PUC

ISSN 0103-9741

Monografias em Ciência da Computação
n° 29/06

WiMAX: Padrão IEEE 802.16 para Banda Larga Sem Fio

Luciana dos Santos Lima
Luiz Fernando Gomes Soares
Markus Endler

Departamento de Informática

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO DE JANEIRO
RUA MARQUÊS DE SÃO VICENTE, 225 - CEP 22453-900
RIO DE JANEIRO - BRASIL

Monografias em Ciência da Computação, No. 29/06 ISSN: 0103-9741
Editor: Prof. Carlos José Pereira de Lucena Agosto, 2006

WiMAX: Padrão IEEE 802.16 para Banda Larga Sem Fio*

Luciana dos Santos Lima, Luiz Fernando Gomes Soares, Markus Endler

Departamento de Informática
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (PUC-Rio)

{lslima, lfgs, endler}@inf.puc-rio.br

Abstract. The main purpose of this work is to give an overview of IEEE 802.16, a standard for wireless broadband access, with a special focus on its mechanism for providing QoS. We compare the standards IEEE 802.11, IEEE 802.16 and IEEE 802.20 with the intention to identify the part each standard plays, according to its characteristics, in an integrated wireless network infrastructure, and show how they will coexist and complement each other in this network infrastructure. We conclude with some discussion on a general architecture for provision of QoS in wireless networks integrating the standards IEEE 802.11 and IEEE 802.16.

Keywords: *IEEE 802.16, WiMAX, Wireless Broadband, Quality of Service*.

Resumo. O principal objetivo deste trabalho é o estudo do padrão IEEE 802.16 para acesso banda larga sem fio, tendo como foco principal o seu mecanismo de provisão de QoS. São apresentadas comparações entre os padrões IEEE 802.11, IEEE 802.16 e IEEE 802.20 com o propósito de posicionar cada padrão em função das suas características, mostrando como eles coexistem e complementam-se de modo a prover uma solução integrada para o acesso às redes de comunicação. Concluímos tecendo algumas observações sobre uma arquitetura comum para provisão de QoS em redes sem fio integrando os padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.16.

Palavras-chave: *IEEE 802.16, WiMAX, Banda Larga Sem Fio, Qualidade de Serviço*.

* Este trabalho é resultado de um estudo orientado desenvolvido no segundo semestre do ano de 2004. Novas referências podem ser encontradas na página do fórum WiMAX (http://www.wimaxforum.org/home/).

In charge for publications:

Rosane Teles Lins Castilho
Assessoria de Biblioteca, Documentação e Informação
PUC-Rio Departamento de Informática
Rua Marquês de São Vicente, 225 - Gávea
22453-900 Rio de Janeiro RJ Brasil
Tel. +55 21 3114-1516 Fax: +55 21 3114-1530
E-mail: bib-di@inf.puc-rio.br
Web site: http://bib-di.inf.puc-rio.br/techreports/

Sumário

1 Introdução 6
1.1 Motivação 6
1.2 Objetivos 8
1.3 Cenário Atual: Padrões IEEE 802 para Redes Sem Fio 8
1.4 Organização do Texto 9
2 Família de Padrões IEEE para Acesso Banda Larga Sem Fio 9
2.1 O Padrão IEEE 802.16 9
2.1.1 A Família de Padrões IEEE 802.16 11
2.1.2 Considerações Tecnológicas 13
2.2 Tecnologias para Acesso Banda Larga à Internet 21
2.3 Relacionando os Padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.16 23
2.4 Relacionando os Padrões IEEE 802.20 e IEEE 802.16e 25
2.5 Interoperabilidade entre os Padrões IEEE 802.11, 802.16 e 802.20 27
3 Provisão de QoS em Redes Banda Larga Sem Fio 29
3.1 Arquiteturas de QoS do IETF para Internet Cabeada 31
3.1.1 Modelo de Serviços Integrados 31
3.1.2 Modelo de Serviços Diferenciados 31
3.2 QoS no Padrão IEEE 802.16 32
3.2.1 Modelo de Objetos 34
3.2.2 Fluxos de Serviço 35
3.2.3 Classes de Serviço 41
3.2.4 Estrutura da Transmissão no *Uplink* 45
4 QoS: Integrando os Padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.16 48
4.1 Arquitetura Genérica para Provisão de QoS 48
4.2 Arquiteturas Propostas 49
4.3 Discussão 50
5 Conclusões 50
Referências Bibliográficas 51
Apêndice 1 Acrônimos 55

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Padronização global (IEEE e ETSI) para redes sem fio [ITU, 2003] 8

Figura 1.2 – Cenários de aplicações sem fio (adaptado de [Stepanov, 2002]) 9

Figura 2.1 – O padrão IEEE 802.16 viabiliza soluções que atendem as necessidades de uma variedade de segmentos de acesso banda larga [Intel, 2003].....10

Figura 2.2 – O padrão IEEE 802.16 viabiliza conexões sem fio NLOS ponto a multiponto e *backhaul* LOS [Intel, 2003].....12

Figura 2.3 – Pilha de protocolos do IEEE 802.16 [IEEE Std 802.16-2001] 13

Figura 2.4 – Perfis de Rajada: associação dinâmica de técnicas de modulação [Marks, 2003] 14

Figura 2.5 – Diagrama da constelação do sistema QPSK 15

Figura 2.6 – Diagrama da constelação do sistema 16 QAM 15

Figura 2.7 – Diagrama da constelação do sistema 64 QAM 16

Figura 2.8 – Mapa mundial com a cobertura WiMAX esperada para 2007 [WiMAX Forum] .17

Figura 2.9 – Topologia em malha (*mesh*) 20

Figura 2.10 – Exemplificando a interoperabilidade entre o IEEE 802.11 e o IEEE 802.16 [Paolini, 2004] 24

Figura 2.11 – Pilha de protocolos do IEEE 802.16e para estações base [WiMAX Forum]....26

Figura 2.12 – Plataformas de Interoperabilidade sem fio.....28

Figura 2.13 – Plataformas de Interoperabilidade sem fio:comparativo das taxas de transmissão 29

Figura 3.1 – Arquitetura de QoS do padrão IEEE 802.16 [Chen, 2004].....32

Figura 3.2 – Arquitetura da camada MAC na estação do assinante [Yaghoobi, 2003].....33

Figura 3.3 – Arquitetura da camada MAC na estação base [Yaghoobi, 2003].....34

Figura 3.4 – Teoria do modelo do objeto de operação [IEEE Std 802.16-2001] 35

Figura 3.5 – “Envelope” do Modelo de Autorização Provisionado [IEEE Std 802.16-2001]...36

Figura 3.6 – “Envelopes” do Modelo de Autorização Dinâmico [IEEE Std 802.16-2001].....36

Figura 3.7 – Mecanismo de classificação [Chen, 2004].....37

Figura 3.8 – Estrutura da MIB *wmanIfMib* [Chou, 2004] 39

Figura 3.9 – Tabelas referentes à provisão do fluxo de serviço [Chou, 2004].....40

Figura 3.10 – Provisão do fluxo de serviço [Nair, 2004].....41

Figura 3.11 – Concessão de privilégio de acesso de dados (*data grants*) em um fluxo de serviço UGS.....42

Figura 3.12 – Mecanismo de QoS para aplicações multimídia [Nair, 2004] 44

Figura 3.13 – Estrutura do subframe de *downlink* [Eklund, 2002] 45

Figura 3.14 – Estrutura do subframe de *uplink* [Eklund, 2002].....46

Figura 3.15 – Mecanismo de acesso à rede [Nair, 2004].....47

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Tabela comparativa: família de padrões IEEE 802.16 [WiMAX Forum].....12
Tabela 2.2 – Características da camada física do IEEE 802.16a [WiMAX, 2004].....18
Tabela 2.3 – Características das interfaces aéreas da camada física do IEEE 802.16.....18
Tabela 2.4 – Características da camada MAC do IEEE 802.16a [WiMAX, 2004] 20
Tabela 2.5 – Interfaces de rádio do IEEE 802.11 [WiMAX Forum] 24
Tabela 2.6 – Tabela comparativa: IEEE 802.11 x IEEE 802.16 [WiMAX Forum].....25
Tabela 2.7 – Tabela comparativa: IEEE 802.20 x IEEE 802.16e [WiMAX Forum] 26
Tabela 2.8 – Tabela comparativa: IEEE 802.11, IEEE 802.16 e IEEE 802.20 [WiMAX Forum] 27
Tabela 3.1 – Tabela comparativa entre as categorias de serviço do padrão IEEE 802.16....44

1 Introdução

1.1 Motivação

A tecnologia para redes locais sem fio (Wireless LAN ou WLAN) existe há mais de 15 anos. Como principal fator de popularização dessa tecnologia podemos citar a criação por parte do IEEE[1] do padrão 802.11. Esse padrão também é chamado de IEEE WirelessLAN ou ainda Wi-Fi (*Wireless Fidelity*), marca registrada de um grupo de fabricantes que se uniram para criar um selo de garantia de compatibilidade homônimo.

