS que definem recursos em utilização de fato pelo fluxo de serviço.

De acordo com os conjuntos de parâmetros de QoS definidos, pode-se pensar em três tipos de fluxos de serviço:

- *Provisioned* (aprovisionado): no caso de fluxos de serviço provisionados, *ProvisionedQoSParamSet* indica os recursos que podem ser alocados ao fluxo, e os parâmetros *AdmittedQoSParamSet* e *ActiveQoSParamSet* são ambos nulos;
- *Admitted* (admitido): fluxos de serviço admitidos definem os atributos *ProvisionedQoSParamSet* e *AdmittedQoSParamSet*, mas o valor do atributo *ActiveQoSParamSet* é nulo;
- *Active* (ativo): nesse tipo de fluxo de serviço o atributo *ActiveQoSParamSet* é não-nulo e define os recursos utilizados de fato pelo fluxo. Somente um fluxo de serviço ativo pode encaminhar pacotes.

O relacionamento entre os conjuntos de parâmetros de QoS pode ser visto na Figura 3.6. O *ActiveQoSParamSet* é sempre um subconjunto de *AdmittedQoSParamSet*, que por sua vez é sempre um subconjunto de *ProvisionedQoSParamSet*.

*Conexões* são identificadas pelo campo CID de 16 bits. Há dois tipos de conexões: conexões para transferência de dados de aplicações e conexões de gerenciamento, que trafegam em canais exclusivos. Na inicialização da SS, dois pares (*uplink* e *downlink*) de conexões de gerenciamento devem ser estabelecidos entre a SS e a BS – conexões *básica* e *primária* – e um terceiro par pode ser gerado opcionalmente – conexão *secundária*. Os três pares de conexões refletem o fato de que há nativamente três níveis diferentes de QoS para o

tráfego de gerenciamento entre a SS e a BS. A conexão básica é usada para a troca de mensagens de gerenciamento MAC curtas e urgentes. A conexão de gerenciamento primária é usada para o intercâmbio de mensagens mais longas e tolerantes a atrasos. Finalmente, a conexão de gerenciamento secundária é usada para a transferência de mensagens tolerantes a atrasos baseadas em padrões como DHCP, Trivial FTP (TFTP), SNMP, etc. O CID para as conexões de gerenciamento é estabelecido na fase de registro da SS. O mesmo valor de CID é atribuído a ambos os membros (*uplink* e *downlink*) de cada par de conexões.

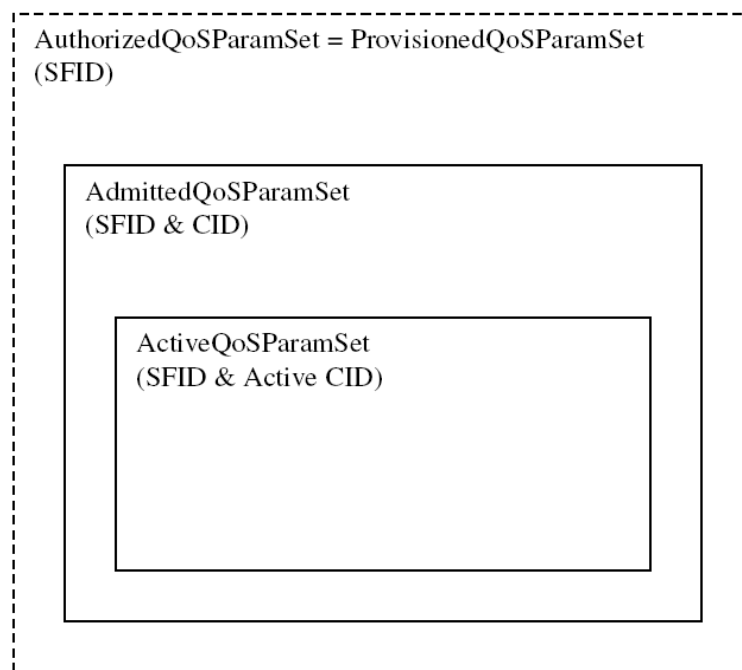


Figura 3.6. Encapsulamento dos conjuntos de parâmetros de QoS de um fluxo de serviço [22]

O CID pode ser considerado um identificador de conexão mesmo para tráfegos não-orientados a conexão como IP, pois ele agrega em si informações sobre o destino e o contexto do fluxo trafegado. A definição do CID com 16 bits permite um total de 64K conexões em cada canal de *uplink* e *downlink*.

A *classe de serviço* (*service class*) é um objeto opcional que pode ser implementado na BS. Uma classe de serviço é definida na BS como um conjunto específico de parâmetros de QoS. Os conjuntos de parâmetros de QoS de um fluxo de serviço podem referenciar uma classe de serviço, incorporando os parâmetros de QoS definidos por ela. Naturalmente, os conjuntos de parâmetros de QoS de um fluxo de serviço não se limitam aos parâmetros da classe de serviço, podendo estender ou mesmo sobrescrever o conjunto de parâmetros incorporado, de acordo com autorização da BS.



A implementação de classes de serviço permite a centralização na BS da configuração dos fluxos de serviço. Para isso, os operadores definem o nome da classe de serviço na SS e configuram a implementação da classe de serviço na BS. A partir daí podem ser feitas modificações na implementação de um serviço da rede localmente na BS, sem que seja necessário alterar as configurações do serviço em cada SS. Além disso, a definição de classes de serviço permite que protocolos das camadas superiores criem um fluxo de serviço na SS requisitando-o por um nome significativo, como “G711” para sinalização de telefonia ou “VoIP” para aplicações de voz sobre IP.

Os principais objetos da arquitetura, seus atributos e relacionamentos estão representados na Figura 3.7. Os atributos que identificam univocamente os objetos estão sublinhados, e os atributos opcionais estão entre colchetes. A cardinalidade de cada relacionamento é indicada nas pontas da linha de associação entre os objetos. Por exemplo, um fluxo de serviço pode estar associado a zero ou  $N$  (várias) PDUs, mas uma PDU está associada sempre a exatamente um fluxo de serviço.

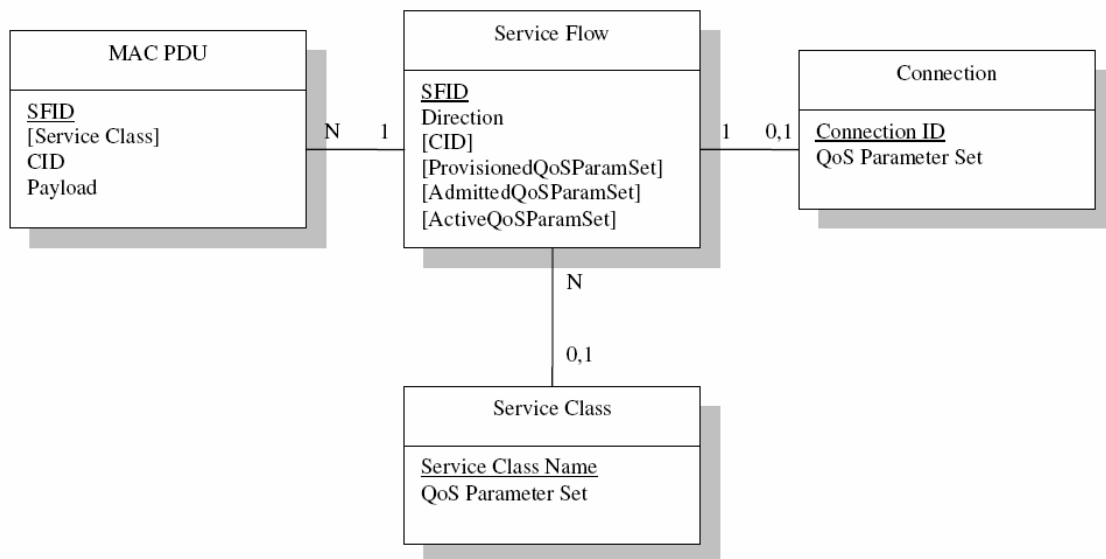


Figura 3.7. Modelo de objetos da camada MAC de IEEE 802.16 [22]

A criação de fluxos de serviço em uma rede IEEE 802.16 se dá de duas formas: estaticamente, onde o provisionamento do fluxo de serviço é feito por meios externos ao escopo do padrão, tais como o sistema de gerenciamento da rede ou programação direta do administrador da rede; e dinamicamente, em que um fluxo de serviço é criado por uma BS ou SS através da troca de mensagens específicas. Ao ser criado, um fluxo de serviço é instanciado, obtém um identificador (SFID) e um tipo “aprovisionado”. Um fluxo de serviço

passa aos estados “admitido” ou “ativo” pela transferência de parâmetros operacionais através de mensagens específicas definidas pelo padrão. No caso da ativação, o fluxo de serviço é mapeado para uma conexão.

Também por meio de mensagens definidas pelo padrão, fluxos de serviço podem ser modificados e excluídos. No caso da modificação, podem ser alterados os conjuntos de parâmetros de QoS admitido ou ativo, dependendo do estado do fluxo.

### **3.5 O padrão ETSI HiperMAN**

O padrão *High Performance Metropolitan Area Network* (HiperMAN) [25] foi lançado pelo *European Telecommunications Standards Institute* (ETSI) em novembro de 2003. Seu desenvolvimento teve como base os padrões IEEE 802.16 e seu complemento IEEE 802.16a, que adicionou ao padrão original a faixa de operação abaixo de 11 GHz. Assim, as camadas físicas de ambos os padrões, baseadas em OFDM-256, devem ser compatíveis entre si. Entretanto, diferentemente de 802.16, HiperMAN só opera na faixa de 2 a 11 GHz.

O escopo do padrão HiperMAN compreende as camadas MAC e PHY. Os objetivos principais do projeto eram possibilitar a instalação não-profissional, operação NLOS, fácil escalabilidade, uso eficiente do espectro de transmissão e suporte a QoS.

A camada MAC se divide nas subcamadas *Convergence Sublayer*, que faz a interface com as camadas mais altas, *Common Part Sublayer*, que desempenha as funções chaves do padrão, e *Security Sublayer*, responsável pela privacidade e segurança das transmissões. Conceitos como *conexão*, *fluxo de serviço*, *QoS*, entre outros, também estão presentes no padrão, de maneira idêntica às definições de IEEE 802.16.

HiperMAN suporta transmissão baseada em quadros, os quais podem ter tamanho variável. O quadro consiste de um subquadro de *downlink* e um subquadro de *uplink*, com o subquadro de *downlink* sempre precedendo o subquadro de *uplink*. Nos quadros são transmitidas as MAC PDUs, que transportam os dados das aplicações, mensagens de controle e requisições de banda.

Pelo estudo desenvolvido em artigos científicos e sites da Internet [18] [25] [26], foi possível concluir que IEEE 802.16 e ETSI HiperMAN são padrões idênticos. As razões que levaram o instituto europeu a especificar seu padrão de BWA provavelmente têm base em questões políticas, já que historicamente tem havido disputas pela propriedade de tecnologias.

Assim, é provável que a Europa não quisesse ficar atrás dos EUA no desenvolvimento de um padrão de banda larga sem fio.

Atualmente, IEEE e ETSI alinham seus padrões para que possa haver interoperabilidade total entre eles no futuro, o que já é alcançado nos dias de hoje através dos *perfis de aplicação* propostos pelo WiMAX Forum, como mostrado a seguir.

### 3.6 O WiMAX Forum

Para promover a adoção dos padrões IEEE 802.16 e ETSI HiperMAN, e para facilitar a implantação de redes BWA baseadas neles, foi formado em junho de 2001 o WiMAX Forum [27], uma associação sem fins lucrativos composta atualmente por mais de 350 membros, entre fabricantes de componentes, desenvolvedores de equipamentos, provedores de serviços e indústrias afins. Seu objetivo é promover e certificar a compatibilidade dos equipamentos de rede com os padrões de banda larga sem fio e a interoperabilidade entre equipamentos de fabricantes distintos. Para isso, o WiMAX Forum desenvolveu *perfis de aplicação* dos padrões e definiu testes de conformidade a serem realizados em laboratórios certificados. Assim surgiu o padrão *WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access)*.

O WiMAX Forum abrange sete grupos de trabalho que cuidam de áreas chaves para levar ao mercado os produtos certificados WiMAX. Dentre esses grupos, dois merecem destaque: o *Technical Working Group*, que desenvolve especificações dos testes de conformidade com o padrão e serviços de certificação para alcançar a interoperabilidade global entre sistemas BWA; e o *Certification Working Group*, que lida com os aspectos operacionais do programa de certificação do WiMAX Forum.

É comum referenciar o padrão IEEE 802.16 como WiMAX, o que faz todo sentido já que WiMAX define a tecnologia que será aplicada de fato no mercado. A existência de um padrão único de aplicação da tecnologia traz benefícios para todos os envolvidos no negócio:

- Os *operadores de rede* têm interoperabilidade entre equipamentos de diferentes fabricantes, o que reduz custos de operação;
- Os *fabricantes de componentes* têm menos variações nos produtos e maiores ganhos de escala;
- Os *usuários finais* têm uma rede de acesso mais rápida, barata e amplamente disponível.

Em janeiro de 2005 o WiMAX Forum anunciou o laboratório espanhol *Cetecom Spain* como a instituição oficial para certificação de produtos baseados no padrão IEEE 802.16-2004. Um ano depois, em janeiro de 2006, foram lançados no mercado os primeiros produtos certificados WiMAX. Em células de 3 a 10 quilômetros de raio com operação NLOS, são alcançadas taxas de transmissão de até 12 Mbps.

## Capítulo 4

### **4 Redes de Acesso Sem Fio de Banda Larga como Suporte a Serviços Multimídia Distribuídos**

A evolução das redes de telecomunicações e transmissão de dados verificada nos últimos anos, bem como os serviços suportados por elas atualmente, permite uma visão, ainda que limitada, de como serão os serviços de transmissão de dados dentro de alguns anos, ou pelo menos suas principais características esperadas. Esse novo cenário em desenvolvimento é denominado redes de Quarta Geração (*Fourth Generation - 4G*). O termo surgiu no início desta década, indicando a nova geração de rede de telefonia celular seguinte à tecnologia 3G. Com o tempo, entretanto, o conceito de 4G adquiriu um sentido mais amplo, até chegar ao seu significado atual: uma nova arquitetura de integração de redes, provendo serviços multimídia de alta qualidade acessados via telefone móvel, PDA ou laptop.

Nesse aspecto, há duas palavras-chaves relacionadas à tecnologia: convergência e interoperabilidade. A primeira delas indica que diferentes aplicações, suportadas por redes de acesso distintas (móveis ou fixas), deverão trafegar por um núcleo de rede comum (rede de *backbone*), de maneira transparente para o usuário. Possivelmente, essas aplicações buscarão serviços em servidores da rede, os quais oferecerão atendimento de maneira única, independente da origem da requisição. A segunda palavra-chave remete à comunicação que deverá existir, também de maneira transparente, entre aplicações rodando nas diferentes redes que compõem a arquitetura de integração 4G.

Do exposto acima, fica clara a necessidade de um mecanismo único de integração, que seja aceito pelos envolvidos no negócio e que, se possível, ofereça algumas vantagens adicionais de uso. Tudo isso leva à característica básica das redes 4G (talvez a única definida até o momento): o emprego de IP como mecanismo de integração. Nem poderia ser diferente, já que o protocolo é aceito e utilizado mundialmente e, apesar de suas deficiências conhecidas, foi validado por anos de uso em redes operando nas mais diversas condições e suportando diferentes aplicações. Possivelmente será empregado o IPv6 ou alguma variante deste especializada em aplicações móveis.

As redes 4G deverão prover suporte a voz de alta qualidade, vídeo de alta definição, música (a questão dos direitos autorais deverá ser cuidadosamente discutida), jogos on-line e outras aplicações sequer imaginadas (4G é uma tecnologia ainda em início de definição). Em outras palavras, deverá suportar serviços mais sofisticados que os atuais, atendendo a um número maior de usuários simultaneamente. Para isso, as primeiras projeções indicam a necessidade de taxas de transmissão da ordem de 100 a 200 Mbps. Nesse contexto, é provável que o custo da tecnologia e as vantagens que ela trará para os usuários justifiquem a convergência das redes de voz/telefonia e de dados em uma nova rede 4G, que representará a fusão entre os sistemas celulares e as redes de dados sem fio (WPAN, WLAN e WMAN), de maneira contínua e transparente para o usuário.

Entretanto, se os serviços a serem oferecidos e os níveis mínimos de desempenho de 4G podem ser especificados, a tecnologia que oferecerá suporte a esses requisitos é a grande questão a ser resolvida. Deve-se ter em mente a necessidade de integração das diferentes tecnologias de acesso atuais: 3G (baseada em CDMA ou GSM), IEEE 802.11 e 802.16, dentre outras, provendo serviços móveis de tempo real a altas taxas de dados.