O IEEE vem desenvolvendo um padrão para as redes metropolitanas sem fio (Wireless MAN ou WMAN) conhecido como IEEE 802.16, ou mais popularmente como WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*). O fórum WiMAX[2] é uma organização sem fins lucrativos, formada por empresas fabricantes de equipamentos e de componentes, com o objetivo de promover e certificar a compatibilidade e a interoperabilidade de produtos para a banda larga sem fio.

O que o padrão IEEE 802.11 fez pelas WLANs, o 802.16 pode fazer para o acesso sem fio de banda larga para a última milha (*last-mile*[3]). A proposta do 802.16 é conectar as residências e as corporações à Internet.

Como definido atualmente no padrão 802.16, uma WMAN permite o acesso à rede através de antenas externas nas estações rádio base. A WMAN oferece também uma alternativa para redes de acessos cabeadas, tais como enlaces de fibra ótica, sistemas coaxiais utilizando *cable modems*, e enlaces de acesso banda larga, como DSL (*Digital Subscriber Line*). Dado que os sistemas de banda larga sem fio têm a capacidade de conectar grandes áreas geográficas sem a necessidade de investimento em uma infra-estrutura de alto custo, a tecnologia do padrão 802.16 pode permitir a implantação de BWA (*Broadband Wireless Access*) com significativa redução de custos e em um tempo menor. Esses fatores permitem ao 802.16 oferecer a conveniência da mobilidade e da banda larga para um grande número de usuários, sendo apontado como uma tecnologia extremamente atraente para a cobertura de áreas rurais e pontos de difícil acesso, que correspondem à grande maioria das localidades não servidas por redes cabeadas.

As redes metropolitanas têm uma cobertura com alcance máximo de 100 Km. Essas redes abrangem tipicamente ambientes urbanos. Esse fator traz algumas dificuldades ao funcionamento de uma rede sem fio, que tipicamente necessita de visada direta. Além desse fator, aspectos como freqüências de operação, número de usuários atendidos, desempenho, qualidade de serviço (QoS) e segurança são igualmente desafiadores e originam uma série de estudos e propostas. A seguir esses fatores serão brevemente apresentados:

---

[1] Acrônimo para *Institute of Electrical and Electronic Engineers*.

[2] WiMAX Forum: http://www.wimaxforum.org.

[3] Referência a infra-estrutura de comunicação entre o ponto de presença (POP) do provedor de serviço e as localizações onde se encontram os consumidores empresariais ou residenciais, ou seja, a parte final da malha de distribuição dos serviços. Esta é a porção mais cara do serviço, devido aos custos de infra-estrutura e instalação.

- *Visada Direta*[4]: Em um ambiente metropolitano realista, 50% a 70% dos clientes tipicamente não têm visada direta e aberta ao ponto de acesso da rede sem fio devido a grande quantidade de edifícios, pontes, árvores, etc. Os protocolos utilizados nas redes locais (FHSS - Frequency-Hopping Spread Spectrum e DHSS - Direct-Sequence Spread Spectrum) necessitam de visada direta. Uma parte do sinal de rádio é sempre refletida pelos edifícios, podendo ser utilizada para se alcançar pontos aonde não se consegue chegar diretamente. No entanto, as reflexões causam atenuações em algumas faixas de freqüência (e essas atenuações são totalmente imprevisíveis), sendo assim, o protocolo utilizado deve ser capaz de lidar com a perda causada por essas atenuações.
  O protocolo utilizado pelo IEEE 802.16 para solucionar esse problema é o OFDM[5] (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) que, ao contrário do FHSS ou DSSS, não transmite uma, mas centenas de portadoras ao mesmo tempo. Sendo necessário que apenas algumas dessas portadoras cheguem ao receptor para que a informação seja recuperada. Isso possibilita que um equipamento WiMAX[6] seja capaz de se comunicar em distâncias de até 6 Km sem visada, utilizando apenas o mecanismo de reflexão.

- *Freqüências de Operação*: Para se obter escalabilidade e conseqüentemente redução de custos, os fabricantes devem ser capazes de utilizar virtualmente a mesma tecnologia em todos os mercados, regiões e países. Como cada região tem a sua legislação própria o IEEE procurou criar um protocolo que seja capaz de operar em freqüências que vão desde 2,4 GHz até 66 GHz. O que não significa que o mesmo rádio será capaz de operar em todas as freqüências e sim que os fabricantes poderão usar o mesmo protocolo de modulação, modificando apenas as antenas, o sistema de potência e outros sub-sistemas menores que sejam dependentes da freqüência.

- *Quantidade de Usuários*: Uma aplicação MAN pode fornecer acesso a milhares de usuários. Assim sendo, o WiMAX permitirá o controle de milhares de endereços MAC por setor. Quando se pensa em número de usuários questões como desempenho, qualidade de serviço e segurança logo são levantadas.

- *Desempenho*: Uma medida de desempenho essencial em redes sem fio é a quantidade de banda obtida para cada Hz utilizado. Isso é importante porque existem limitações na faixa de freqüência que se pode utilizar e assim esse parâmetro informa com quantos Bps (bits por segundo) se poderá trafegar. Enquanto o padrão IEEE 802.11 (.11a/g) fornece aproximadamente 2,7 Bps/Hz o IEEE 802.16 (.16a) irá fornecer 5,0 Bps/Hz, quase o dobro de aproveitamento do espaço de freqüências[7].

- *Qualidade de Serviço*: Uma preocupação do consórcio WiMAX é que o padrão 802.16 ofereça garantias para o tráfego de voz e vídeo com qualidade de operadora. Tendo isso como um princípio, o padrão IEEE 802.16 foi projetado desde o seu início com

---

[4] Ausência de obstáculos entre o transmissor e o receptor.

[5] Técnica de modulação FDM para transmitir grandes quantidades de dado digital sobre ondas de rádio. OFDM trabalha dividindo o sinal de rádio em múltiplos sinais menores (sub-sinais) que são então transmitidos simultaneamente em diferentes freqüências para o receptor. OFDM reduz a quantidade de *crosstalk* (interferência eletromagnética) nas transmissões de sinais e é utilizada pelos padrões 802.11a WLAN e 802.16 WMAN [*Webopedia*].

[6] A partir desse ponto o termo WiMAX será utilizado como uma referência a família de padrões IEEE 802.16, salvo quando menções ao fórum forem explicitamente efetuadas.

[7] Como comparação, o 802.11a ocupa 20MHz e permite um desempenho de até 54 Mbps. O 802.16, ocupando os mesmos 20 MHz, irá permitir desempenho de quase 100 Mbps.

recursos de priorização, controle/garantia de banda e QoS em todos os equipamentos: desde o nó central até o usuário final.

- *Segurança*: O IEEE também se preocupou com a segurança e o sigilo das informações transmitidas. Para isso inclui como padrão protocolos de criptografia Triple-DES (128 bits) e RSA (1.024 bits) além de mecanismos de certificação digital.

1.2 Objetivos

O foco desse trabalho é o estudo do mecanismo de provisão de QoS no padrão IEEE 802.16, visando uma possível integração dos padrões IEEE 802.16 e IEEE 802.11 em uma arquitetura para provisão de QoS em redes sem fio.

1.3 Cenário Atual: Padrões IEEE 802 para Redes Sem Fio

O IEEE definiu uma hierarquia de padrões complementares para redes sem fio (Figura 1.1). Essa padronização inclui o IEEE 802.15 para as redes pessoais (*Personal Area Network* – PAN), IEEE 802.11 para as redes locais (*Local Area Network* – LAN), 802.16 para as redes metropolitanas (*Metropolitan Area Network*) e o IEEE 802.20 para as redes geograficamente distribuídas (*Wide Area Network* – WAN). Cada padrão representa a tecnologia otimizada para mercados e modelos de uso distintos, sendo projetado para complementar os demais. Um bom exemplo é a proliferação de redes locais sem fio domésticas, empresariais e *hotspots* comerciais baseados no padrão IEEE 802.11. Essa proliferação de WLANs está impulsionando a demanda por conectividade de banda larga para a Internet, demanda essa que o padrão 802.16 pode atender oferecendo conexão *outdoor* aos provedores de serviço de comunicação. Para os operadores e provedores de serviço, os sistemas construídos sob o padrão 802.16 representam um terceiro canal (*third pipe*), de fácil implantação, capaz de conectar residências e corporações ao núcleo das redes de telecomunicações em todo o mundo.

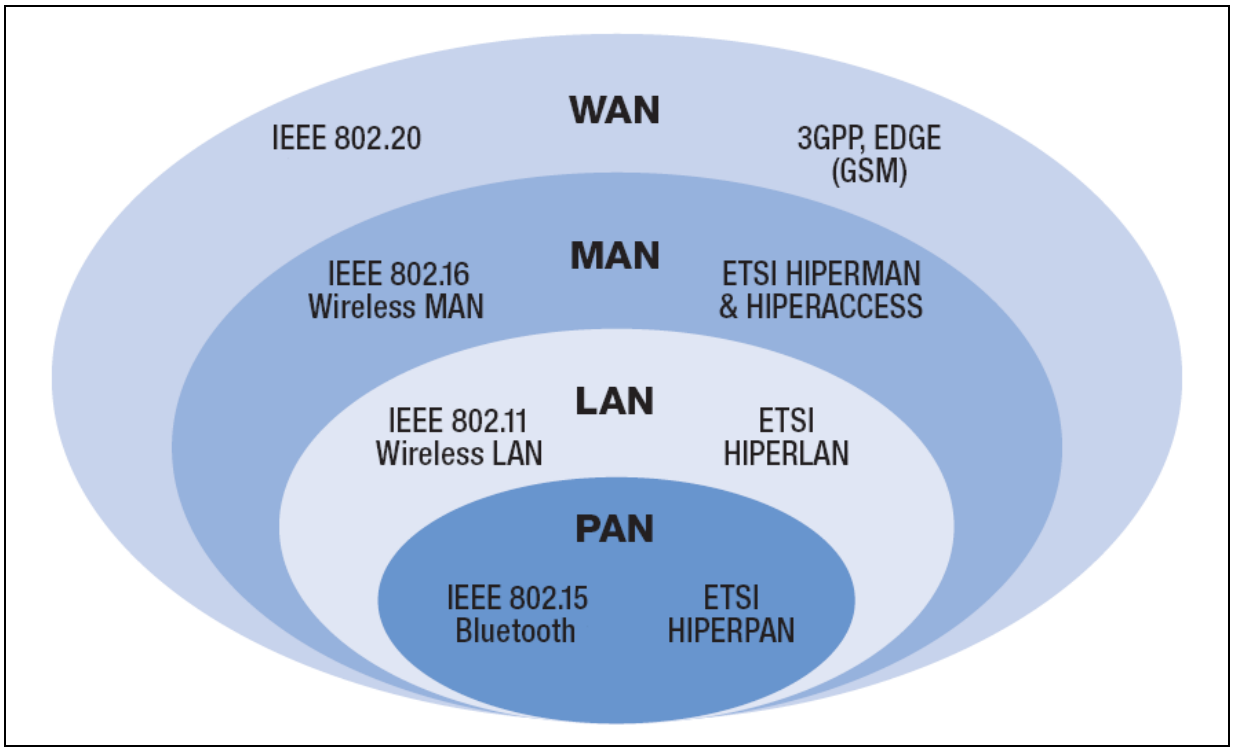


Figura 1.1 – Padronização global (IEEE e ETSI) para redes sem fio [ITU, 2003]

A Figura 1.2 ilustra diferentes categorias de aplicações, as taxas de dados associadas as mesmas, bem como as tecnologias que melhor se adequam as suas exigências. Dentre as tecnologias ilustradas, estão destacadas aquelas definidas pela família de padrões IEEE 802 para as redes sem fio (Figura 1.1), representadas na Figura 1.2 pelos padrões IEEE 802.11, 802.15 (PAN/Bluetooth) e 802.16.

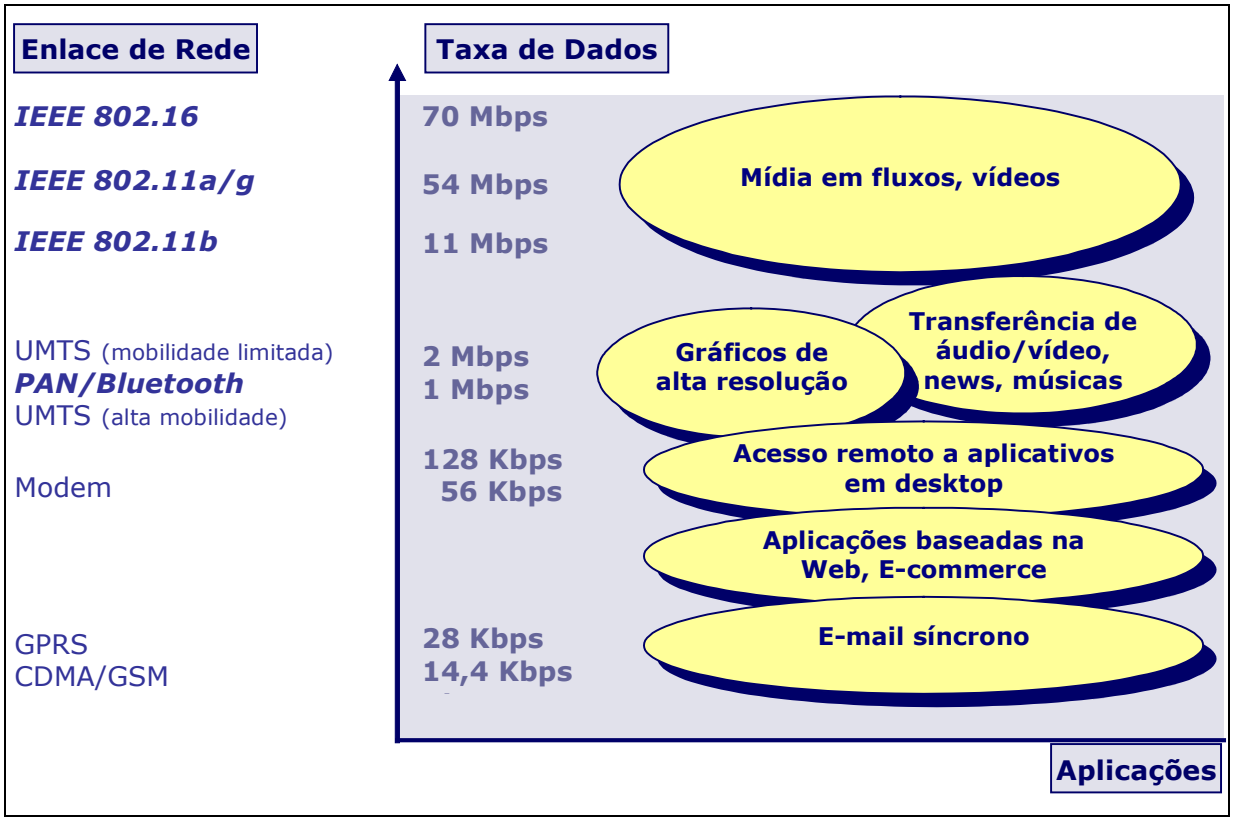


Figura 1.2 – Cenários de aplicações sem fio (adaptado de [Stepanov, 2002])