Uma possibilidade é o emprego de tecnologias baseadas em 3G. Essa opção se adequaria à proposta inicial de 4G como evolução de 3G. Entretanto, para atender ao modelo atualmente concebido para as redes 4G, seriam necessários investimentos em pesquisa e revisões de projeto que levassem as taxas atuais de 2 Mbps para os 100 Mbps planejados para 4G. Isso representa uma dificuldade, já que as redes 3G não foram originalmente planejadas para esse contexto de aplicação, com taxas de dados tão altas. Uma solução alternativa é a tecnologia IEEE 802.16, projetada desde o início para prover mobilidade com altas taxas de dados. A seção seguinte apresenta a proposta de aplicação de IEEE 802.16 como tecnologia de base para 4G.

#### **4.1 Evolução de IEEE 802.16 para 4G**

O padrão IEEE 802.16 possui diversas características que o qualificam como uma opção viável de tecnologia de suporte a 4G. Entre elas pode-se citar a eficiência de espectro provida pela modulação OFDM, as altas taxas de dados obtidas, suporte a mobilidade, provisionamento nativo de QoS e o fato de a tecnologia facilitar a interoperabilidade com redes WLAN e WPAN.

Há, no entanto, um caminho a ser percorrido até que se tenha a arquitetura 4G plenamente funcional. A seguir é sugerido um possível cenário de evolução de IEEE 802.16 nesse sentido.

Inicialmente, é preciso que se tenha instalada uma infra-estrutura de comunicação baseada em IEEE 802.16, com ampla cobertura, que possa satisfazer as projeções de desempenho estabelecidas para 4G. Essa rede – ou conjunto de redes – constituirá o *backbone* da rede 4G e sua integração poderá ser feita pelas linhas de transmissão de dados mundiais que já existem.

Uma vez que a infra-estrutura esteja implantada, poderá ser feita a interligação das redes existentes, a saber, telefonia celular e WLANs, com a rede IEEE 802.16. Essa etapa se justifica por dois motivos: primeiro, porque possivelmente não haverá dispositivos móveis baseados em IEEE 802.16 que desempenhem as mesmas funções dos dispositivos já existentes para aquelas redes; segundo, e mais importante, deve-se garantir a preservação do capital instalado e o retorno do investimento de longo prazo feito pelas operadoras nas redes atuais, sobretudo as redes celulares de 3G. Essas redes em particular são relativamente novas e vêm demandando grandes investimentos de desenvolvimento e implantação, os quais não podem ser simplesmente descartados e substituídos. Nessa fase serão necessários *gateways* especiais de ligação entre as redes de acesso e o núcleo.

Paralelamente, deve-se investir no desenvolvimento de aplicações para rodar na rede. Conforme discutido nos capítulos anteriores, essas aplicações exigirão alta largura de banda, suporte a QoS e mobilidade. Elas proverão níveis de serviço inéditos, impensáveis nas redes existentes atualmente.

Com o avanço da tecnologia, surgirão dispositivos móveis híbridos, capazes de se conectarem a redes distintas. É o caso dos telefones celulares com acesso Wi-Fi que já são produzidos atualmente. Essa etapa representa a transição entre o acesso à rede feito através de tecnologias distintas, o que força a existência de redes separadas de acesso e núcleo, e a rede integrada de tecnologia única. Nesse estágio do desenvolvimento, o dispositivo móvel conecta-se a um provedor de serviço na rede de núcleo através da rede de acesso que estiver disponível. Com o passar do tempo, é esperado que a tecnologia dos dispositivos móveis se torne gradativamente uniforme.

Finalmente, quando a tecnologia permitir e o investimento se justificar, as redes de acesso distintas deixarão de existir, e a arquitetura resultante terá uma composição única, com o

acesso totalmente integrado ao *backbone* de transmissão. Nesse ponto, a tecnologia 4G conforme concebida atualmente estará consolidada.

Ao longo desse percurso, é possível que o padrão IEEE 802.16 original sofra modificações para se adaptar às novas necessidades que surgirem, mas seus fundamentos básicos provavelmente serão mantidos.

Naturalmente, a criação de cenários de evolução como esse traz consigo imprecisões e suposições. Para 4G especificamente, há complicadores como a fase inicial em que a especificação da tecnologia se encontra, e o fato de abranger áreas muito dinâmicas, caso das telecomunicações e TI. Mesmo assim, o estabelecimento dessas visões de futuro é importante para o desenvolvimento das tecnologias propostas.

## **4.2 Aspectos de camada MAC**

É difícil definir aspectos de camada MAC para uma tecnologia cujas funcionalidades oferecidas ainda não estão completamente especificadas, como é o caso de 4G. Entretanto, certos aspectos são mandatórios para que as novas redes possam atender os serviços multimídia planejados. Alguns deles são apresentados a seguir.

O primeiro aspecto essencial de camada MAC é a oferta de QoS. As redes 4G estão sendo planejadas para lidar com diversos tipos de tráfego, os quais apresentam diferentes níveis de sensibilidade em relação aos parâmetros da conexão, como largura de banda mínima, atraso máximo, variação do atraso, dentre outros. Dessa forma, a camada MAC deve prover mecanismos de diferenciação dos pacotes encaminhados com relação ao tipo de tráfego a que pertencem, para que suas necessidades particulares possam ser atendidas. A implementação de QoS na camada MAC é abordada na próxima seção.

Deve existir também um Controle de Admissão, que realize o estabelecimento das conexões no nível MAC e negocie os parâmetros de QoS a serem oferecidos pela rede à aplicação.

Uma vez definidos os parâmetros de QoS para uma dada conexão, a camada MAC deve ajustar, ou *suavizar*, todo o tráfego a ser transmitido para que o mesmo obedeça aos parâmetros estabelecidos. Da mesma forma, ela também deve garantir que as requisições de banda feitas pelas aplicações respeitem os recursos negociados.

Mesmo características de camada física devem ser consideradas no projeto da camada MAC. A técnica de modulação empregada, por exemplo, influencia na taxa de transmissão de



dados, devendo ser levada em consideração para um projeto de MAC mais eficiente. Outro aspecto físico importante que tem impacto na camada MAC é a potência de transmissão. Deve-se lembrar que praticamente todos os dispositivos de acesso à rede 4G serão móveis, e o uso eficiente da energia nesse caso é um requisito básico. Considerando tanto a modulação quanto o uso da energia, é interessante que a camada MAC tenha um comportamento dinâmico, sendo capaz de empregar a melhor técnica de acordo com as condições instantâneas do ambiente de comunicação (taxa de erros, distância entre os dispositivos comunicantes, presença de obstáculos etc.).

### **4.3 Implementação de QoS na camada MAC**

Como dito anteriormente, as redes 4G deverão atender a diferentes tipos de tráfego, cada um deles com diferentes níveis de sensibilidade em relação aos parâmetros da conexão. Caberá à camada MAC diferenciar os fluxos de dados, priorizando os pacotes com mais restrições, como aqueles referentes a aplicações em tempo real.

A oferta de QoS na camada MAC se dará principalmente pela implementação de algoritmos operando nas filas de entrada dos pacotes e nos módulos de concessão de banda de *uplink* e *downlink*. Dessa forma, dois objetivos serão cumpridos: 1) a ordem de transmissão dos pacotes a serem encaminhados será estabelecida de acordo com o nível de prioridade associado ao fluxo; 2) será concedida maior largura de banda (mais oportunidades de transmissão) aos dispositivos móveis com maior necessidade, de acordo com os tipos de fluxo a serem transmitidos.

Além disso, outros fatores poderão impactar na qualidade do serviço oferecido pela rede, como empacotamento eficiente dos dados transmitidos, as características de camada física empregadas na transmissão, o algoritmos de roteamento empregado, controle de localização e mobilidade, entre outros.

Um complicador inerente às redes 4G é o fato de que a comunicação fim-a-fim entre dois usuários poderá envolver múltiplas redes sem fio. Como a QoS oferecida poderá variar entre essas redes, a QoS final disponibilizada aos usuários será limitada pela rede de menor capacidade.

#### **4.4 Prospecção sobre possíveis desafios no tocante à mobilidade**

A mobilidade é uma das características fundamentais das redes 4G. Por mobilidade entende-se a transmissão de dados em altas taxas (maiores que 20 Mbps) enquanto o dispositivo do usuário se desloca a velocidades que podem ser maiores que 100 km/h. Enquanto se desloca, o dispositivo pode mudar de célula – *handoff* – ou mesmo de rede – *roaming*. Tais mudanças devem ser transparentes para as aplicações do usuário.

O suporte à transmissão em altas velocidades não deve representar um grande problema, pois técnicas de modulação atuais, como a OFDMA empregada no padrão IEEE 802.16e, já permitem transmissões a taxas de até 6 Mbps em velocidades superiores a 100 km/h. Espera-se que essas técnicas sejam aperfeiçoadas para atender aos requisitos das redes 4G.

O gerenciamento da mobilidade, por sua vez, é uma questão consideravelmente mais delicada. Primeiramente porque deverá satisfazer a requisitos de desempenho das aplicações, sobretudo aquelas de tempo real, cuja execução não deve ser prejudicada durante um *handoff*. Em segundo lugar, porque envolverá possivelmente diferentes tecnologias de rede, principalmente no início da implantação de 4G. Sendo assim, os dispositivos móveis devem ser capazes de migrar de uma célula para outra, ou de uma rede para outra, de maneira transparente.

Há ainda questões comerciais que devem ser contempladas no caso do *roaming*, referentes principalmente à tarifação e à cobrança. Essa situação é semelhante ao que já ocorre hoje na telefonia celular, porém com uma dimensão bastante ampliada, já que o número de usuários e de tecnologias envolvidas será muito maior. Nesse cenário, os operadores da rede deverão traçar estratégias conjuntas de gestão.

## *Capítulo 5*

### **5 Arquitetura de QoS Proposta para o Padrão IEEE 802.16**

Com base no exposto no capítulo 4, fica evidente que os serviços multimídia distribuídos requerem certas características especiais de desempenho da rede sobre a qual operam. Essas características se apóiam principalmente na oferta de diferentes níveis de QoS aos pacotes de dados, de acordo com a classe de tráfego a que estes pertencem.

Ainda no capítulo 4, foi proposto o padrão IEEE 802.16 como tecnologia de base para as redes 4G, e foram discutidos alguns aspectos de camada MAC necessários para que seja construído o cenário proposto.

Este capítulo descreve uma proposta de arquitetura para a camada MAC do padrão IEEE 802.16 que atende aos requisitos enumerados no capítulo 4, sobretudo no tocante à oferta de QoS, com o intuito de viabilizar de fato o padrão IEEE 802.16 como tecnologia de suporte a 4G. São apresentadas as funcionalidades essenciais que a camada MAC deve oferecer para suportar os serviços multimídia planejados, bem como os blocos da arquitetura que implementam tais funcionalidades. O esquema da arquitetura proposta é mostrado na Figura 5.1.

A maior parte das funcionalidades exigidas da camada MAC é enumerada no padrão do IEEE, mas a maneira como elas devem ser implementadas não é definida. A arquitetura proposta aproveita algumas idéias apresentadas em [9], [13] e [14], aplicando sobre estes trabalhos uma abordagem aprofundada e orientada à implementação.

A seção 5.1 apresenta separadamente cada componente proposto. As seções 5.2 e 5.3 explicam a arquitetura de MAC na SS e na BS respectivamente, acompanhando o caminho dos dados através dos blocos funcionais.

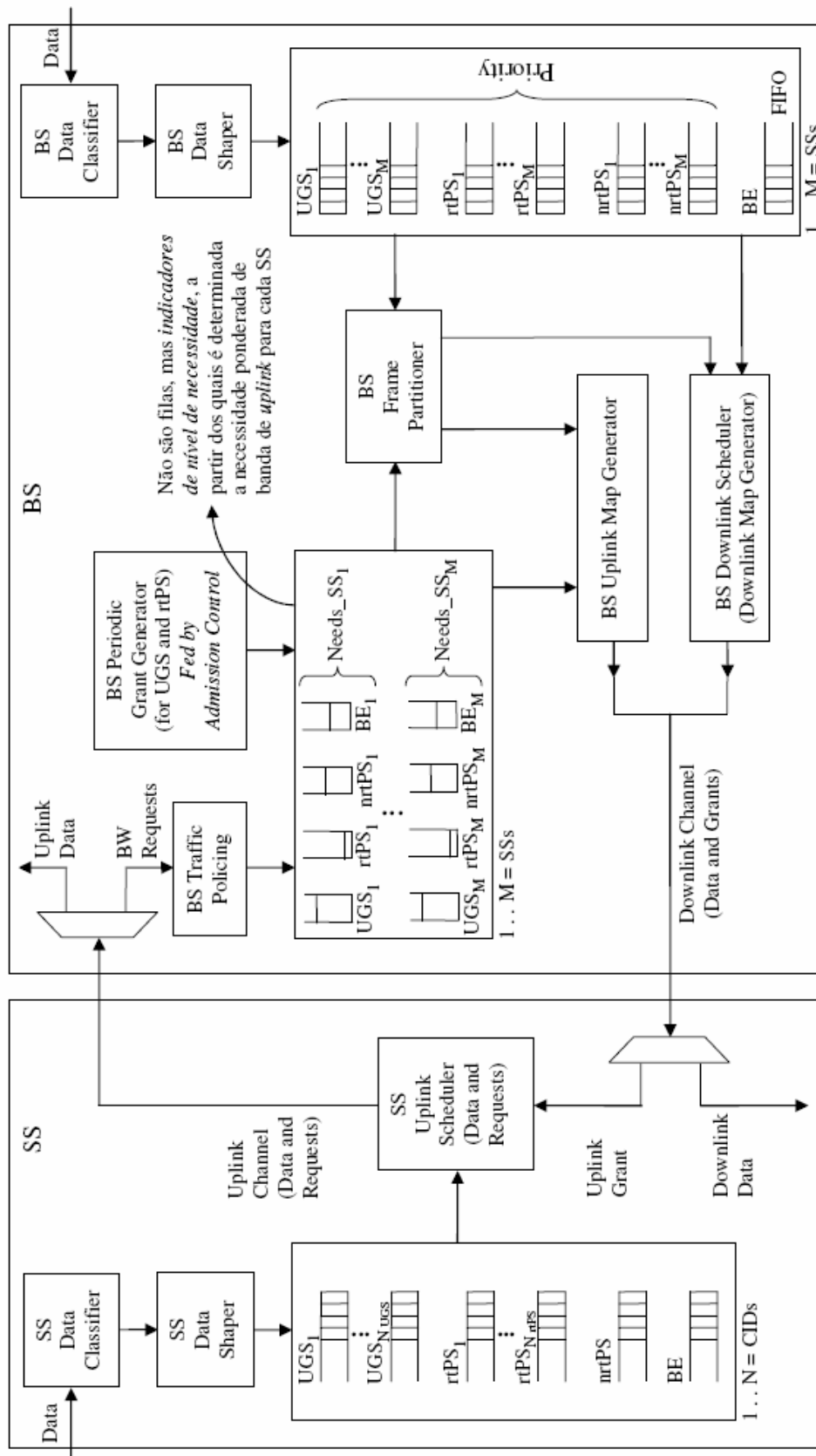


Figura 5.1. Arquitetura de QoS proposta para a camada MAC de IEEE 802.16

## 5.1 Blocos funcionais da arquitetura

### 5.1.1 SS/BS Data Classifier

Considerando que o suporte a QoS é a primeira característica essencial da camada MAC, já que é esperado que as redes 4G lidem com diferentes tipos de tráfegos, a camada MAC deve prover um mecanismo para diferenciar os pacotes recebidos de acordo com a classe de serviço a que pertencem, de forma que suas necessidades particulares sejam satisfeitas. Isso é feito pelo *SS/BS Data Classifier*. Esse componente recebe pacotes de dados das camadas superiores e os classifica na conexão MAC correspondente, atribuindo a eles um CID.

O mapeamento de um pacote para uma conexão MAC é feito com base em consultas às tabelas compostas na fase de admissão das conexões e pode se dar através de diferentes parâmetros de classificação como, por exemplo: endereços IP de origem e destino, portas de origem e destino, campo *Type of Service* (ToS) do IP, *flags* do cabeçalho TCP. Adicionalmente, pode-se incluir algum tipo de inteligência artificial à classificação, por exemplo, através da inferência de informações a partir da carga útil dos pacotes.

Finalmente, o pacote é encaminhado para a fila de tráfego correspondente (*uplink* na SS ou *downlink* na BS) de acordo com seu CID.

### 5.1.2 SS/BS Data Shaper

Após a classificação, e antes de inserir um pacote em sua fila correspondente, a camada MAC deve se assegurar de que as aplicações respeitem os parâmetros de tráfego negociados para suas conexões.

O componente *SS/BS Data Shaper* verifica se os dados enviados pelas aplicações estão de acordo com os parâmetros adotados no estabelecimento da conexão em questão. Em caso negativo, o *Data Shaper* ajusta o tráfego que viola os parâmetros.