1.4 Organização do Texto

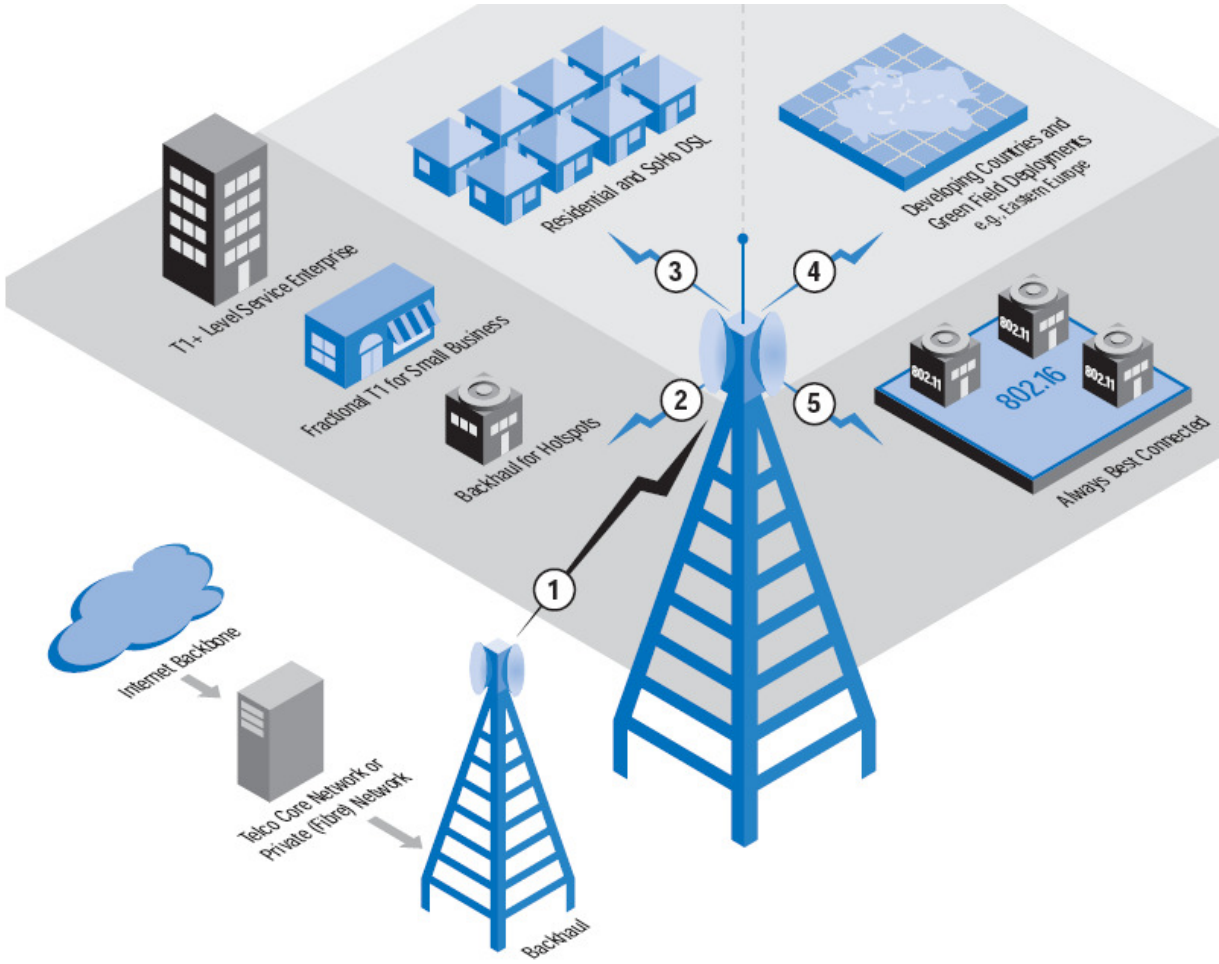
Na próxima seção será abordada a família de padrões IEEE 802.16 para as redes metropolitanas sem fio, bem como a sua integração e coexistência com os padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.20. Na Seção 3 o mecanismo de provisão de QoS em redes móveis sem fio é discutido e detalhes da especificação de QoS do padrão IEEE 802.16 são avaliados. Na Seção 4 são apresentadas algumas observações sobre mecanismos para provisão de QoS integrando os padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.16. A Seção 5 conclui o trabalho.

2 Família de Padrões IEEE para Acesso Banda Larga Sem Fio

2.1 O Padrão IEEE 802.16

WiMAX é o nome popular dado ao padrão IEEE 802.16 para redes metropolitanas sem fio, também conhecido como IEEE WirelessMAN ou ainda *"Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems"*. Esse padrão tem como proposta inicial disponibilizar o acesso banda larga sem fio para

novas localizações cobrindo distâncias maiores (Figura 2.1) sem a necessidade de investimento em uma infra-estrutura de alto custo (como ocorre com uma rede de acesso banda larga cabeada) e sem as limitações de distância das tecnologias DSL. Entre as promessas associadas ao 802.16 figura a solução para o problema da última milha[8], através da redução do custo de implantação e do tempo necessário para se conectar residências e escritórios aos troncos das linhas de comunicação.



1 – Infra-estrutura de *backhaul*[9] celular
2 – Banda larga sob demanda
3 – Banda larga para uso residencial e de pequenos escritórios (SoHo)
4 – Áreas não cobertas por banda larga cabeada, como regiões rurais
5 – Conexão inteiramente sem fio (acesso móvel de banda larga portátil)

Figura 2.1 – O padrão IEEE 802.16 viabiliza soluções que atendem as necessidades de uma variedade de segmentos de acesso banda larga [Intel, 2003]

---

[8] Ponto de conexão das centrais para os terminais de usuários.

[9] *Backhaul*: (i) na tecnologia de redes sem fio significa transmitir tráfego de voz e dados de uma célula para um *switch*, ou seja, de um local remoto para uma central. (ii) Na tecnologia de satélite significa transmitir dados para um ponto a partir do qual ele possa ser *uplinked* para um satélite. (iii) Transmitir dados para um *backbone* de rede. [*Webopedia*].

O padrão IEEE 802.16 pode ser definido como um padrão global, pois foi desenvolvido de modo a ser compatível com os padrões do ITU (*International Telecommunication Union*) e do ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*), mais especificamente com os padrões HiperACCESS (*High Performance Radio Access*) e HiperMAN (*High Performance Radio Metropolitan-Area Network*) do projeto BRAN[10] (*Broadband Radio Access Networks*) do ETSI e com o grupo de trabalho TM4 do ETSI. O mesmo não aconteceu com o padrão IEEE 802.11, o que de certa forma retardou a sua adoção.

A Intel, uma das maiores patrocinadoras do Fórum WiMAX, acredita que o 802.16 é "*a coisa mais importante desde o advento da própria Internet*". O padrão estenderá o potencial do Wi-Fi atual para distâncias bem maiores – em torno de 30 a 50 quilômetros. A empresa já comanda um teste real de uma rede sem fio de longo alcance em seu escritório na cidade de Hillsboro, no estado de Oregon, nos Estados Unidos. Com uma "fazenda de antenas" no topo do edifício, o sinal cobre aproximadamente 30 quilômetros e fornece acesso banda larga sem fio ao aeroporto da cidade, que fica a mais de 1 km de distância do edifício da Intel, e para 15 residências na vizinhança.

A popularidade das redes sem fio tem crescido rapidamente em função de uma padronização efetiva. Nesse contexto, os padrões são importantes pois viabilizam uma economia de escala, baixando os custos de equipamentos, assegurando a interoperabilidade e reduzindo o risco de investimento para os operadores da tecnologia sem fio.

2.1.1 A Família de Padrões IEEE 802.16

A versão inicial do padrão **IEEE 802.16**, publicada em abril de 2002, opera nas freqüências de 10 a 66 GHz e requer visada direta (LOS – *Line Of Sight*). A extensão **802.16a**, aprovada em janeiro de 2003, não requer transmissão com visada direta (NLOS – *Non Line Of Sight*) e permite o uso de freqüências mais baixas (2 a 11 GHz), muitas das quais não são licenciadas. O padrão IEEE 802.16 ostenta um alcance de 50 Kms e taxas médias de transferência de 70 Mbps, com taxas de pico de 268 Mbps, podendo atender a centenas de usuários (Figura 2.2).

As emendas ao padrão 802.16, possibilitarão que uma única estação base ofereça BWA tanto para terminais fixos quanto móveis. Essas correções irão preencher a lacuna entre as altas taxas de dados das redes locais sem fio (WLAN) e a alta mobilidade celular das redes metropolitanas (WAN).

A seguir, a família de padrões que compõem o WiMAX é brevemente apresentada:

IEEE 802.16: Corresponde a especificação original, projetado para padronizar implementações LMDS (*Local Multipoint Distribution System*). É usado em freqüências de 10 – 66 GHz.

IEEE 802.16a: Projetado para atender as freqüências mais baixas (2 - 11 GHz). Foi especificado com o objetivo de competir com as tecnologias que oferecem acesso à última milha, como xDSL e *cable modems*. Pode obter taxas de transmissão de até 75 Mbps com um alcance máximo de 50 Kms. Emprega antenas fixas NLOS.

IEEE 802.16b: Trata aspectos relativos à qualidade de serviço.

IEEE 802.16c: Interoperabilidade, protocolos e especificação de testes de conformação.

---

[10] BRAN: http://www.etsi.org/bran.

IEEE 802.16-REVd: Atualização do padrão 802.16 que consolida as revisões dos padrões 802.16a e 802.16c em um único padrão, substituindo o 802.16a como o padrão base. Entre as alterações pode-se destacar a provisão de suporte para antenas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*), o que aumenta a confiabilidade do alcance com multipercurso. Facilita instalações com o uso de antenas *indoor*.

IEEE 802.16e: Adiciona especificações de mobilidade (WMANs móveis). Aspectos como largura de banda limitada (um máximo de 5 MHz), velocidade mais lenta e antenas menores possibilitam o "*walkabout*" ou mobilidade veicular (até 150 Km/h). É compatível com a especificação do padrão 802.16. Em freqüências inferiores a 3.5 GHz pode oferecer concorrência à tecnologia celular com alcance de 2 a 5 Km (nas cidades).

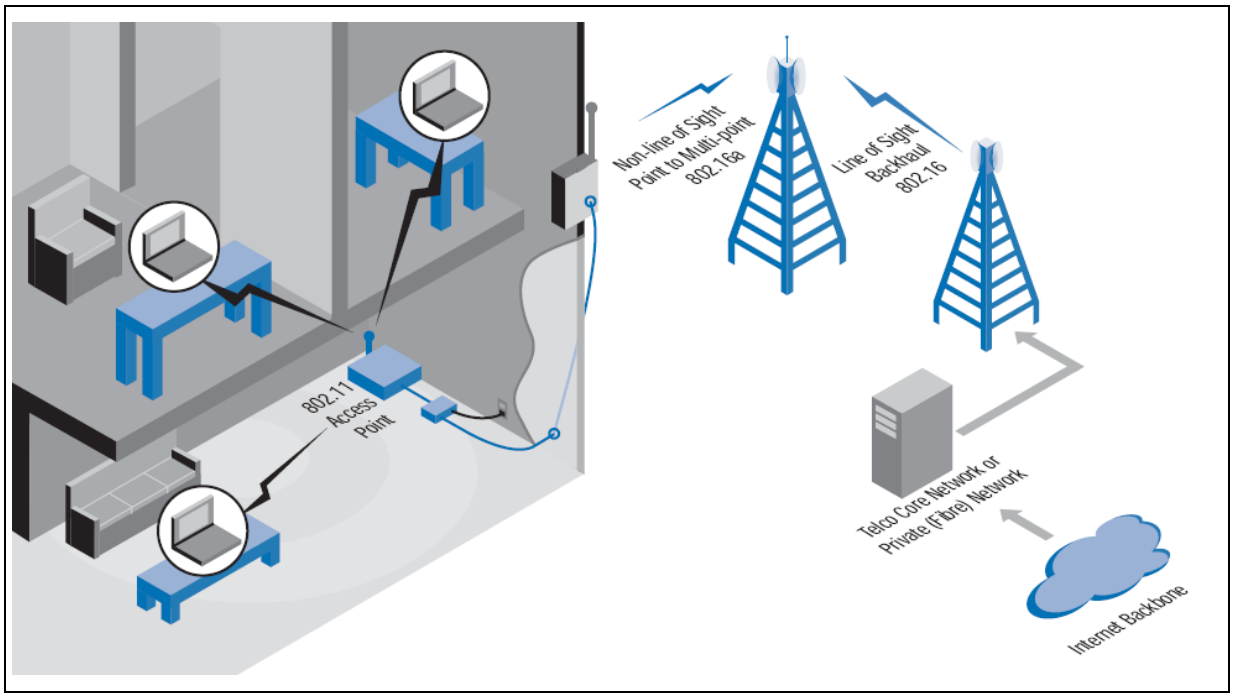


Figura 2.2 – O padrão IEEE 802.16 viabiliza conexões sem fio NLOS ponto a multiponto e *backhaul* LOS [Intel, 2003]

A Tabela 2.1 complementa a apresentação efetuada nos parágrafos anteriores trazendo um resumo comparativo que aponta as principais características dos padrões mais importantes da família IEEE 802.16.

Tabela 2.1 – Tabela comparativa: família de padrões IEEE 802.16 [WiMAX Forum]

	IEEE 802.16	IEEE 802.16a/REVd	IEEE 802.16e
Homologação	Dezembro de 2001	802.16a: Janeiro de 2003 802.16 REVd: Junho de 2004	A ser homologado em 2005
Freqüência	10 – 66 GHz	2 – 11 GHz	2 – 6 GHz
Condições do Canal	LOS (*Line of Sight*)	NLOS (*Non Line of Sight*)	NLOS (*Non Line of Sight*)
Taxa de Transmissão	Entre 32 e 134 Mbps (canal de 28 MHz)	Até 75 Mbps (canal de 20 MHz)	Até 15 Mbps (canal de 5 Mhz)

	IEEE 802.16	IEEE 802.16a/REVd	IEEE 802.16e
Modulação	QPSK, 16 QAM e 64 QAM	OFDM 256 sub-portadoras, OFDMA 64 QAM, 16 QAM, QPSK, BPSK	OFDM 256 sub-portadoras, OFDMA 64 QAM, 16 QAM, QPSK, BPSK
Mobilidade	Fixa	Fixa e portátil (nômade)	Mobilidade, *roaming* regional
Largura de Banda	20, 25 e 28 MHz	Entre 1,5 e 20 MHz, com até 16 sub-canais lógicos	Entre 1,5 e 20 MHz, com até 16 sub-canais lógicos
Raio da Célula	2 – 5 Km	5 – 10 Km Alcance máximo de 50 Kms dependendo do tamanho da antena, seu ganho e potência de transmissão (entre outros parâmetros)	2 – 5 Km

2.1.2 Considerações Tecnológicas

Como definido pelo padrão IEEE 802.16 (padrão base), a provisão de acesso banda larga sem fio nas redes metropolitanas é garantida inicialmente através do acesso "fixo sem fio". Nesse cenário, um *backbone* de estações base é conectado a uma rede pública, cada estação base tem capacidade para prover acesso à centenas de estações assinantes fixas, as quais podem ser tanto *hot spots* Wi-Fi públicos quanto redes empresariais protegidas por *firewalls*. As estações base devem usar a camada MAC como definida no padrão 802.16 e alocar largura de banda nos canais de *uplink*[11] e *downlink*[12] para os assinantes de acordo com as suas necessidades, utilizando a especificação 802.16 da camada física que se adeque a faixa de freqüência em uso.

Nas próximas subseções serão apresentadas as especificações das camadas física e de controle de acesso ao meio (MAC) definidas no padrão 802.16 [Ramachandran, 2004] (Figura 2.3).