Apesar de relativamente simples, a atuação desse componente é fundamental para a manutenção do funcionamento correto da arquitetura.

### 5.1.3 SS Uplink Scheduler

Este componente determina como os *slots* de transmissão concedidos pela BS serão usados, sendo responsável tanto pelo envio de dados de aplicações como de requisições de banda por parte da SS.

Com base na largura de banda de *uplink* concedida pela BS, o *SS Uplink Scheduler* executa um algoritmo que opera sobre as filas para decidir quais pacotes serão transmitidos e quanto de largura de banda deve ser requisitado para transmissões futuras (caso seja necessário). Esse algoritmo deve distribuir a banda recebida de maneira justa entre todos os fluxos de dados, respeitando os parâmetros de QoS estabelecidos.

### 5.1.4 BS Admission Control

O componente *BS Admission Control* não é mostrado na Figura 5.1. Sua função é estabelecer as conexões na camada MAC (caso haja recursos disponíveis para isso) e negociar os parâmetros de QoS que serão oferecidos às aplicações.

O *BS Admission Control* é responsável por manter as tabelas que mapeiam pacotes de aplicação em fluxos de serviço IEEE 802.16, as quais serão usadas pelo *SS/BS Data Classifier* na classificação dos pacotes. Ele também deve compor tabelas com os parâmetros de fluxo de cada CID (classe de tráfego, largura de banda mínima, atrasos máximo e mínimo, *jitter* etc.). Finalmente, o *BS Admission Control* deve alimentar o *BS Periodic Grant Generator* com os dados das conexões que precisam de requisição periódica de banda.

### 5.1.5 BS Traffic Policing

O componente *BS Traffic Policing* atua diretamente sobre as requisições de largura de banda provenientes das SSs, garantindo que a banda requisitada para uma determinada CID respeita os recursos negociados no estabelecimento da conexão.

### 5.1.6 BS Periodic Grant Generator

Sendo alimentado pelo *BS Admission Control*, a função do *BS Periodic Grant Generator* é encaminhar aos indicadores de nível de necessidade de *uplink*, na BS, a largura de banda periódica demandada por todas as conexões UGS e rtPS. Para cada conexão de uma dessas classes, o componente deve obedecer aos critérios de quantidade – qual a largura de banda a ser requisitada – e periodicidade – quando essa largura de banda deve ser requisitada.

### 5.1.7 BS Frame Partitioner

Com base nas filas de *downlink* e nas necessidades de *uplink* das SSs, o *BS Frame Partitioner* divide a largura de banda total do quadro TDD entre os subquadros de *downlink* e *uplink*.

Como as demandas de *downlink* e *uplink* podem variar a cada ciclo, é esperado que o *BS Frame Partitioner* opere dinamicamente e eficientemente, de acordo com as necessidades de transmissão instantâneas.

### 5.1.8 BS Uplink Map Generator

O *BS Uplink Map Generator* compõe a mensagem UL-MAP descrita no padrão IEEE 802.16. Na prática, esse bloco da arquitetura concede largura de banda de *uplink* às SSs com base em suas necessidades de *uplink*, levando em consideração a divisão do quadro TDD feita pelo *BS Frame Partitioner*.

### 5.1.9 BS Downlink Scheduler

Esse componente é análogo ao *BS Uplink Map Generator* para o tráfego de *downlink*, pois cabe a ele compor a mensagem DL-MAP do padrão IEEE 802.16. Para isso ele deve escalonar pacotes no canal de *downlink*, selecionando nas filas de *downlink* da BS os pacotes de dados a serem transmitidos no próximo quadro TDD. Assim como no caso do *BS Uplink Map Generator*, é preciso observar a divisão do quadro TDD realizada pelo *BS Frame Partitioner*.

## 5.2 Fluxo de dados na arquitetura: a SS

Quando um pacote de dados é recebido das camadas superiores pela camada MAC de IEEE 802.16, ele é classificado pelo *SS Data Classifier* na conexão MAC correspondente, de acordo com os parâmetros de classificação adotados. Em seguida, já vinculado a um valor de CID, o pacote pode ser enviado à fila de *uplink* apropriada.

Porém, antes de ser inserido em sua fila, o pacote passa pelo *SS Data Shaper*, que analisa todo o fluxo de entrada à procura de abusos por parte das aplicações, que podem tentar transmitir dados além dos parâmetros negociados. Se isso for constatado, o pacote pode ser descartado pela camada MAC.

Na seqüência estão as filas de transmissão do *uplink*. O leiaute adotado neste trabalho é o seguinte:  $N_{UGS}$  filas FIFO para os tráfegos UGS e  $N_{rtPS}$  filas FIFO para os tráfegos rtPS, tal que  $N_{<traffic>}$  é o número de CIDs servidas pela SS cuja classe de serviço corresponde a *traffic*. Há ainda uma fila FIFO para todos os tráfegos nrtPS e outra para todos os tráfegos BE. Como alternativa ao esquema anterior, pode ser utilizada uma única fila com prioridade para todos os fluxos do tipo UGS e outra semelhante para os fluxos rtPS (mantendo a filas FIFO para nrtPS e BE). O mais importante em relação às filas da SS é a implementação de um algoritmo eficiente para servi-las com justiça, de acordo com os parâmetros de cada fluxo. Esse algoritmo fica a cargo do *SS Uplink Scheduler*.

Assim, a última tarefa executada sobre um pacote na SS é realizada pelo *SS Uplink Scheduler*. Baseado nas filas da SS e na largura de banda de *uplink* concedida pela BS, esse bloco retira das filas os pacotes que serão transmitidos no próximo quadro e determina quanto de largura de banda deve ser requisitado, visando sempre ao atendimento dos parâmetros de QoS estabelecidos. Nesse momento os pacotes podem ser fragmentados e/ou agrupados. Finalmente o PDU MAC é composto e seu envio é feito à BS no *slot* de tempo alocado à SS.

### 5.3 Fluxo de dados na arquitetura: a BS

Assim como na SS, no lado da BS um pacote proveniente das camadas superiores passa inicialmente pelos blocos *BS Data Classifier* e *BS Data Shaper*, que têm as mesmas funcionalidades dos componentes da SS.

Em seguida o pacote é encaminhado à fila correspondente, de acordo com a conexão à qual está associado. A BS adota um esquema de filas diferente da SS, composto por  $M$  filas com prioridade para tráfegos UGS,  $M$  filas com prioridade para tráfegos rtPS,  $M$  filas com prioridade para tráfegos nrtPS e uma fila FIFO para os tráfegos BE.  $M$  é o número de SSs atendidas pela BS, o que significa que, para cada SS, há uma fila com prioridade para cada classe de serviço diferente de BE. De acordo com a prioridade estabelecida pelos parâmetros negociados, todos os tráfegos UGS da SS  $k$  são inseridos na fila  $UGS_k$ , os tráfegos rtPS são inseridos na fila  $rtPS_k$  e os tráfegos nrtPS são inseridos na fila  $nrtPS_k$ . Os tráfegos BE de todas as SSs são inseridos conforme sua ordem de chegada na fila BE. Tal esquema de filas exige um algoritmo para realizar a inserção ordenada de um pacote de dados UGS, rtPS ou nrtPS na fila da SS de destino. Por ter que processar o tráfego de todas as SSs e organizar os quadros MAC, a BS exige um *hardware* mais robusto que a SS, de forma a atender a todo o tráfego satisfazendo as restrições de tempo da rede.



Ao mesmo tempo em que chegam pacotes a serem encaminhados às SSs, a BS também recebe PDUs MAC provenientes destas, contendo tanto dados de aplicação como requisições de banda. Os dados são encaminhados às camadas superiores e as requisições de banda são analisadas pelo *BS Traffic Policing*, que se assegura de que a largura de banda requisitada respeita os recursos alocados àquela conexão.

Após o policiamento do tráfego, a quantidade de banda requisitada é incluída em uma estrutura de dados composta por *buffers* ponderados que armazenam as necessidades de banda de cada SS, agrupadas por classes de serviço. Esses *buffers* também computam a largura de banda periódica demandada pelas conexões UGS e rtPS, passada pelo bloco *Periodic Grant Generator*. Por se tratar de *buffers* ponderados, uma necessidade de  $B$  bytes terá impacto maior para um tráfego UGS do que para um tráfego BE.

Levando em consideração as necessidades de *uplink* armazenadas no banco de *buffers* e as necessidades de *downlink* inferidas a partir das filas de tráfego, o *BS Frame Partitioner* divide o quadro TDD entre os subquadros de *downlink* e *uplink*. Essa informação é usada pelo *BS Uplink Map Generator* na distribuição da banda de *uplink*, e pelo *BS Downlink Scheduler* na alocação da banda de *downlink*. Como acontece na SS, os pacotes podem ser fragmentados e/ou agrupados para transmissão. Nesse momento o envio dos dados pode ser iniciado pelo canal de *downlink* (obedecendo à temporização estabelecida) e o ciclo se encerra.

## 5.4 Conclusão

Como pôde ser visto neste capítulo, a agregação de QoS na camada MAC de IEEE 802.16 é feita principalmente através da diferenciação dos pacotes em classes de serviços com prioridades distintas e pela implementação de algoritmos nos módulos de concessão de banda (de *uplink* e *downlink*) atuando sobre as filas de pacotes. Fazendo isso, dois objetivos são cumpridos: 1) a seqüência de transmissão dos pacotes a serem encaminhados é estabelecida de acordo com o nível de prioridade dos fluxos; 2) mais largura de banda será concedida às estações com maior necessidade, considerando não só a quantidade total de dados a serem transmitidos, mas também os parâmetros de serviço estabelecidos para cada fluxo.

O capítulo seguinte apresenta um modelo de simulação para a arquitetura proposta. Apesar de se limitar a alguns blocos somente, o modelo é fiel à proposta e foi projetado para facilitar a introdução de extensões futuras.

## Capítulo 6

### **6 Modelo de Simulação para a Arquitetura Proposta**

No segundo semestre de 2005 foi realizada uma busca por ferramentas de simulação de rede que oferecessem suporte ao padrão IEEE 802.16. Dois simuladores merecem destaque: o OPNET Modeler [28] e o Network Simulator [29]. O primeiro é um sistema proprietário que possui inúmeros recursos de modelagem e análise, inclusive uma interface gráfica para desenvolvimento das simulações, sendo bastante conhecido e utilizado tanto no meio científico/acadêmico quanto industrial. O segundo, mais utilizado no meio acadêmico e científico, possui igual número de recursos de simulação, porém trata-se de um *software* livre com código aberto. O usuário constrói suas simulações programando diretamente nas linguagens OTcl ou C++.

Ambas as ferramentas provêm um ambiente de desenvolvimento que suporta a modelagem e simulação de redes de comunicação e sistemas distribuídos com base em eventos discretos. Também em comum há o fato de nenhuma delas oferecer suporte para simulação do padrão IEEE 802.16. Nesse aspecto, está em desenvolvimento para o OPNET Modeler um modelo de simulação de redes IEEE 802.16 que faz parte do pacote *Modeler Wireless Suite*. Esse modelo está disponível somente para alguns fabricantes de equipamentos de redes, provedores de serviço e organizações de defesa que compõem o consórcio de desenvolvimento. No caso do Network Simulator, há o desenvolvimento independente de vários modelos para o padrão IEEE 802.16. Nenhum, entretanto, foi incorporado ao pacote de distribuição da ferramenta. Assim, foi necessário escolher um simulador e construir um modelo de simulação para a arquitetura de QoS apresentada no capítulo 5.

O ambiente de simulação escolhido foi o Network Simulator, por estar disponível gratuitamente na Internet (inclusive o código-fonte) e por permitir o desenvolvimento direto, em C++, das funcionalidades e objetos desejados, sem passar por qualquer restrição ou filtro imposto pela interface de desenvolvimento da aplicação.

Dessa forma, um dos objetivos buscados desde o início deste trabalho era o desenvolvimento de um modelo do padrão IEEE 802.16 no Network Simulator, o que foi feito

com êxito. Esse modelo de simulação, sobre o qual foram implementadas algumas das funcionalidades da arquitetura de QoS proposta no capítulo 5, é descrito na seção 6.2. Antes, porém, é feita uma breve introdução ao Network Simulator na seção 6.1.

## 6.1 Introdução ao Network Simulator

O Network Simulator (NS) é um simulador de redes orientado a eventos, desenvolvido pela Universidade de Berkeley. Atualmente é parte do projeto VINT (*Virtual InterNetwork Testbed*) [30], que desenvolve ferramentas para mostrar resultados de simulações, análises e conversores de topologias de redes de outros formatos para o padrão do NS. É escrito em C++ e OTcl (linguagem de script TCL com extensão orientada a objeto desenvolvido no MIT), e por ser gratuito e ter seu código-fonte disponível na Internet, é largamente utilizado no meio acadêmico e científico, sendo continuamente desenvolvido e aprimorado por milhares de pessoas em diversos países.

Dentre as principais funcionalidades simuladas pelo NS, pode-se enumerar:

- Camada de Aplicação: comportamento de tráfegos CBR, FTP, Telnet e Web, entre outros;
- Camada de Transporte: protocolos UDP, TCP e SCTP;
- Camada de Rede: algoritmos de roteamento *unicast* e *multicast*, políticas de gerenciamento de filas de roteadores;
- Camada de Enlace: protocolos MAC para simulação de LANs com e sem fio (CSMA/CD, CSMA/CA, etc.), redes móveis (incluindo suporte a IP móvel), redes de satélites;
- Camada Física: meios físicos guiados e não-guiados (modelos de propagação de rádio);
- Modelo de energia, para nós móveis de redes sem fio.

Um fator importante para a adoção do NS como ferramenta de simulação nesta dissertação foi a existência de um modelo inicial de simulação de IEEE 802.16, desenvolvido por um grupo de pesquisa parceiro na Unicamp, e que serviu como ponto de partida para a simulação realizada neste trabalho.

A Figura 6.1 ilustra o NS sob uma visão de usuário simplificada. O NS é um interpretador de comandos OTcl juntamente com uma biblioteca que possui um escalonador de eventos, objetos componentes de rede e módulos para a configuração de rede. Para configurar e executar uma simulação, um usuário deve escrever um script OTcl que inicia um escalonador de eventos, configurar a topologia da rede usando os objetos de rede e as funções de conexão da biblioteca, e comunicar à fonte do tráfego quando iniciar e quando parar a transmissão de pacotes através do escalonador. Quando um usuário quer criar um novo objeto de rede, ele pode facilmente escrever o código para o novo objeto ou utilizar um código já existente na biblioteca de objetos e pode então fazer com que o caminho dos dados passe através do objeto.

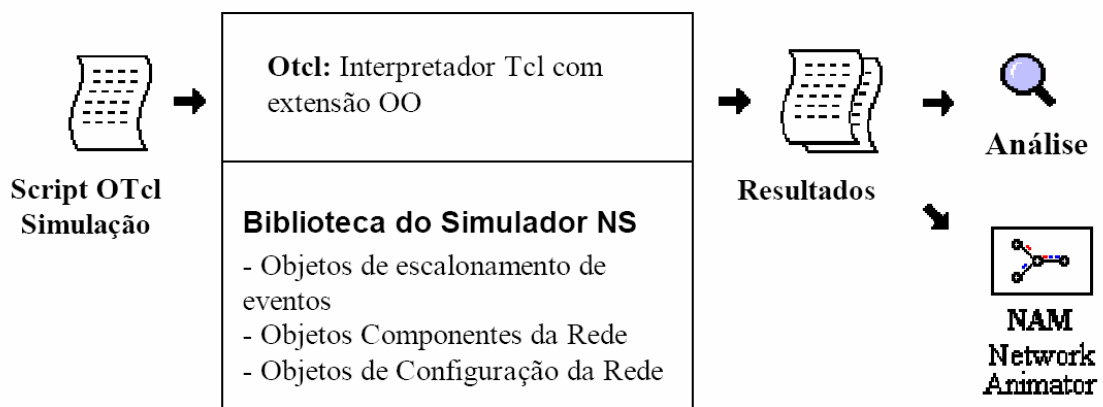


Figura 6.1. NS sob o ponto de vista do usuário (visão simplificada) [31]

Como mencionado anteriormente, o NS trabalha com OTcl e C++. Por que duas linguagens? Por razões de eficiência. O NS separa a implementação do caminho de dados da implementação do controle. Assim, para reduzir o tempo de processamento de pacotes e eventos (tempo de execução, não o tempo de simulação), o escalonador de eventos e os objetos de componentes de rede básicos no caminho de dados são escritos e compilados usando C++. Estes objetos compilados ficam disponíveis para o interpretador OTcl através de uma ligação que cria uma correspondência do objeto OTcl para cada um dos objetos C++ e faz com que as funções de controle e as variáveis de configuração especificadas pelo objeto C++ atuem como funções e variáveis membros de objetos OTcl correspondentes (objetos C++ utilizados internamente por outros objetos C++ não precisam ser ligados ao OTcl). Dessa forma, o controle de objetos C++ é feito via OTcl. Isso torna mais ágil o processo de simulação (mudar e re-executar o modelo), considerando que grande parte da pesquisa de redes envolve pequenas variações de parâmetros e configurações.

A Figura 6.2 representa a arquitetura geral do NS. O usuário atua na camada “tcl”, escrevendo scripts e executando simulações. O escalonador de eventos e os componentes de rede são implementados em C++ e disponibilizados ao interpretador na camada “otcl” pela camada “tclcl”, através do processo de ligação descrito anteriormente (*OTcl linkage*).

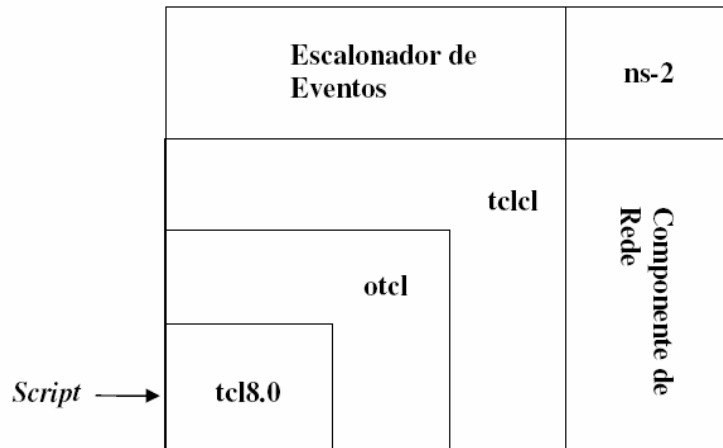


Figura 6.2. Arquitetura do NS [31]

Como visto antes, para criar uma simulação é preciso escrever um script OTcl, que será lido por um interpretador e gerará uma saída específica. O roteiro a seguir enumera as principais etapas de construção de uma simulação, devendo ser adaptado de acordo com o tipo de simulação pretendida.

- Criação do objeto simulador (escalonador de eventos);
- Abertura de arquivos para análise posterior (*trace*);
- Criação da topologia da rede (nós e enlaces);
- Criação dos agentes da camada de transporte e conexão com os nós;
- Criação dos geradores de tráfego e conexão com os agentes da camada de transporte;
- Programação dos eventos da simulação (dinâmica);
- Fechamento da simulação, animação e geração de estatísticas.

Quando uma simulação é executada, o NS produz um ou mais arquivos de saída (desde que essa tarefa seja especificada no script da simulação), baseados em texto, que contêm dados detalhados da simulação. Esses arquivos de *trace* podem ser utilizados para análise de simulações ou como entrada para uma ferramenta de simulação gráfica, o Network Animator (*nam*), desenvolvido como parte do projeto VINT. Um arquivo do tipo *nam* possui todas as

informações necessárias para realizar a animação da simulação, como os instantes de chegada e saída de pacotes e quedas ou falhas nos enlaces. O *nam* oferece ao usuário uma interface gráfica bastante amigável, permitindo controlar a velocidade da animação e facilitando a visualização de informações tais como o fluxo de pacotes na rede e os pacotes descartados em cada enlace.

No entanto, as visualizações do *nam* não permitem uma análise precisa das simulações. Nesse caso, deve-se inspecionar diretamente o arquivo *trace*, que registra informações sobre cada evento em um formato específico. A Figura 6.3 exemplifica o conteúdo de um arquivo *trace* e seu formato geral. A partir do *trace* pode-se utilizar scripts disponíveis na Internet ou ferramentas de análise como o *awk* para medir parâmetros de desempenho da rede como, por exemplo, a taxa de transferência entre dois *hosts* ou o atraso médio dos pacotes em um roteador.

evento	tempo	do nó	para o nó	tamanho pacote	tipo pacote	flags	fid	end. origem	end. destino	número seq.	id pacote
--------	-------	-------	-----------	----------------	-------------	-------	-----	-------------	--------------	-------------	-----------

{ r : recepção no nó "para o nó"  
 + : entrada na fila do enlace  
 - : saída da fila do enlace  
 d : descarte (*drop*)

endereço origem : nó.porta  
 endereço destino : nó.porta

Exemplo:

```

r 1.3556 3 2 ack 40 ----- 1 3.0 0.0 15 201
+ 1.3556 2 0 ack 40 ----- 1 3.0 0.0 15 201
- 1.3556 2 0 ack 40 ----- 1 3.0 0.0 15 201
r 1.35576 0 2 tcp 1000 ----- 1 0.0 3.0 29 199
+ 1.35576 2 3 tcp 1000 ----- 1 0.0 3.0 29 199
d 1.35576 2 3 tcp 1000 ----- 1 0.0 3.0 29 199
+ 1.356 1 2 cbr 1000 ----- 2 1.0 3.1 157 207
- 1.356 1 2 cbr 1000 ----- 2 1.0 3.1 157 207
  
```

Figura 6.3. Formato e exemplo de conteúdo de um arquivo *trace* [31]

## 6.2 Redes infra-estruturadas no Network Simulator

Feita a apresentação das características gerais do NS, pode-se agora estudar a parte da ferramenta que realmente interessa para este trabalho: a simulação de redes sem-fio. Atualmente, o NS provê suporte para a simulação de dois tipos de redes sem-fio: as redes independentes, comumente chamadas redes *ad-hoc*, e as redes infra-estruturadas, em que há um controle centralizado exercido por uma Estação Rádio-Base (ERB). Esquemas dessas

arquitecturas podem ser vistas na Figura 6.4. Para ambas é possível configurar diversos parâmetros, como tipo de antena, propagação, protocolo de roteamento, entre outros.

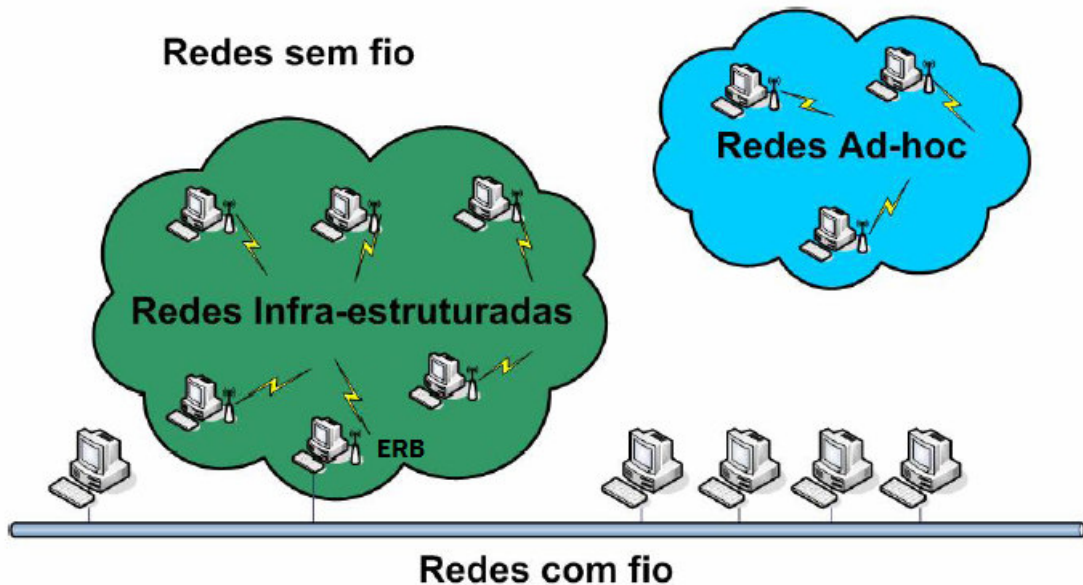


Figura 6.4. Exemplos de redes *ad-hoc* e infra-estruturadas

Redes *ad-hoc* são redes utilizadas geralmente em ocasiões onde não se pode ou não faz sentido instalar uma rede fixa. Essas redes não possuem controle centralizado, e, portanto, não utilizam ERBs. A transmissão se dá nó a nó e os enlaces são formados entre nós próximos quando existe uma necessidade de comunicação.

As redes infra-estruturadas, por sua vez, possuem uma estrutura de comunicação cabeada atuando em conjunto com os nós móveis, e exigem um controle centralizado, que é efetuado pela ERB. Claramente, esse é o esquema adequado à simulação da arquitetura proposta neste trabalho, e por isso é detalhado nesta seção.

Originalmente, o NS permitia apenas a simulação de redes *ad-hoc* ou LANs sem-fio. Mesmo antes do surgimento do padrão IEEE 802.16, isso já representava uma limitação significativa da ferramenta. Não permitia, por exemplo, a simulação de uma topologia com múltiplas LANs sem-fio conectadas através de nós cabeados. Para sanar esse problema, foram feitas extensões ao modelo sem-fio original do NS, que possibilitaram a simulação dos chamados cenários *wired-cum-wireless*, literalmente uma combinação de redes cabeadas e sem-fio – as redes infra-estruturadas.

Um aspecto importante das redes infra-estruturadas é a questão do roteamento. Nos cenários cabeados do NS, a informação de roteamento é gerada com base na conectividade da

topologia, isto é, na forma como os nós estão conectados uns aos outros através dos fios. Nós móveis, por sua vez, encaminham pacotes entre si usando um protocolo de roteamento particular. Então, como fazer o intercâmbio de pacotes entre esses dois tipos de nós? Para isso um nó com atribuições de ERB é criado, desempenhando o papel de *gateway* entre os domínios cabeado e sem-fio. O nó ERB é responsável pela entrega dos pacotes provenientes do domínio sem-fio e destinados a ele.

Para realizar a entrega dos pacotes, a ERB emprega o roteamento hierárquico definido no NS. A cada domínio sem-fio é associado um único endereço de domínio. Todos os pacotes destinados a um nó sem-fio atingem a ERB responsável pelo domínio daquele nó, que então encaminha o pacote ao seu destino. Da mesma forma, pacotes de dados provenientes de um nó móvel para fora do domínio sem-fio são encaminhados para o nó ERB, que saberá como enviá-los ao seu destino no domínio cabeado.

Conceitualmente, as estruturas de um nó ERB e de um nó móvel ordinário são as mesmas. Trata-se do mesmo objeto da biblioteca do NS. A ERB é apenas um nó móvel para o qual é dada a capacidade de rotar pacotes para um domínio cabeado. Isso fica mais claro a seguir, quando é mostrada a forma como nós móveis e ERBs são definidos em um script Otcl. O esquema de um nó móvel definido no NS para as redes infra-estruturadas é apresentado na Figura 6.5. Nela pode ser visto o mecanismo de classificação de endereços, bem como o caminho dos dados através da camada de enlace (*LL*), interface da fila (*IFq*), subcamada MAC (*MAC*), interface de rede (*NetIF*), até chegar ao meio físico de transmissão (*Channel*).

Agora que se conhece a estrutura interna de um nó móvel, é mostrado como os nós de uma rede infra-estruturada são definidos em um script Otcl. Muitos passos da simulação são omitidos, já que a explicação se concentra na criação dos nós móveis, e como a ERB se diferencia dos demais. Como visto, um nó móvel é constituído de diversos componentes de rede, como camada de enlace, fila, subcamada MAC, canal sem fio, antena, modelo de rádio-propagação, protocolo de roteamento *ad-hoc*, etc. A primeira etapa na criação de um nó móvel é a definição desses parâmetros, que é exemplificada a seguir:

```
set opt(chan)      Channel/WirelessChannel    ;# channel type
set opt(prop)      Propagation/TwoRayGround  ;# radio-propagation model
set opt(netif)     Phy/WirelessPhy           ;# network interface type
set opt(mac)       Mac/Tdma                  ;# MAC type
set opt(ifq)       Queue/DropTail/PriQueue   ;# interface queue type
set opt(ll)        LL                        ;# link layer type
```



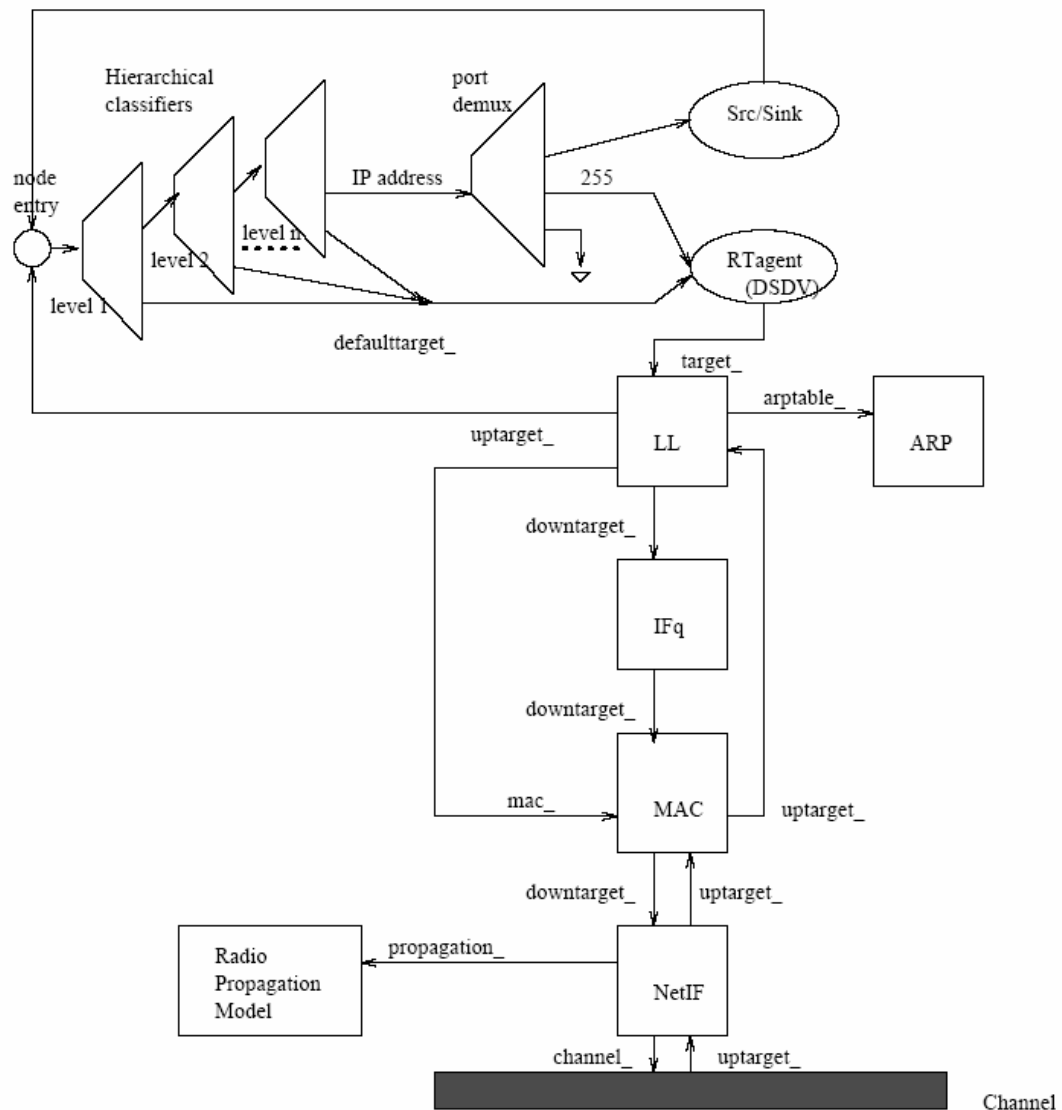


Figura 6.5. Esquema de um nó móvel do NS [32]

```

set opt(ant)      Antenna/OmniAntenna      ;# antenna model
set opt(ifqlen)  50                        ;# max packet in ifq
set opt(nn)      1                          ;# number of mobilenodes
set opt(adhocRouting) DSDV                 ;# routing protocol

```

É interessante destacar que o exemplo apresentado utiliza a camada MAC do tipo TDMA e a camada de enlace padrão definida no NS.

Em seguida é necessário configurar o roteamento hierárquico.

```

$ns_ node-config -addressType hierarchical
AddrParams set domain_num_ 3          ;# number of domains
lappend cluster_num 2 1 1            ;# number of clusters in each domain
AddrParams set cluster_num_ $cluster_num

```

```
lappend eilastlevel 1 1 2 1 ;# number of nodes in each cluster
AddrParams set nodes_num_ $eilastlevel ;# of each domain
```

Neste exemplo, criam-se três domínios (*domain\_num\_*). Determina-se o número de subdomínios em cada domínio (*cluster\_num*). O valor “2 1 1” indica que há dois subdomínios no primeiro domínio e um subdomínio no segundo e terceiro domínios. Em seguida, define-se o número de nós em cada subdomínio (*eilastlevel*). O valor “1 1 2 1” indica que os dois subdomínios do primeiro domínio possuirão 1 nó cada, que o subdomínio do segundo domínio terá 2 nós, e que o subdomínio do terceiro domínio terá 1 nó.