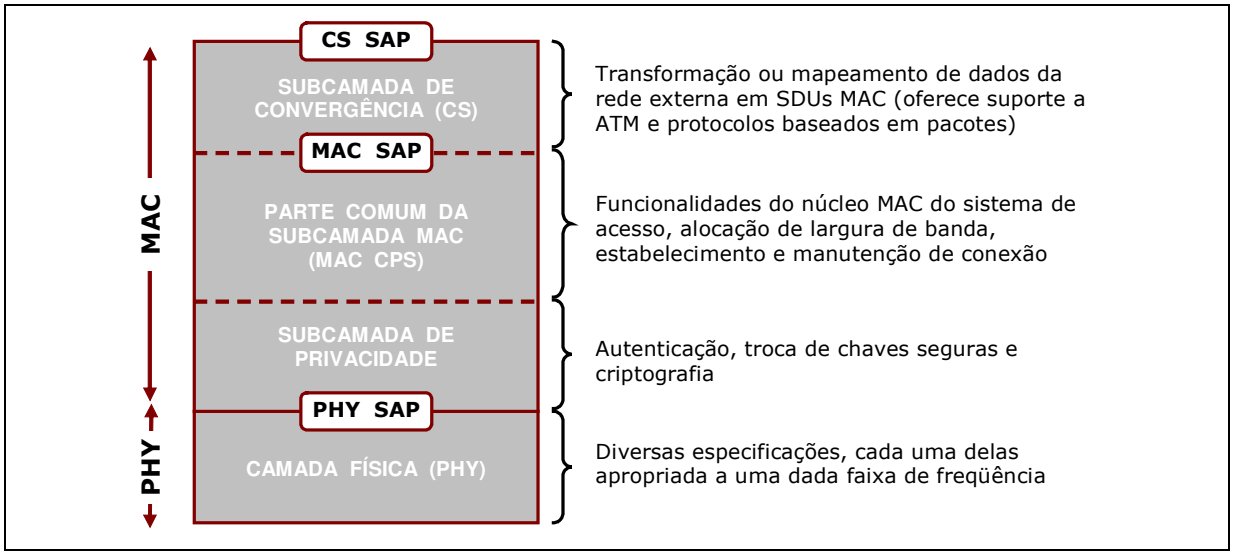


Figura 2.3 – Pilha de protocolos do IEEE 802.16 [IEEE Std 802.16-2001]

[11] Direção de transmissão que vai da estação assinante à estação base [IEEE Std 802.16.2-2001].

[12] Direção de transmissão que vai da estação base à estação assinante [IEEE Std 802.16.2-2001].

2.1.2.1 Características da Camada Física do IEEE 802.16

[**10 – 66 GHz**] No projeto de especificação da camada física a propagação LOS foi adotada por questões tecnológicas, já que em faixas de freqüências mais altas (10 – 66 GHz) não há suporte à propagação NLOS. A partir dessa restrição de projeto a técnica de modulação escolhida foi a SCM (*Single Carrier Modulation*) com FEC (*Forward Error Correction*), o que orientou a especificação da interface aérea, denominada "WirelessMAN-SC". Muitos desafios de projeto ainda permanecem em aberto. Por causa da arquitetura ponto-a-multiponto a estação base basicamente transmite um sinal TDM (*Time Division Multiplexing*), com cada assinante alocado serialmente a *slots* de tempo. Na direção do *uplink* a transmissão é feita através de acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA). Depois de uma série de discussões relativas à duplexação, um projeto para rajada foi selecionado o que permitiu que a interface aérea oferecesse suporte para os modos de operação TDD (*uplink* e *downlink* compartilham um canal mas não transmitem simultaneamente) e FDD (*uplink* e *downlink* operam em canais separados, algumas vezes simultaneamente). Essa característica permite a interoperabilidade do IEEE 802.16 com sistemas celulares e outros sistemas sem fio. A provisão de suporte para assinantes FDD *half-duplex* (que é uma opção mais barata já que a transmissão e a recepção não são simultâneas) foi adicionada com pouca complexidade. Ambas as alternativas, TDD e FDD, oferecem suporte a perfis adaptativos de tráfego em rajada (Figura 2.4) nos quais as opções de modulação e codificação podem ser associadas dinamicamente (*burst by burst*) [Eklund, 2002].

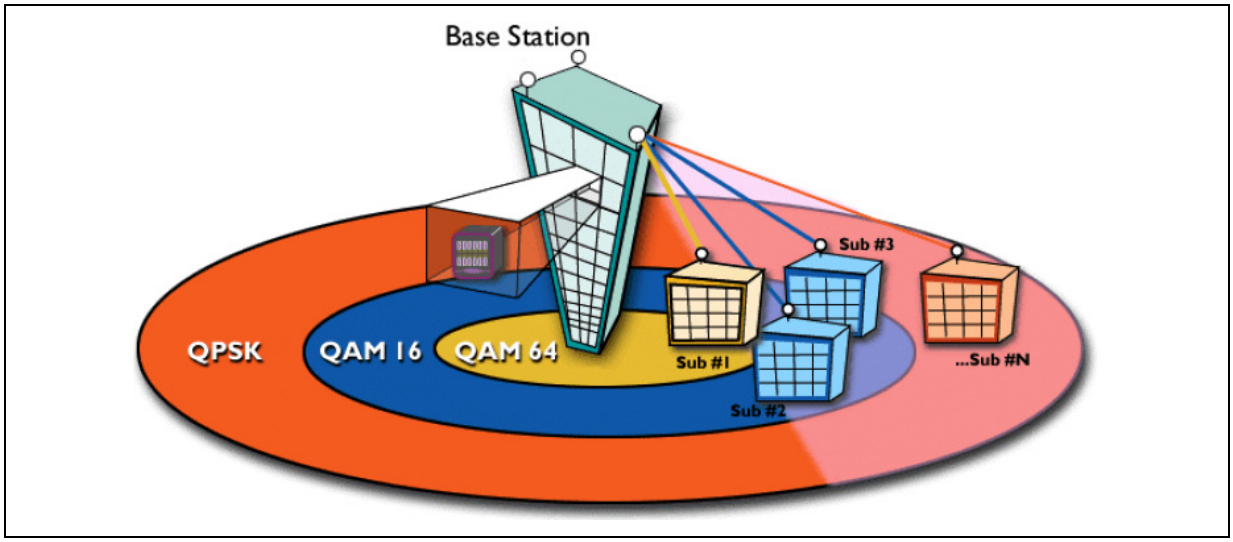


Figura 2.4 – Perfis de Rajada: associação dinâmica de técnicas de modulação [Marks, 2003]

Assim como a intensidade do sinal diminui em função da distância relativa à estação base, a relação sinal/ruído também diminui. Por essa razão, o padrão IEEE 802.16 emprega três esquemas de modulação diferentes, dependendo da distância que a estação do assinante se encontre em relação à estação base, como representado na Figura 2.4. Para assinantes próximos, é usado o 64 QAM, com 6 bits/*baud*. No caso de assinantes situados a uma distância média, é usado o 16 QAM, com 4 bits/*baud*. Para assinantes distantes, é usado o QPSK, com 2 bits/*baud*. Por exemplo, para um valor típico de 25 Mhz de espectro, o 64 QAM oferece 150 Mbps, o 16 QAM oferece 100 Mbps, e o QPSK oferece 50 Mbps. Em outras palavras, quanto mais distante o assinante estiver em relação à estação base, mais baixa será a taxa de transmissão de dados.

Como mencionado, as técnicas de modulação disponíveis no padrão IEEE 802.16 para as freqüências de 10 – 66 GHz englobam os sistemas com modulação de fase (PSK - *Phase Shift Keying*) e os sistemas com modulação de amplitude em quadratura (QAM – *Quadrature Amplitude Modulation*).

Dentre os sistemas PSK, a camada física do padrão 802.16 utiliza o QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) que é uma técnica de modulação na qual uma portadora é enviada em quatro fases (45º, 135º, 225º e 315º), com a transição entre dois símbolos vizinhos sendo codificada através de dois bits por símbolo. Na Figura 2.5 é mostrado um diagrama da constelação[13] QPSK com quatro possíveis estados por símbolo, onde cada símbolo transmite dois bits de informação, exemplificando um possível mapeamento de estados para valores binários.