Para se criar as ERBs e os nós móveis, configuram-se os nós de acordo com os parâmetros definidos anteriormente, sendo que para as ERBs deve-se adicionar o *flag wiredRouting* e ajustá-lo como *ON*:

```
$ns_ node-config -mobileIP ON \
    -adhocRouting $opt(adhocRouting) \
    -llType $opt(ll) \
    -macType $opt(mac) \
    -ifqType $opt(ifq) \
    -ifqLen $opt(ifqlen) \
    -antType $opt(ant) \
    -propType $opt(prop) \
    -phyType $opt(netif) \
    -channelType $opt(chan) \
    -topoInstance $topo \
    -wiredRouting ON \
    -agentTrace ON \
    -routerTrace OFF \
    -macTrace OFF
```

Então, cria-se a estação-base através do comando a seguir:

```
set BS [$ns_ node 1.0.0]
```

Para a criação dos demais nós móveis, desativa-se o *flag wiredRouting*:

```
$ns_ node-config -wiredRouting OFF
```

Finalmente, são criados os nós móveis. É preciso informar a cada nó móvel o endereço hierárquico de sua estação-base, que neste exemplo é o *home agent* da arquitetura de IP móvel utilizada.

```

set MH [$ns_ node 1.0.1]
set n(0) $MH
set BSaddress [AddrParams addr2id [$BS node-addr]]
[$MH set regagent_] set home_agent_ $BSaddress

```

O exemplo anterior demonstra a facilidade para se incluir um novo bloco funcional em uma simulação do NS. Neste trabalho, por exemplo, são definidas novas camadas de enlace representando a BS e a SS de uma rede IEEE 802.16. Elas são referenciadas por LL/802\_16\_BS e LL/802\_16\_SS, respectivamente. Também é criado um novo tipo de subcamada MAC, MAC/802\_16. Para utilizar os novos tipos, basta configurar o nó móvel de maneira apropriada. No caso da BS:

```

$ns_ node-config -wiredRouting ON
$ns_ node-config -llType LL/802_16_BS
$ns_ node-config -macType Mac/802_16
set BS [$ns_ node 1.0.0]

```

E para as SSs:

```

$ns_ node-config -wiredRouting OFF
$ns_ node-config -llType LL/802_16_SS
$ns_ node-config -macType Mac/802_16
set MH [$ns_ node 1.0.1]
set n(0) $MH
set BSaddress [AddrParams addr2id [$BS node-addr]]
[$MH set regagent_] set home_agent_ $BSaddress

```

Dessa forma o modelo de simulação de redes IEEE 802.16 apresentado nesta dissertação pode ser introduzido no NS. Portanto, o esforço de trabalho se concentra no desenvolvimento do modelo em C++, e não em sua utilização em Otcl.

### 6.3 Modelo de simulação

O modelo de simulação da arquitetura proposta neste trabalho foi construído a partir de um “Modelo Zero” para simulação do padrão IEEE 802.16 no NS. Mais especificamente, esse Modelo Zero constitui um *framework* de simulação de IEEE 802.16, incorporando objetos componentes do padrão como BS e SS, conexão, fluxo de serviço, classe de serviço, classificador de tráfego, cabeçalhos e mensagens do protocolo; funcionalidades básicas tais como composição do quadro MAC, envio e recebimento de PDUs, temporização das



As classes *LL\_802\_16\_BS* e *LL\_802\_16\_SS* representam, respectivamente, a BS e a SS de IEEE 802.16, e sobrescrevem as funcionalidades da caixa *LL* da Figura 6.5. Elas herdam da classe *LL\_802\_16*, que contém um objeto *Mac802\_16*. Para simplificar a simulação, foram criadas as classes *IPNsObject*, representando a camada de aplicação, e *PHYNsObject*, a camada física. Por isso, *Mac802\_16* não é utilizada. A BS e a SS possuem listas de objetos *ServiceFlow*, cada um deles representando um fluxo de comunicação entre a BS e a SS. Cada *ServiceFlow* está associado a uma conexão (*Connection\_802\_16*) e a um conjunto de parâmetros de serviço (*Service\_802\_16*), e tem seu próprio classificador de tráfego (*Classifier802\_16*) e fragmentador de pacotes (*Fragmenter*). A classe *Fragmenter*, por sua vez, possui um atributo *PacketQueue* (não mostrado na Figura 6.6) que representa uma fila de pacotes no modelo de simulação. Dessa forma, é definida uma fila para cada *ServiceFlow*.

O modelo de simulação ainda define as classes *BS\_SignalingHandler* e *SS\_SignalingHandler*. Pode-se dizer que os objetos *SignalingHandler* são responsáveis por concentrar e controlar todos os fluxos existentes entre a BS e todas as SSs. O objeto *LL\_802\_16\_BS* possui uma lista de *BS\_SignalingHandlers*, cada um deles responsável por manter os *ServiceFlows* da BS com cada SS da rede. Por sua vez, cada *LL\_802\_16\_SS* possui dois atributos com essa finalidade: um do tipo *SS\_SignalingHandler*, que mantém uma lista dos *ServiceFlows* estabelecidos entre aquela SS e a BS, e outro que é um ponteiro para *BS\_SignalingHandler*, apontando para o objeto na lista de *BS\_SignalingHandlers* da BS responsável pelos *ServiceFlows* daquela SS. A Figura 6.7 ilustra graficamente tais relacionamentos para um par BS-SS (são mostrados apenas os tipos dos atributos importantes para o entendimento). Adicionalmente, as classes *BS\_SignalingHandler* e *SS\_SignalingHandler* também realizam a manipulação de mensagens de sinalização, como o processamento das mensagens DL-MAP e UL-MAP, mensagens de requisição de banda etc.

Agora que foram apresentadas as principais classes que compõem o modelo de simulação deste trabalho, é mostrado como essas classes interagem para realizar a transmissão de um pacote de dados da BS para uma SS (transmissão de dados *downlink*). O processo é apresentado nos diagramas de seqüência das Figuras 6.8 e 6.9. Supõe-se que o pacote transmitido é o primeiro de sua classe de serviço (UGS, rtPS, nrtPS ou BE), e assim deve ser estabelecida uma conexão entre a BS e a SS. Esse procedimento é ilustrado na Figura 6.8, e deve ser repetido para todas as classes de serviço, exceto BE, destinadas àquela SS. Para fluxos BE, deve ser criada uma única conexão que controle todos os fluxos para todas as SSs.

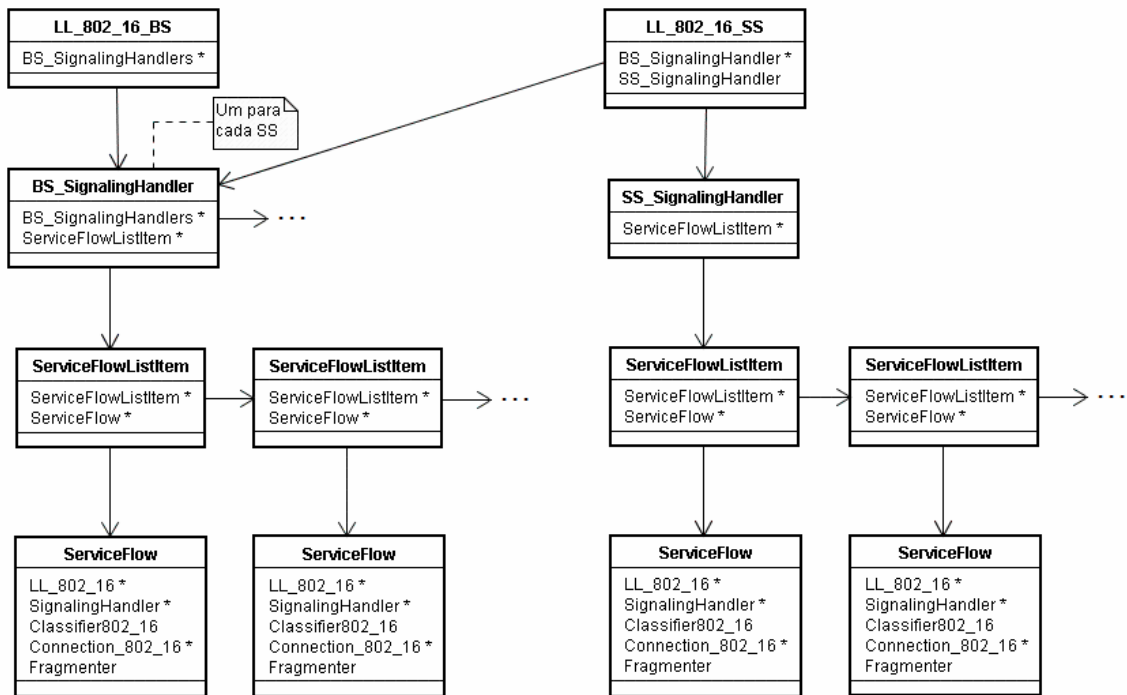


Figura 6.7. Relacionamento entre objetos envolvidos com o controle de fluxos entre BS e SSs

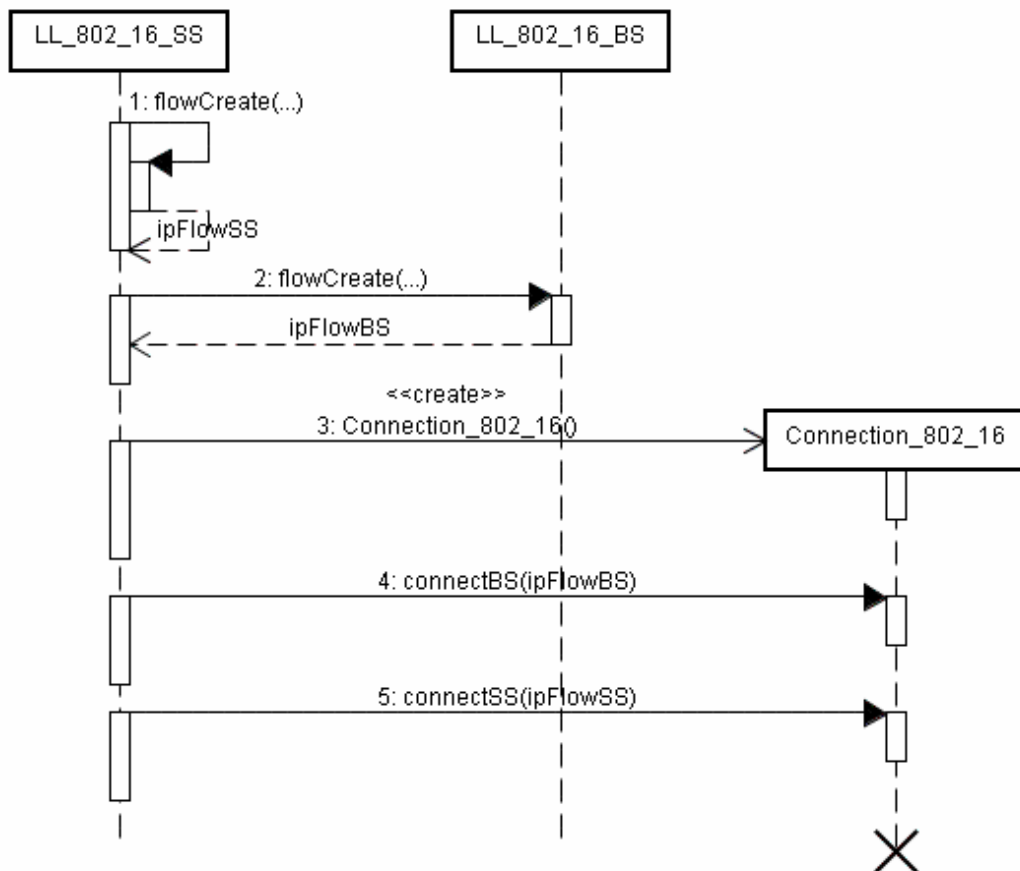


Figura 6.8. Estabelecimento de nova conexão entre a BS e uma SS

Estabelecida a conexão, as entidades podem iniciar a troca de pacotes. A Figura 6.9 ilustra o fluxo de dados na transmissão de um pacote da BS para uma SS.

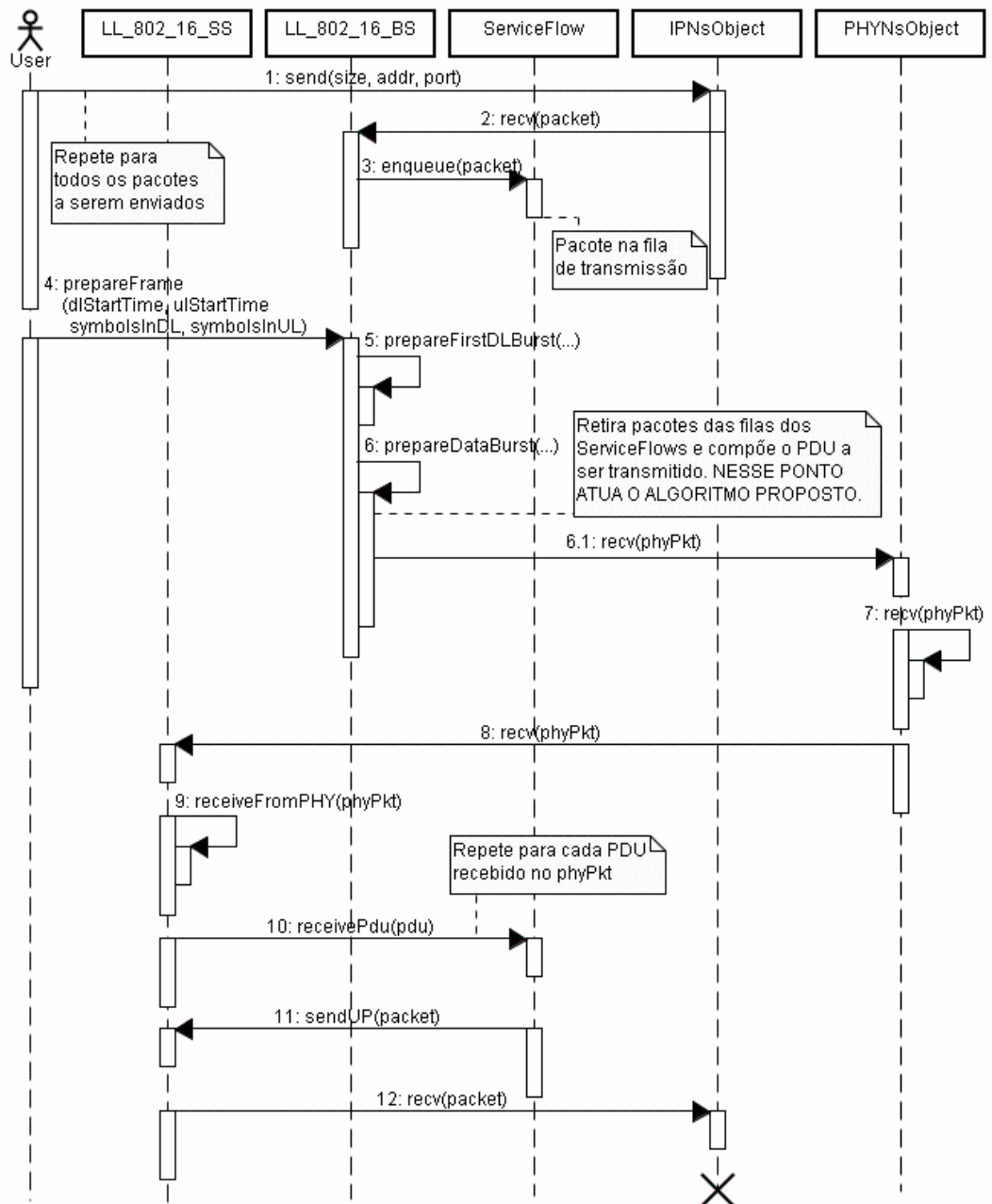


Figura 6.9. Transmissão de um pacote da BS para uma SS

O algoritmo para alocação de banda de *downlink* e escalonamento de pacotes com QoS proposto neste trabalho opera no método *prepareDataBurst()* da classe *LL\_802\_16\_BS*. Seu pseudo-código é apresentado na Figura 6.10.

```

bandwidth_UGS   = WEIGHT_UGS   * burstsize;
bandwidth_rtPS  = WEIGHT_rtPS  * burstsize;
bandwidth_nrtPS = WEIGHT_nrtPS * burstsize;
bandwidth_BE    = WEIGHT_BE    * burstsize;

enquanto (há banda disponível && há dados a serem transmitidos) faça
para cada classe de serviço k
{
    enquanto (há banda bandwidth_k da classe k && há dados a serem
transmitidos da classe k) faça para cada ServiceFlow da classe k
    {
        retire o primeiro pacote da fila e adicione à PDU de transmissão;
    }
    adicione a largura de banda restante à banda disponível para a
próxima classe de serviço a ser atendida;
}

```

Figura 6.10. Algoritmo de QoS proposto

Inicialmente, a largura de banda *burstsize* disponível para o subquadro de *downlink* sendo montado é dividida entre as classes de serviço UGS, rtPS, nrtPS e BE. Em seguida, o algoritmo opera nos dois *loops* aninhados. No *loop* externo, enquanto houver banda de *downlink* total e dados a serem transmitidos, o algoritmo atua circularmente sobre as quatro classes de serviço definidas. A classe UGS é atendida primeiro, seguida por rtPS, nrtPS e, por último, BE. No *loop* interno, o algoritmo opera, também de maneira circular, sobre os *ServiceFlows* que compõem a classe de serviço em questão. Enquanto houver banda alocada àquela classe de serviço e dados daquela classe de serviço a serem transmitidos, o primeiro pacote da fila do *ServiceFlow* é retirado e adicionado à PDU de transmissão. Finalmente, se todos os dados daquela classe de serviço forem transmitidos e ainda restar banda alocada a ela, essa banda é transferida à classe seguinte, circularmente (a banda restante da classe BE, caso haja, é transferida para a classe UGS). Dessa forma, o algoritmo garante que o subquadro de *downlink* só será transmitido com espaço vazio se não houver mais *nenhum* pacote de *nenhuma* classe de serviço aguardando transmissão.

É importante destacar a flexibilidade oferecida pelo algoritmo para diferentes cenários de operação. Conforme a demanda de tráfego de cada classe de serviço, as constantes *WEIGHT\_UGS*, *WEIGHT\_rtPS*, *WEIGHT\_nrtPS* e *WEIGHT\_BE* podem ser alteradas para utilizar a largura de banda da melhor maneira possível. Em uma rede dedicada à telefonia IP, por exemplo, pode haver muito tráfego UGS (transmissão de voz), algum tráfego nrtPS



(controle da rede) e pouco ou nenhum tráfego rtPS e BE. Assim, os valores das constantes devem ser escolhidos de maneira a otimizar o desempenho da rede para esse ambiente.

Como pôde ser visto, o algoritmo proposto é conceitualmente simples e, por isso mesmo, facilmente adaptável a diferentes cenários. Se for implementado de maneira eficiente, produz resultados satisfatórios no tocante à QoS oferecida às aplicações, com baixo *overhead* de processamento para os dispositivos de rede. Os resultados dos testes computacionais apresentados no próximo capítulo comprovam que tais objetivos foram alcançados para a implementação desenvolvida neste trabalho.

## Capítulo 7

### 7 Resultados Computacionais

Terminada a construção do modelo de simulação, passou-se à etapa final do desenvolvimento deste trabalho: a medição do desempenho do modelo proposto. Para isso, foram testados dois cenários de operação. Em cada um deles, a arquitetura proposta foi submetida a taxas de dados distintas para cada classe de serviço, e foram medidos os parâmetros de desempenho para aquele tráfego.

Desde o início do desenvolvimento deste trabalho, havia a preocupação em se construir um modelo que refletisse de fato as condições reais de operação de equipamentos baseados no padrão IEEE 802.16. Esse objetivo foi alcançado, o que pode ser visto nos valores utilizados para os diversos parâmetros do modelo, como duração do quadro MAC, duração de um símbolo, etc. Tais escolhas são justificadas ao longo deste capítulo.

Os dois cenários de simulação propostos são apresentados simplesmente como exercício de funcionamento do modelo de simulação descrito no capítulo anterior. A simulação realizada tem por objetivos: desenvolver sensibilidade sobre o funcionamento do modelo proposto; garantir que a arquitetura e o algoritmo propostos são implementáveis; comprovar *qualitativamente* o funcionamento do algoritmo proposto, sem compará-lo com outras abordagens ou resultados reais; restringir as conclusões apenas aos cenários propostos.

#### 7.1 Estrutura geral dos testes realizados

Para a realização dos testes de desempenho da arquitetura proposta, foi concebida uma rede IEEE 802.16 composta por uma BS que se comunica com quatro SSs. Como se pretendia testar especificamente o funcionamento do algoritmo para alocação de banda de *downlink* e escalonamento de pacotes, foi considerado apenas o tráfego *downlink*. Ou seja, o modelo considera apenas o tráfego que flui da BS para as SSs. O esquema da rede simulada é ilustrado na Figura 7.1.

Com o objetivo de simular o tráfego de dados na rede, foram definidas duas conexões de aplicação entre a BS e cada uma das quatro SSs, num total de oito conexões de aplicação simuladas para a rede. As conexões simuladas foram distribuídas entre as SSs como mostra a Tabela 7.1 a seguir.

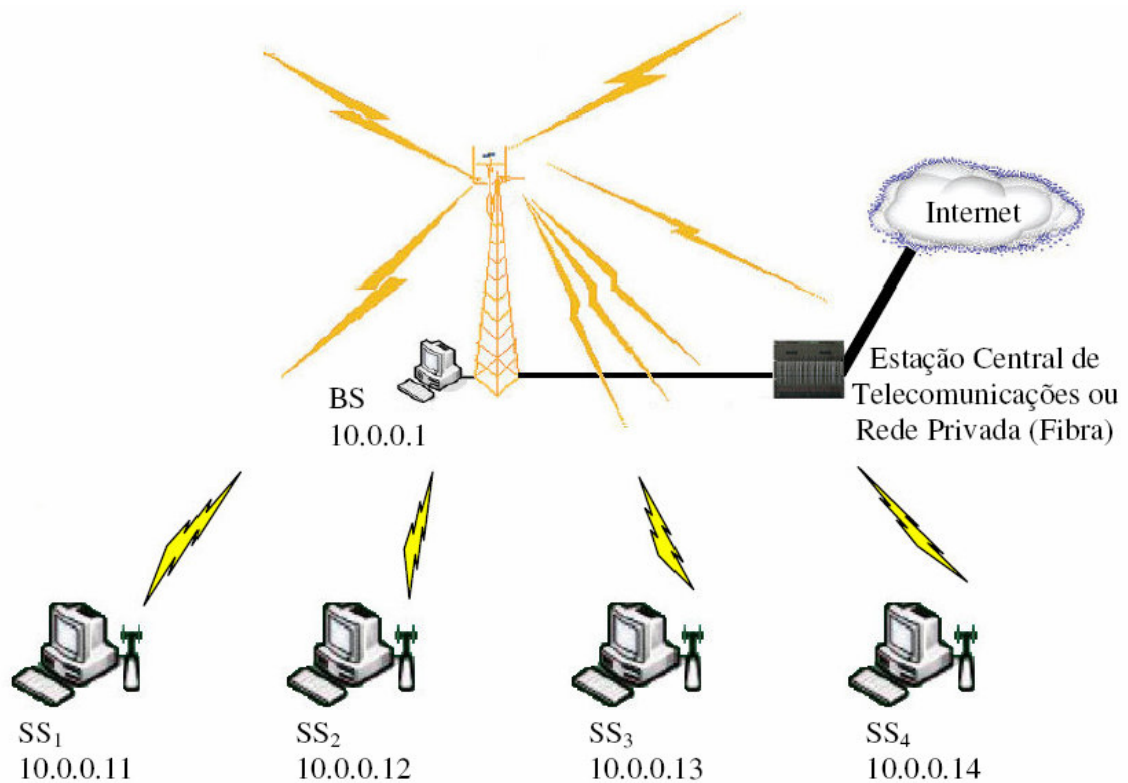


Figura 7.1. Esquema da rede IEEE 802.16 simulada

A associação entre aplicação simulada/protocolo e sua classe de serviço correspondente no padrão IEEE 802.16 foi feita como proposto em [14] [22] [33] [34], de acordo com as necessidades das aplicações em termos de largura de banda, atraso, *jitter*, periodicidade de transmissão, etc.

Estação origem	Estação destino	Aplicação simulada	Protocolo	Porta	Classe de Serviço IEEE 802.16
BS	SS <sub>1</sub>	MPEG Streaming Audio	RTSP*	554	rtPS
BS	SS <sub>1</sub>	Navegação Web	HTTP	80	BE
BS	SS <sub>2</sub>	VoIP	SIP*	5060	UGS
BS	SS <sub>2</sub>	Transferência de arquivo	FTP	21	nrtPS
BS	SS <sub>3</sub>	MPEG Streaming Video	RTSP*	554	rtPS
BS	SS <sub>3</sub>	Transferência de arquivo	FTP	21	nrtPS
BS	SS <sub>4</sub>	VoIP	SIP*	5060	UGS
BS	SS <sub>4</sub>	Terminal remoto	Telnet	23	BE

\* Os protocolos *Real Time Streaming Protocol* (RTSP) e *Session Initiation Protocol* (SIP) realizam o estabelecimento e controle do fluxo de dados e operam em conjunto com o *Real-time Transport Protocol* (RTP), que transporta os dados.

Tabela 7.1. Conexões de aplicação na rede IEEE 802.16 simulada

Como foi visto no capítulo 5, o esquema de filas adotado na BS define, para cada SS, uma fila com prioridade para cada classe de serviço diferente de BE, e uma única fila FIFO

para todos os tráfegos BE de todas as SSs (seção 5.3). No capítulo 6 demonstrou-se que cada *ServiceFlow* está associado a exatamente uma fila de pacotes (seção 6.3). Diante disso, o mapeamento das conexões de aplicação descritas na Tabela 7.1 para *ServiceFlows* do modelo de simulação dá origem, na BS, ao esquema de dados mostrado na Figura 7.2. Na simulação, os objetos *ServiceFlow* da figura compõem uma lista encadeada apontada por um objeto *BS\_SignalingHandler*, que por sua vez está vinculado a um objeto *LL\_802\_16\_BS*, a BS da simulação (ver Figura 6.7).

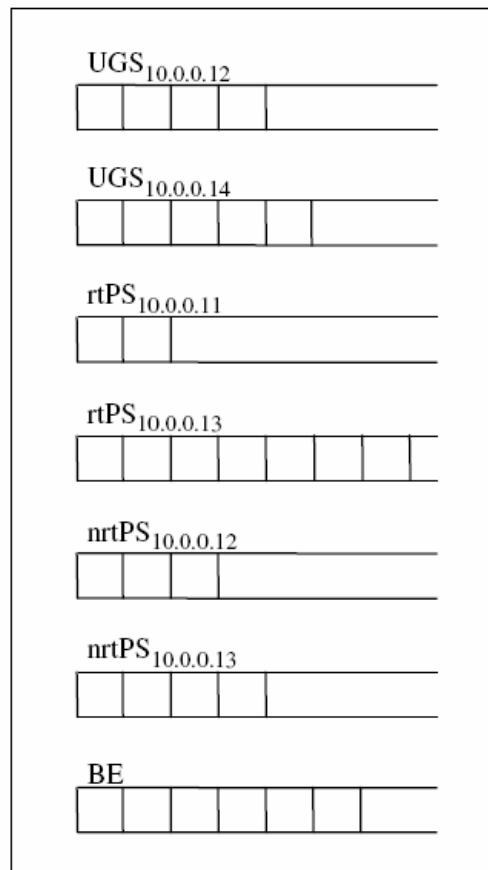


Figura 7.2. *ServiceFlows* gerados na simulação a partir das conexões da Tabela 7.1

Para o entendimento do modelo proposto, é interessante que seja feita uma explanação final sobre o mapeamento de conexões da camada de aplicação para *ServiceFlows* do modelo de simulação. Supondo, por exemplo, que o usuário da SS<sub>2</sub> estabeleça uma nova conexão para transferência de outro arquivo, essa nova conexão será mapeada para o mesmo *ServiceFlow* nrtPS que cuida da transferência do primeiro arquivo, em vez de ser criado um novo *ServiceFlow* nrtPS. Entretanto, se o mesmo usuário resolver assistir a um vídeo através de

*streaming*, um novo *ServiceFlow* será obrigatoriamente criado, pois não há, no momento, nenhum *ServiceFlow* manipulando fluxos do tipo rtPS para a SS<sub>2</sub>.

Como mencionado anteriormente, buscou-se desde o início desenvolver um modelo de simulação que refletisse equipamentos reais relacionados ao padrão IEEE 802.16, e que pudesse produzir resultados reais. Para satisfazer esse objetivo, foram atribuídos aos parâmetros do modelo valores reais de operação, compatíveis com aqueles suportados pela primeira geração de equipamentos IEEE 802.16 lançada no mercado [35] [36].

Neste trabalho, cada quadro MAC tem duração *frameDuration* = 10 ms, que é um dos valores permitidos no padrão IEEE 802.16 [22] para a camada física baseada em OFDM. Naturalmente, este valor define o número de quadros por segundo:  $(1 / \textit{frameDuration}) = 100$ .

A unidade de transmissão de dados da camada física OFDM é chamada *símbolo*. No modelo de simulação, a duração de cada símbolo físico é *symbolDuration* = 43.31 μs, e o modelo suporta 7 diferentes quantidades de bytes em um símbolo: 12, 24, 36, 48, 72, 96 ou 108 bytes / símbolo. Cada um desses valores corresponde a um tipo de modulação (BPSK, QPSK, QAM 16 ou QAM 64) combinado com um tamanho de canal (3.5 MHz ou 1.75 MHz). Para este trabalho, foi utilizado em todas as simulações o valor de *symbolSize* = 48 bytes / símbolo, relativo a um canal de 3.5 MHz com modulação QAM 16  $\frac{3}{4}$  [37].

A partir dos valores utilizados para *frameDuration*, *symbolDuration* e *symbolSize*, é possível determinar a largura de banda total (*downlink* + *uplink*) oferecida pelo modelo de simulação:

$$(\textit{frameDuration} = 10 \text{ ms}) / (\textit{symbolDuration} = 43.31 \text{ } \mu\text{s}) = 230.8936 \text{ símbolos / quadro}$$

$$(230.8936 \text{ símbolos / quadro}) \times (100 \text{ quadros / s}) = 23\ 089.36 \text{ símbolos / s}$$

$$(23\ 089.36 \text{ símbolos / s}) \times (\textit{symbolSize} = 48 \text{ bytes / símbolo}) = 1\ 108\ 289.08 \text{ bytes / s}$$

$$(1\ 108\ 289.08 \text{ bytes / s}) \times (8 \text{ bits / byte}) =$$

$$= 8\ 866\ 312.63 \text{ bps}$$

$$= 8\ 658.51 \text{ Kbps}$$

$$= 8.46 \text{ Mbps}$$

Cabe observar que esta é a banda total permitida pelo canal, e não a banda disponível ao tráfego. Há que se considerar a sobrecarga (*overhead*) da camada MAC, incluindo

organização do quadro e intervalos para *ranging* e requisição de banda por contenção. Neste trabalho, porém, tal valor foi considerado como a banda oferecida de fato para o tráfego útil.

Assim, chega-se a um importante diferencial deste trabalho: trata-se de um valor de largura de banda oferecido de fato pela primeira geração de equipamentos compatíveis com o padrão IEEE 802.16, o que permite simulações muito mais realistas. De acordo com a pesquisa bibliográfica realizada, os trabalhos publicados até então consideram em suas simulações larguras de banda fictícias, como é o caso de [13], que utiliza o valor de 50 Mbps, e [14], que usa uma largura de banda de 11 Mbps, por simular sua camada MAC de IEEE 802.16 sobre a camada física do padrão IEEE 802.11.

Numa abordagem bastante simplificada, optou-se por dividir a largura de banda disponível igualmente entre *downlink* e *uplink*. Isso significa que, nas simulações realizadas, o bloco *BS Frame Partitioner* da arquitetura proposta sempre divide o quadro MAC igualmente entre os subquadros de *downlink* e *uplink*. Assim, a banda de *downlink* considerada nas simulações é de 4.23 Mbps. Nas simulações, os tráfegos de aplicação foram projetados para demandarem, em média, 90% da banda de *downlink* disponível (3.80 Mbps), o que resulta numa alta utilização do canal de transmissão.

Para garantir a largura de banda mínima concedida a cada classe de serviço, são atribuídos às constantes do algoritmo os valores  $WEIGHT\_UGS = 0.4$ ,  $WEIGHT\_rtPS = 0.3$ ,  $WEIGHT\_nrtPS = 0.2$  e  $WEIGHT\_BE = 0.1$ , escolhidos arbitrariamente. Assim, é reservada pelo menos 40% da banda de *downlink* para os fluxos da classe de serviço UGS, 30% para os fluxos da classe de serviço rtPS, 20% para os fluxos nrtPS e 10% para todos os fluxos BE.

Nos dois cenários simulados, são gerados tráfegos UGS e rtPS periódicos, tráfegos nrtPS com periodicidade variável, e tráfegos BE pseudo-aleatórios. Todos os pacotes têm tamanhos variáveis, exceto para os tráfegos UGS. A quantidade média de dados gerada pelos tráfegos de cada classe de serviço varia de um cenário para outro, como será visto, mas a soma do tráfego médio gerado será sempre igual a 3.80 Mbps. O detalhamento da composição de cada tráfego para cada cenário é feito no Apêndice deste trabalho.