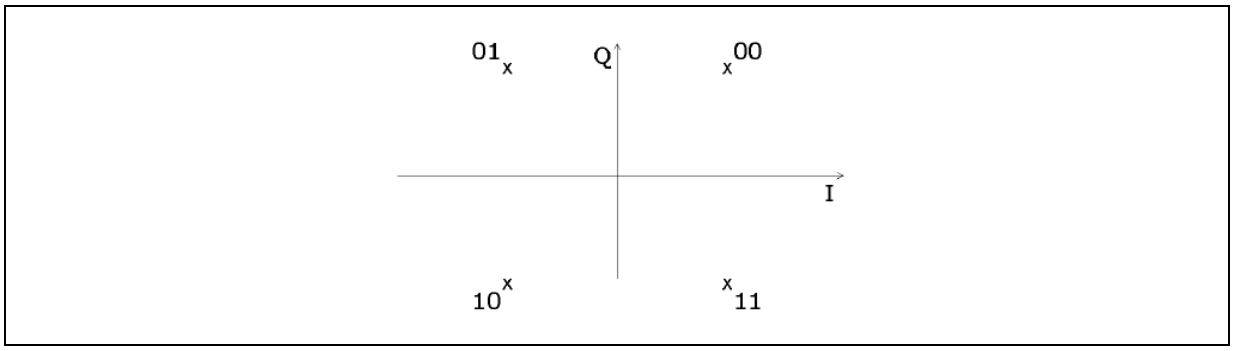


Figura 2.5 – Diagrama da constelação do sistema QPSK

A técnica de modulação QAM apresenta algumas variantes. Na Figura 2.4 são representadas duas de suas variações, 16 QAM e 64 QAM. O mecanismo definido para 16 QAM usa quatro valores em cada eixo, provendo 16 estados possíveis. Os sistemas 16 QAM transportam quatro bits por símbolo. Quando uma boa relação sinal/ruído é garantida, constelações com densidades maiores podem ser utilizadas. 64 QAM é o esquema de modulação mais utilizado nos sistemas de cabo em todo o mundo pois oferece um bom desempenho entre robustez e compatibilidade com a infra-estrutura dos sistemas legados (cabo). Os diagramas das constelações 16 QAM e 64 QAM são mostrados, respectivamente, na Figura 2.6 e na Figura 2.7.

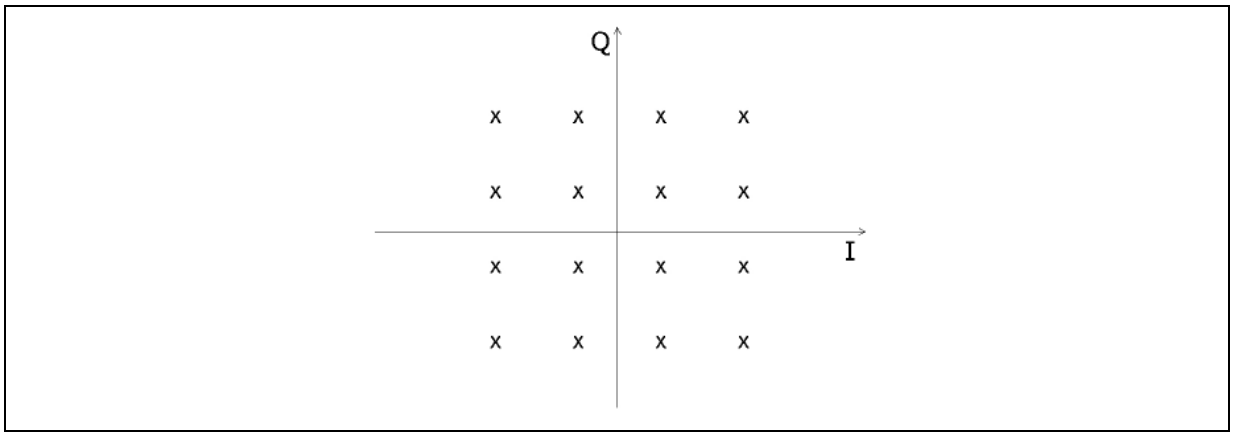


Figura 2.6 – Diagrama da constelação do sistema 16 QAM

[13] Os sistemas com modulação de amplitude e fase são geralmente representados por constelações, ou seja, o conjunto de sinais transmitidos representados em um sistema cartesiano, onde Q e I representam os eixos de modulação.

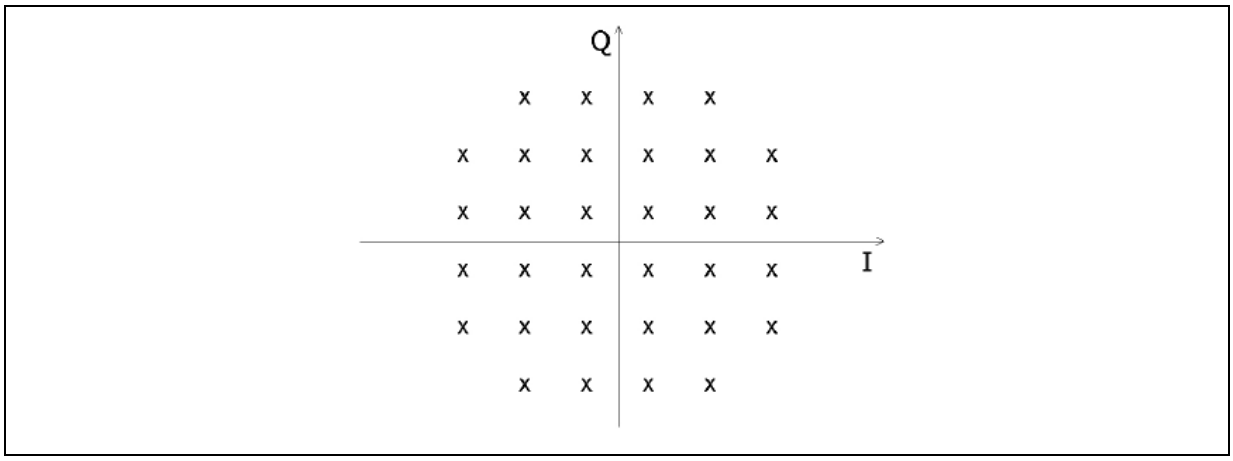


Figura 2.7 – Diagrama da constelação do sistema 64 QAM

[**2 – 11 GHz**] O projeto do IEEE 802.16a cobre as bandas licenciadas[14] e não licenciadas[15]. O padrão oferece quatro especificações para a interface aérea, definidas para garantir interoperabilidade, as quais são mencionadas a seguir [Eklund, 2002]:

- *WirelessMAN-SCa*: Utiliza o formato de modulação de portadora única (*single carrier modulation*).
- *WirelessMAN-OFDM*: Utiliza modulação OFDM com uma transformada de 256 sub-portadoras[16]. O controle de acesso ao meio é feito por TDMA. O uso dessa interface aérea é obrigatória para bandas de freqüências não licenciadas. A sua especificação é definida tanto pelo padrão IEEE 802.16 quanto pelo HIPERMAN do ETSI, o que assegura a interoperabilidade global do padrão IEEE 802.16.
- *WirelessHUMAN*: Interface aérea utilizada com bandas não licenciadas (primariamente 5 – 6 GHz), utiliza seleção de freqüência dinâmica (DFS – *Dynamic Frequency Selection*) para detectar e evitar interferências. Nos outros aspectos é similar a interface aérea WirelessMAN-OFDM.
- *WirelessMAN-OFDMA*: Utiliza modulação OFDM com uma transformada de 2048 sub-portadoras. Nesse sistema, o acesso múltiplo é oferecido através de um subconjunto de endereçamento de múltiplas portadoras para receptores individuais.

No padrão IEEE 802.16a o formato de sinalização OFDM foi escolhido dentre concorrentes como o CDMA por sua capacidade de oferecer suporte NLOS com bom desempenho ao mesmo tempo em que mantém um alto nível de eficiência espectral, maximizando o uso das freqüências disponíveis. No caso do CDMA (utilizado nos padrões

---

[14] As bandas licenciadas compreendem as freqüências de 3,5 GHz e 10,5 GHz (com algumas variações). Nos EUA cobrem a faixa de 2,5 - 2,7 GHz (a Nextel e a Sprint são proprietárias de quase 2/3 desta banda). No Brasil, a EMBRATEL possui a banda de 3,5 GHz e a Brasil Telecom as bandas de 3,5 GHz e 10,5 GHz. Alguns WISPs (Wireless ISP) brasileiros também possuem a banda de 3,5 GHZ [Prado, 2004].

[15] As bandas não licenciadas compreendem as freqüências de 2,4 GHz e 5,8 GHz. Como o padrão WiMAX é projetado para transmissões *outdoor* em longas distâncias, a banda de 5,8 GHz é um voto de confiança para o mercado, permitindo a operação em uma faixa não poluída já que a de 2,4 GHz (também do Wi-Fi) pode sofrer uma série de interferências [Prado, 2004].