Em ambos os cenários, o intervalo de simulação foi de 60 s, durante o qual pacotes de dados foram gerados pelas conexões de aplicação e encaminhados da BS para a SS correspondente. Para avaliar o desempenho do modelo proposto, foram medidos três parâmetros da rede simulada, para cada classe de serviço: atraso médio, utilização média de banda e tamanho médio das filas.

O *atraso médio*  $D_{CS}$  representa o tempo médio de fila dos pacotes de cada classe de serviço durante a simulação, e é dado pela razão entre a soma do atraso individual  $d^{CS}$  de cada pacote da classe de serviço  $CS$  transmitido e o número total de pacotes  $N_{CS}$  transmitidos pelas conexões da classe de serviço  $CS$ , como ilustrado pela expressão a seguir.

$$D_{CS} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{CS}} d_i^{CS}}{N_{CS}}$$

No caso de haver fragmentação de um pacote, este continua na fila do *ServiceFlow* até que seu último fragmento seja transmitido, e assim seu tempo de fila individual é contabilizado até aquele momento.

A *utilização média de banda*  $U_{CS}$  permite visualizar a forma como a largura de banda de *downlink* disponível foi distribuída pelo algoritmo implementado entre as quatro classes de serviço. Para cada intervalo de 1 s, é computada a porcentagem média de banda utilizada por cada classe de serviço, fazendo-se a razão entre a quantidade total de dados  $BW_{CS}$  transmitida pelas conexões da classe de serviço  $CS$  e a largura de banda total disponível para transmissão, 4.23 Mb.

$$U_{CS} = \frac{BW_{CS}}{4.23M}$$

De acordo com a concepção dos tráfegos simulados em ambos os cenários, deve-se ter, na média em cada segundo:

$$U_{UGS} + U_{rtPS} + U_{nrPS} + U_{BE} = 90\% \times 4.23 \text{ Mb} = 3.80 \text{ Mb}$$

Finalmente, o *tamanho médio das filas*  $Q_{CS}$  fornece o número médio de pacotes nas filas de *downlink* da BS a cada intervalo de 1 s, para cada classe de serviço. Para obter esse valor, basta somar o tamanho  $q^{CS}$  das filas dos *ServiceFlows* da classe de serviço  $CS$  após a transmissão de cada quadro MAC, durante cada segundo, e então dividir essa soma por 100, que é o número de quadros por segundo.

$$Q_{CS} = \frac{\sum_{i=1}^{100} q_i^{CS}}{100}$$

Para reduzir a complexidade do modelo de simulação, são assumidas as seguintes condições: os atrasos de propagação são ignorados; o canal é livre de erros (cada pacote transmitido é recebido corretamente em seu destino); não há ocorrência de colisões.

## 7.2 Cenário de teste 1

O Cenário 1 representa uma situação não-desafiadora para o algoritmo, dados os tráfegos gerados pelos fluxos de cada classe de serviço mostrados na Tabela 7.2. Esses tráfegos estão alinhados com a banda garantida a cada classe de serviço pelas constantes  $WEIGHT_{..}$ .

Classe de Serviço	Porcentagem do tráfego total gerado
UGS	40%
rtPS	30%
nrtPS	20%
BE	10%
Total = 3.80 Mbps (90% × 4.23 Mbps)	

Tabela 7.2. Distribuição da geração de tráfego entre as classes de serviço no Cenário 1

Como esperado, os resultados produzidos foram satisfatórios, o que é comprovado pelos valores de desempenho medidos. O atraso médio para cada classe de serviço é apresentado na Tabela 7.3. Por se utilizar uma média, as rajadas de transmissão dos fluxos BE são compensadas pelos instantes em que não há transmissão dessa classe, o que produz um valor de atraso médio menor do que aquele das classes rtPS e nrtPS, e “mascara” o atraso máximo daquela classe, possivelmente maior.

Classe de Serviço (CS)	Atraso médio ( $D_{cs}$ )
UGS	0
rtPS	26.73 ms
nrtPS	35.77 ms
BE	26.48 ms

Tabela 7.3. Atraso médio para cada classe de serviço no Cenário 1

A utilização média de banda de *downlink*, apresentada na Figura 7.3, sugere que o algoritmo de QoS proposto não teve dificuldade para distribuir a largura de banda disponível entre as classes de serviço, o que é inferido a partir do padrão aproximadamente linear do gráfico de utilização de banda de cada classe de serviço (exatamente linear no caso de UGS). Esse padrão segue o tráfego médio gerado por cada classe de serviço no Cenário 1.



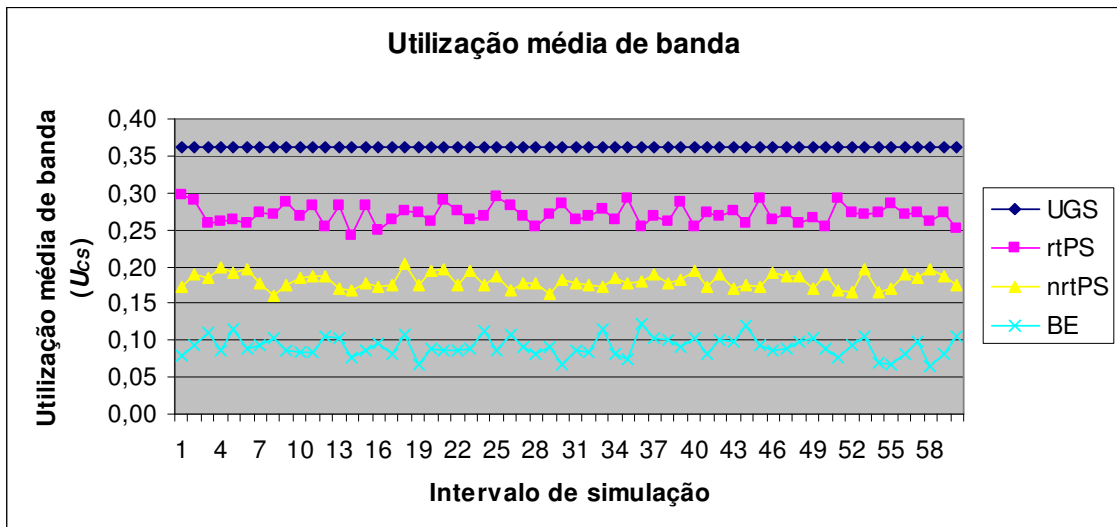


Figura 7.3. Utilização média de banda para cada classe de serviço no Cenário 1

O último parâmetro de desempenho medido, tamanho médio das filas, vem confirmar o sucesso do algoritmo proposto no Cenário 1. Os resultados são apresentados na Figura 7.4. Como pode ser visto no gráfico, não há formação de fila para os tráfegos UGS, o que significa que todo pacote UGS que entra na BS é imediatamente transmitido (confirmando o dado da Tabela 7.3). Além disso, há em média um único pacote aguardando transmissão nas filas rtPS e nrtPS, e a maior variação é observada na classe de serviço BE, como esperado.

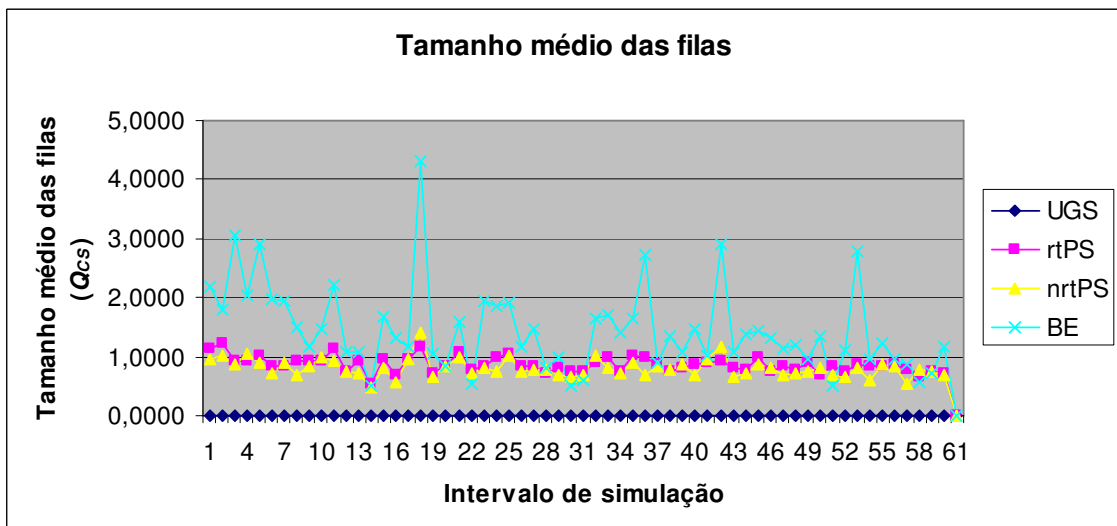


Figura 7.4. Tamanho médio das filas para cada classe de serviço no Cenário 1

O Cenário 1 mostra que o algoritmo proposto funciona bem e confere robustez ao modelo: apesar das altas taxas de dados das classes de serviço com maior prioridade, todos os fluxos foram atendidos satisfatoriamente, inclusive os de menor prioridade, como nrtPS e,

principalmente, BE. Entretanto, para validar o modelo proposto, é necessário submetê-lo a um cenário mais desafiador. Isso é feito na seção a seguir.

### 7.3 Cenário de teste 2

O objetivo do Cenário 2 era submeter o algoritmo proposto a uma situação de tráfego que exigisse uma abordagem não-trivial de distribuição de largura de banda de *downlink*. Para isso, foi implementada a divisão entre os tráfegos gerados por cada classe de serviço mostrada na Tabela 7.4. Nessa tabela nota-se que os tráfegos BE, cuja largura de banda garantida pelo algoritmo é de 10%, são responsáveis por 32.5%, em média, do tráfego total de *downlink*. Como os tráfegos UGS, rtPS e nrtPS não utilizam toda a sua banda garantida, a largura de banda excedente deve ser transferida para a classe de serviço BE. Como é visto adiante, isso de fato acontece.

Classe de Serviço	Porcentagem do tráfego total gerado
UGS	22.5%
rtPS	22.5%
nrtPS	22.5%
BE	32.5%
Total = 3.80 Mbps (90% × 4.23 Mbps)	

Tabela 7.4. Distribuição da geração de tráfego entre as classes de serviço no Cenário 2

A Tabela 7.5 lista o atraso médio dos pacotes de cada classe de serviço. Os valores apurados estão de acordo com a especificação do padrão IEEE 802.16 para atender as aplicações de usuário típicas de cada classe de serviço:

$$D_{UGS} < D_{rtPS} < D_{nrtPS} < D_{BE}$$

Classe de Serviço (CS)	Atraso médio ( $D_{CS}$ )
UGS	0
rtPS	9.86 ms
nrtPS	18.29 ms
BE	80.05 ms

Tabela 7.5. Atraso médio para cada classe de serviço no Cenário 2

A Figura 7.5 exibe a utilização média de banda de *downlink* para cada classe de serviço. Conforme era desejado, os tráfegos UGS, rtPS e nrtPS usam a banda a que têm direito e transferem seus excedentes para a classe de serviço BE, que em alguns momentos chega a

utilizar 35% da largura de banda disponível para o *downlink*. Isso evita que ocorra o problema conhecido como *starvation*, em que os tráfegos ficam esperando eternamente por um atendimento que jamais chega. O algoritmo proposto atuou de maneira bastante eficaz na distribuição de banda.

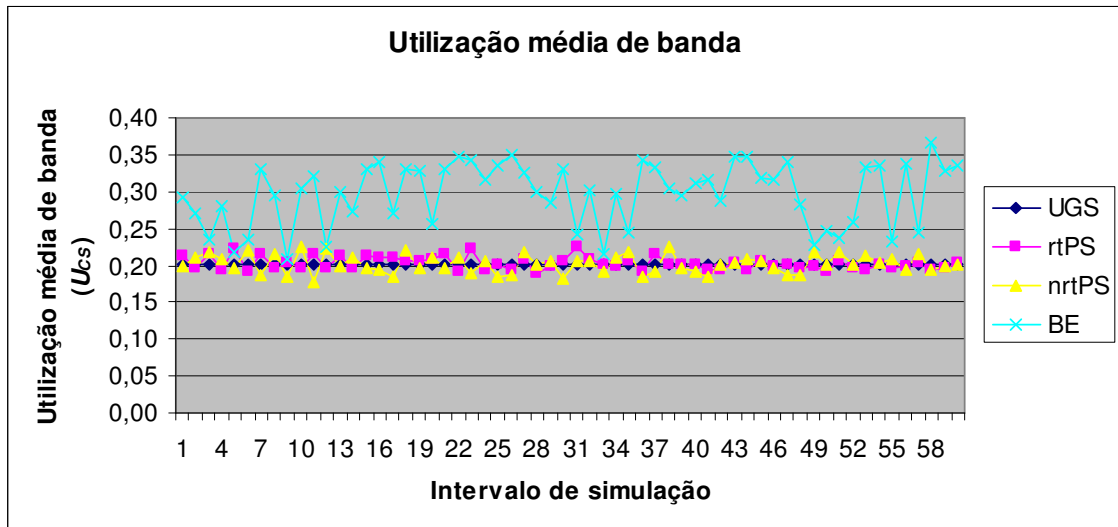


Figura 7.5. Utilização média de banda para cada classe de serviço no Cenário 2

O tamanho médio das filas para cada classe de serviço é apresentado na Figura 7.6. Nela vê-se que nunca há mais do que um pacote nas filas dos *ServiceFlows* das classes de serviço UGS, rtPS e nrtPS. Isso se explica pelo fato de essas classes de serviço gerarem, na média, uma quantidade de tráfego menor do que a mínima largura de banda que lhes é garantida pelo algoritmo de alocação. A classe de serviço BE, que utiliza a banda não usada pelas outras classes de serviço, apresenta gráfico com alguns picos de pacotes na fila de transmissão, mas que não chegam a ser críticos. Eles são causados pelas rajadas de dados a que as aplicações BE usualmente estão sujeitas, e que por isso foram simuladas pelas funções de geração de tráfego implementadas.

O Cenário 2 ilustra uma situação de transmissão crítica: a classe de serviço BE, que tem a menor prioridade de transmissão, possui o maior tráfego médio. Ainda assim, os resultados da simulação mostram que seus fluxos foram atendidos adequadamente, e sem comprometer a transmissão dos tráfegos de maior prioridade das outras classes de serviço. Mesmo para esta situação de pior caso, os pacotes BE tiveram um tempo médio de enfileiramento de aproximadamente 80 ms, valor aceitável em aplicações reais.

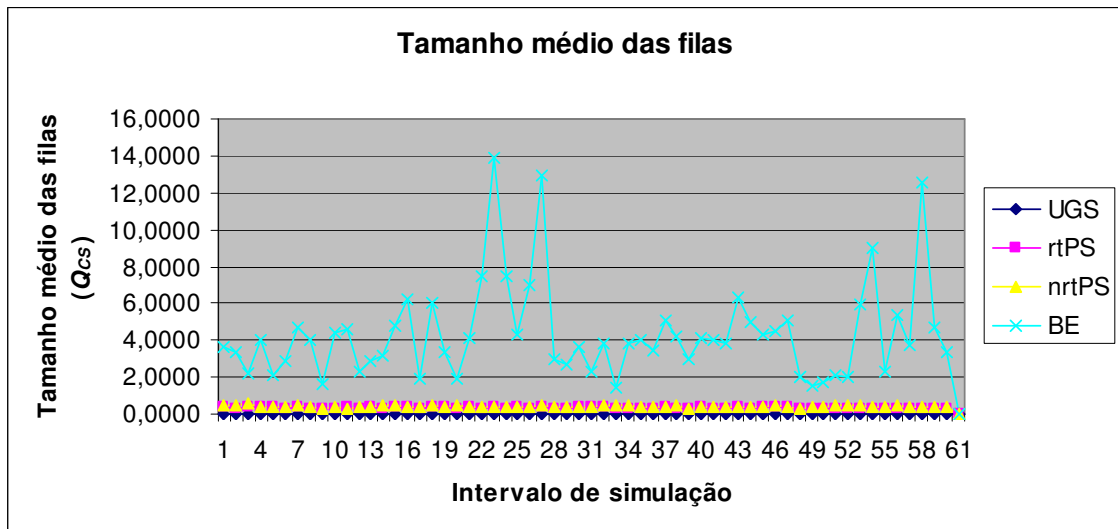


Figura 7.6. Tamanho médio das filas para cada classe de serviço no Cenário 2

## 7.4 Conclusão

De maneira geral, o algoritmo proposto saiu-se bem em ambos os cenários de simulação, considerando-se os objetivos enumerados no início do capítulo. Os atrasos médios dos pacotes nas filas de transmissão são toleráveis e coerentes, a largura de banda foi alocada entre as classes de serviço de maneira eficaz e o tamanho médio das filas manteve-se sempre sob controle.

A análise conjunta dos resultados obtidos nos Cenários 1 e 2 evidencia a flexibilidade do algoritmo proposto: ele é capaz de operar de forma satisfatória em situações opostas como as que foram simuladas, em que, em alguns momentos, os tráfegos de alta prioridade são maioria e, em outros, há maior necessidade de transmissão de tráfegos de baixa prioridade. Tudo isso é feito sem comprometer a qualidade de atendimento que cada classe de serviço espera receber, e sem a necessidade de ajustes externos: o algoritmo é *auto-ajustável*.

## Capítulo 8

### 8 Conclusão

Este trabalho apresentou uma proposta de arquitetura de QoS para a camada MAC do padrão IEEE 802.16 e um algoritmo de QoS para alocação de banda de *downlink* e escalonamento de pacotes nas filas de *downlink* da BS. A arquitetura proposta foi baseada em trabalhos publicados mas incompletos em alguns aspectos, e que por isso poderiam ser estendidos e aprofundados.

Antes de iniciar o desenvolvimento da arquitetura proposta, foi preciso dedicar algum tempo ao estudo do padrão IEEE 802.16. Essa tarefa foi especialmente difícil porque, à época do início deste trabalho, o padrão era algo ainda novo e carente de estudos mais aprofundados.

Desde o início, este trabalho tinha como objetivo gerar conhecimento que estivesse alinhado com as necessidades do mundo real, e cujos resultados produzidos pudessem ser aplicados a problemas reais. Esses objetivos nortearam todo o desenvolvimento do trabalho, e acredita-se que foram alcançados. As simulações realizadas sugerem que a arquitetura proposta pode ser desenvolvida e aplicada a qualquer equipamento de rede compatível com o padrão IEEE 802.16.

Os parâmetros de desempenho do modelo obtidos nas simulações realizadas demonstram o sucesso da arquitetura proposta para os objetivos pretendidos neste trabalho. Aqui, as características da arquitetura proposta são comparadas não com aquelas apresentadas em outros trabalhos, mas são confrontadas com as exigências qualitativas do próprio padrão IEEE 802.16 que, acredita-se, foram atendidas.

Os principais diferenciais deste trabalho em relação às propostas semelhantes são:

- Os trabalhos até então consideram, em suas simulações, larguras de banda hipotéticas (11 Mbps, 50 Mbps, etc). O modelo de simulação desenvolvido neste trabalho usa valores reais para seus parâmetros, valores estes utilizados por equipamentos de mercado da primeira geração de redes baseadas em IEEE 802.16. Os valores considerados para a duração do quadro MAC, a duração de cada símbolo OFDM e o número de bytes transportados por cada símbolo são os valores adotados por esses

equipamentos. Com isso, o modelo de simulação proposto permite simular sistemas mais realistas, e produz resultados mais confiáveis;

- A implementação de fragmentação de pacotes no modelo de simulação é inédita na literatura, e foi fundamental para os bons resultados de utilização de largura de banda medidos na simulação. Sua adaptação para equipamentos reais é direta;
- A arquitetura proposta é bastante flexível e adaptável. Por exemplo, em ambientes com características conhecidas e pouco variáveis, o algoritmo de QoS proposto pode ser adaptado através da alteração dos valores de algumas constantes, para que a largura de banda disponível seja usada de forma mais eficiente.

Como resultado desta dissertação, foi produzido um artigo, “*QoS Architecture and Simulation Modeling to Support Distributed Multimedia Services in the IEEE 802.16d Standard*”. O artigo foi submetido ao *Wireless Networking Symposium* do *IEEE GLOBECOM 2007 – Global Communications Conference*, a ser realizado em Washington D.C., Estados Unidos, em novembro de 2007. O trabalho está sob avaliação para aceitação.

Dentro do grupo de estudos sobre WiMAX da UFES, a dissertação desenvolvida já gerou novos trabalhos. Em seu projeto de graduação defendido em fevereiro de 2007, “*Desenvolvimento do módulo de Requisição de Banda do padrão IEEE 802.16*”, o aluno Gondiberto Haase de Carvalho estende a arquitetura de QoS apresentada através da implementação de mecanismos de requisição de banda por parte da SS e atendimento das requisições na BS. Também é utilizado o modelo de simulação proposto para os testes realizados.

Finalmente, este trabalho ainda apresenta pontos que podem ser estendidos e investigados em maior profundidade, mas os objetivos traçados inicialmente e enumerados no capítulo 1 foram alcançados.

## **8.1 Trabalhos futuros**

Espera-se que este trabalho possa auxiliar e estimular o desenvolvimento de novos trabalhos sobre o padrão IEEE 802.16. De fato, o modelo de simulação utilizado foi planejado para permitir extensões futuras no sentido de tornar-se cada vez mais completo e fiel ao padrão.

Dentre os trabalhos futuros relacionados a este, pode-se citar:

- Implementar os demais blocos da arquitetura proposta;
- Aprimorar a criação de fluxos de serviço, de acordo com a seção 6.3.14.7 do padrão IEEE 802.16 [22], para adequar o processo à especificação do padrão;
- Idem para o estabelecimento de uma conexão de aplicação. Estudar maneiras de a camada MAC negociar e atribuir parâmetros de QoS a uma aplicação, na fase de estabelecimento da conexão;
- Estudar a geração e manipulação das mensagens de controle especificadas no padrão IEEE 802.16;
- Introduzir no modelo de simulação o mecanismo de requisição de banda por contenção;
- Investigar os benefícios que podem ser obtidos através da multiplexação espacial, implementada com o uso de múltiplas antenas cobrindo regiões isoladas do espaço;
- Traçar um estudo completo acerca do modelo de rádio de IEEE 802.16, suas implicações sobre a operação da camada MAC e como ele pode ser melhorado para otimizar as transmissões no nível de enlace e permitir taxas de dados mais elevadas;
- Incorporar à arquitetura as eventuais inovações introduzidas no padrão IEEE 802.16, a fim de manter a proposta sempre atualizada. Dentre essas inovações, a mais imediata é o suporte à mobilidade introduzido pela versão IEEE 802.16e do padrão, que abre um leque bastante amplo de novos pontos de pesquisa.

## ***Referências Bibliográficas***

- [1] Nair, G. et al. “IEEE 802.16 Medium Access Control and Service Provisioning”. *Intel Technology Journal*, agosto de 2004, 213-228.
- [2] Fujitsu Microelectronics America, Inc. “WiMAX Technology and Deployment for Last-Mile Wireless Broadband and Backhaul Applications”. *White Paper*, agosto de 2004.
- [3] Fujitsu Microelectronics America, Inc. “RF Spectrum Utilization in WiMAX”. *White Paper*, novembro de 2004.
- [4] Intel Corporation. “Understanding WiMAX and 3G for Portable/Mobile Broadband Wireless”. *Technical White Paper*, dezembro de 2004.
- [5] Eklund, C., Marks, R. B., Stanwood, K. L., Wang, S. “IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN Air Interface for Broadband Wireless Access”. *IEEE Communications Magazine*, junho de 2002, 98-107.
- [6] Hoymann, C., Ibing, A., Forkel, I. “MAC Layer Concepts to Support Space Division Multiple Access in Wireless Metropolitan Area Networks (IEEE 802.16a)”. *10th Wireless World Research Forum (WWRF) Meeting*, outubro de 2003.
- [7] Leung, K. K., Mukherjee, S., Rittenhouse, G. E. “Mobility Support for IEEE 802.16d Wireless Networks”. *IEEE Communications Society WCNC*, 2005, 1446-1452.
- [8] Chow, J., Garcia, G. “Macro- and Micro-mobility Handoffs in Mobile IP Based MBWA Networks”. *IEEE Communications Society Globecom*, 2004, 3921-3925.
- [9] Chu, G., Wang, D., Mei, S. “A QoS Architecture for the MAC Protocol of IEEE 802.16 BWA System”. *IEEE Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions*, 2002, 435-439.
- [10] Lu, S., Bharghavan, V., Srikant, R. “Fair scheduling in wireless packet networks”. *Proceedings of ACM SIGCOMM*, 1997.
- [11] Parekh, A. K., Gallager, R. G. “A generalized processor sharing approach to flow control in integrated services networks: The single-node case”. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, junho de 2002.
- [12] Moorman, J. R., Lockwood, J., Kang, S. “Wireless quality of service using multiclass priority fair queuing”. *IEEE JSAC*, agosto de 2000.



- [13] Cho, D., Song, J., Kim, M., Han, K. “Performance Analysis of the IEEE 802.16 Wireless Metropolitan Area Network”. *Proceedings of the First IEEE International Conference on Distributed Frameworks for Multimedia Applications (DFMA)*, 2005.
- [14] Maheshwari, S. “An Efficient QoS Scheduling Architecture for IEEE 802.16 Wireless MANs”. *MTech Dissertation*, 2005.
- [15] QualNet Network Simulator. Disponível em <http://www.scalable-networks.com/>. Acessado em agosto de 2006.
- [16] ComUnidade WirelessBRASIL – Portal Independente de Telecomunicações. Disponível em <http://www.wirelessbrasil.org/>. Acessado em setembro de 2006.
- [17] Revista de WiMAX. Site criado e mantido pelo consultor em tecnologia Eduardo Prado. Disponível em <http://www.revistadewimax.com.br/>. Acessado em setembro de 2006.
- [18] AliceRamos.com. Disponível em <http://www.aliceramos.com/>. Acessado em setembro de 2006.
- [19] Teleco – Informação em telecomunicações. Seção sobre WiMAX. Disponível em <http://www.teleco.com.br/wimax.asp>. Acessado em setembro de 2006.
- [20] Senza Fili Consulting. “Fixed, nomadic, portable and mobile applications for 802.16-2004 and 802.16e WiMAX networks”. *Prepared on behalf of the WiMAX Forum*, novembro de 2005.
- [21] IEEE 802.20. Disponível em <http://grouper.ieee.org/groups/802/20/>. Acessado em agosto de 2006.
- [22] IEEE 802.16. “IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems”. Outubro de 2004.
- [23] WiMAX Forum. “IEEE 802.16a Standard and WiMAX Igniting Broadband Wireless Access”. *White Paper*, 2003.
- [24] IEEE 802.3. Disponível em <http://grouper.ieee.org/groups/802/3/>. Acessado em setembro de 2006.
- [25] ETSI HiperMAN. Disponível em <http://portal.etsi.org/radio/HiperMAN/HiperMAN.asp>. Acessado em setembro de 2006.

- [26] Hoymann, C., Püttner, M., Forkel, I. “The HIPERMAN Standard – a Performance Analysis”. *Proceedings IST Mobile & Wireless Communications Summit*, junho de 2003.
- [27] WiMAX Forum. Disponível em <http://www.wimaxforum.org/home/>. Acessado em setembro de 2006.
- [28] OPNET Modeler. Disponível em <http://www.opnet.com/products/modeler/home-2.html>. Acessado em fevereiro de 2007.
- [29] Network Simulator. Disponível em <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>. Acessado em fevereiro de 2007.
- [30] The VINT Project. Disponível em <http://www.isi.edu/nsnam/vint/>. Acessado em fevereiro de 2007.
- [31] Vasques, A. T., Esteves, R. P., Abelém, A. J. G. “Simulação de Redes de Computadores utilizando o Network Simulator”. *XI Semana de Informática da UFPA – SEMINF 2004*, 2004.
- [32] The VINT Project. “The *ns* Manual (formerly *ns* Notes and Documentation)”. Disponível em <http://www.isi.edu/nsnam/ns/ns-documentation.html>. Acessado em fevereiro de 2007.
- [33] WiMAX Forum. “Mobile WiMAX – Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation”. *White Paper*, março de 2006.
- [34] WiMAX Forum. “Mobile WiMAX – Part II: A Comparative Analysis”. *White Paper*, maio de 2006.
- [35] Alvarion. “BreezeMAX™ 3500”. *White Paper*, 2005.
- [36] Alcatel. “Alcatel 7387 – WIP for Metropolitan area”. *White Paper*, 2005.
- [37] Alcatel. “Alcatel 7387 – Radio Network Planning Guidelines”. *White Paper*, 2005.

## *Apêndices*

### ***Apêndice A - Detalhamento da Composição de cada Tráfego nos Cenários de Simulação***

#### **A.1 Cenário 1**

##### **Tráfego UGS para a SS<sub>2</sub>**

Envia 1 pacote de 1172 bytes a cada quadro.

##### **Tráfego UGS para a SS<sub>4</sub>**

Envia 1 pacote de 820 bytes a cada quadro.

##### **Tráfego rtPS para a SS<sub>1</sub>**

Envia, a cada 8 quadros, 1 pacote de 7032 bytes em média, com distribuição de probabilidades normal de desvio padrão igual a  $20\% \times 7032 = 1406$ .

##### **Tráfego rtPS para a SS<sub>3</sub>**

Envia, a cada 5 quadros, 1 pacote de 3077 bytes em média, com distribuição de probabilidades normal de desvio padrão igual a  $20\% \times 3077 = 615$ .

##### **Tráfego nrtPS para a SS<sub>2</sub>**

Envia, a cada  $8 \pm 3$  quadros (valor de -3 a +3 escolhido segundo distribuição de probabilidades uniforme), 1 pacote de 4688 bytes em média, com distribuição de probabilidades normal de desvio padrão igual a  $20\% \times 4688 = 938$ .

##### **Tráfego nrtPS para a SS<sub>3</sub>**

Envia, a cada  $10 \pm 4$  quadros (valor de -4 a +4 escolhido segundo distribuição de probabilidades uniforme), 1 pacote de 4102 bytes em média, com distribuição de probabilidades normal de desvio padrão igual a  $20\% \times 4102 = 820$ .

##### **Tráfego BE para a SS<sub>1</sub>**

Envia, a cada  $5 \pm 2$  quadros (valor de -2 a +2 escolhido segundo distribuição de probabilidades uniforme),  $n$  pacotes,  $n \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$  e escolhido segundo distribuição de probabilidades uniforme. Cada pacote tem tamanho médio de 498 bytes, com distribuição de probabilidades uniforme.

### **Tráfego BE para a SS<sub>4</sub>**

Envia, a cada 17 quadros, com 70% de chance segundo distribuição de probabilidades uniforme, 1 pacote de 6048 bytes.

## **A.2 Cenário 2**

### **Tráfego UGS para a SS<sub>2</sub>**

Envia 1 pacote de 655 bytes a cada quadro.

### **Tráfego UGS para a SS<sub>4</sub>**

Envia 1 pacote de 459 bytes a cada quadro.

### **Tráfego rtPS para a SS<sub>1</sub>**

Envia, a cada 8 quadros, 1 pacote de 5243 bytes em média, com distribuição de probabilidades normal de desvio padrão igual a  $20\% \times 5243 = 1049$ .

### **Tráfego rtPS para a SS<sub>3</sub>**

Envia, a cada 5 quadros, 1 pacote de 2294 bytes em média, com distribuição de probabilidades normal de desvio padrão igual a  $20\% \times 2294 = 459$ .

### **Tráfego nrtPS para a SS<sub>2</sub>**

Envia, a cada  $8 \pm 3$  quadros (valor de -3 a +3 escolhido segundo distribuição de probabilidades uniforme), 1 pacote de 5243 bytes em média, com distribuição de probabilidades normal de desvio padrão igual a  $20\% \times 5243 = 1049$ .

### **Tráfego nrtPS para a SS<sub>3</sub>**

Envia, a cada  $10 \pm 4$  quadros (valor de -4 a +4 escolhido segundo distribuição de probabilidades uniforme), 1 pacote de 4588 bytes em média, com distribuição de probabilidades normal de desvio padrão igual a  $20\% \times 4588 = 918$ .

### **Tráfego BE para a SS<sub>1</sub>**

Envia, a cada  $5 \pm 2$  quadros (valor de -2 a +2 escolhido segundo distribuição de probabilidades uniforme),  $n$  pacotes,  $n \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$  e escolhido segundo distribuição de probabilidades uniforme. Cada pacote tem tamanho médio de 1638 bytes, com distribuição de probabilidades uniforme.

### **Tráfego BE para a SS<sub>4</sub>**

Envia, a cada 17 quadros, com 70% de chance segundo distribuição de probabilidades uniforme, 1 pacote de 19895 bytes.

# Livros Grátis

( <http://www.livrosgratis.com.br> )

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)  
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)  
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)  
[Baixar livros de Matemática](#)  
[Baixar livros de Medicina](#)  
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)  
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)  
[Baixar livros de Meteorologia](#)  
[Baixar Monografias e TCC](#)  
[Baixar livros Multidisciplinar](#)  
[Baixar livros de Música](#)  
[Baixar livros de Psicologia](#)  
[Baixar livros de Química](#)  
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)  
[Baixar livros de Serviço Social](#)  
[Baixar livros de Sociologia](#)  
[Baixar livros de Teologia](#)  
[Baixar livros de Trabalho](#)  
[Baixar livros de Turismo](#)