[16] Em um sistema convencional de transmissão, os símbolos são enviados em seqüência através de uma portadora única (modulada na taxa de símbolos da fonte de informação), cujo espectro ocupa toda a faixa de freqüências disponível. A técnica OFDM consiste na transmissão paralela de dados em diversas sub-portadoras com modulação QAM ou PSK e taxas de transmissão (por sub-portadora) tão baixas quanto maior for o número de sub-portadoras empregado.

de telefonia celular 2G e 3G), a largura de banda para RF (*Radio Frequency*) deve ser muito maior do que a vazão dos dados, de modo a manter um ganho de processamento suficiente para superar a interferência. Constata-se facilmente que esse procedimento não é prático para freqüências inferiores a 11 GHz já que, por exemplo, para taxas de dados superiores a 70 Mbps seria necessário que a largura de banda para RF ultrapassasse 200 MHz de modo que essa exigência fosse cumprida.

O projeto da camada física do padrão IEEE 802.16a foi fortemente influenciado pela necessidade de operação NLOS. A necessidade de acesso sem visada direta pode ser observado no contexto das aplicações residenciais. Nesse cenário, os telhados das residências podem ser tão baixos que não obtenham uma linha de visada direta com as antenas posicionadas nas estações base, possivelmente devido à obstrução provocada por árvores, torres ou ainda outros prédios. Dessa forma, uma significativa propagação multipercurso é esperada.

Para garantir um desempenho robusto atendendo a diferentes canais, os quais endereçam freqüências diversificadas, tendo em vista as variações encontradas no mercado mundial (Figura 2.8), o padrão 802.16a incorpora ainda algumas outras características, a saber: canais com largura flexível, perfis de rajada adaptativos, encaminhamento de correção de erro com concatenação *Reed-Solomon* e codificação convolucional, AAS (*Advanced Antenna Systems*) opcional para garantir escopo/capacidade, DFS – que ajuda a minimizar a interferência, e STC (*Space-Time Coding*) para melhorar o desempenho em ambientes onde ocorre desvanecimento do sinal (*fading*[17]) através de uma diversidade espacial.

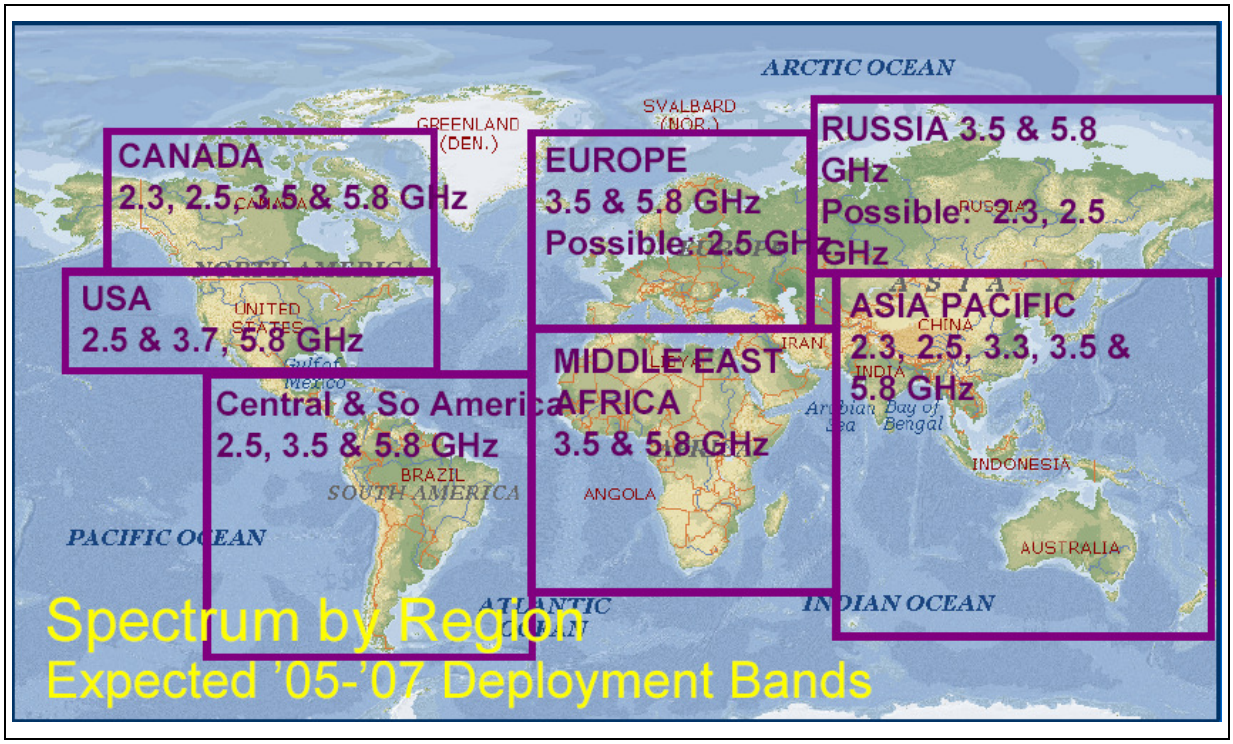


Figura 2.8 – Mapa mundial com a cobertura WiMAX esperada para 2007 [WiMAX Forum]

A Tabela 2.2 traz de forma resumida uma associação entre as principais características da camada MAC do padrão 802.16a e os benefícios por elas introduzidos.

---

[17] *Fading* se traduz pelo desvanecimento do sinal, podendo ser causado por interferências entre duas ou mais versões do sinal transmitido que chegam ao receptor em tempos ligeiramente diferentes.

Tabela 2.2 – Características da camada física do IEEE 802.16a [WiMAX, 2004]

Características		Benefícios
OFDM FFT usando 256 sub-portadoras	+	Construído para oferecer suporte ao endereçamento multipercurso para LOS e NLOS (*outdoor*)
Modulação adaptativa e codificação para correção de erro variável por rajada RF	+	Garante um enlace RF robusto enquanto maximiza a taxa de transmissão (bits por segundo) para cada assinante
Duplexação TDD e FDD	+	Uma ou outra pode ser utilizada cobrindo um vasto conjunto de regulamentações vigentes em todo o mundo
Canais com tamanhos flexíveis (ex: 3,5 MHz, 5 MHz, 10 MHz, etc)	+	Oferece a flexibilidade necessária para operar globalmente em diferentes bandas de freqüência com requisições de canais variáveis
Projetado para oferecer suporte a sistemas de antenas inteligentes	+	Antenas inteligentes (SA – *Smart Antennas*) estão se tornando cada vez mais acessíveis e como os custos vêm caindo, a sua capacidade para suprimir interferências e aumento no ganho do sistema as tornarão importantes para a expansão da BWA

A Tabela 2.3 resume as interfaces aéreas que compõem a especificação das camadas físicas dos padrões IEEE 802.16 e 802.16a, definindo a sua aplicação, opções adicionais e o mecanismo de duplexação [IEEE Std 802.16.2-2003].

Tabela 2.3 – Características das interfaces aéreas da camada física do IEEE 802.16

	Aplicação	Opções[18]	Duplexação
WirelessMAN–SC	10 – 66 GHz (bandas licenciadas)	-	TDD FDD
WirelessMAN–SCa	2 – 11 GHz (bandas licenciadas)	AAS, ARQ, STC	TDD FDD
WirelessMAN–OFDM	2 – 11 GHz (bandas licenciadas)	AAS, ARQ, Mesh, STC	TDD FDD
WirelessHUMAN	2 – 11 GHz (bandas não licenciadas)	AAS, ARQ, Mesh, STC	TDD
WirelessMAN–OFDMA	2 – 11 GHz (bandas licenciadas)	AAS, ARQ, STC	TDD FDD

2.1.2.2 Características da Camada MAC do IEEE 802.16

O protocolo MAC IEEE 802.16 foi projetado para aplicações de acesso banda larga sem fio ponto-a-multiponto. Ele atende à necessidade de altas taxas de transmissão, tanto para *uplink* quanto para *downlink*. Algoritmos para alocação de largura de banda e controle de acesso devem acomodar centenas de terminais por canal, onde os terminais podem ser compartilhados por vários usuários. Os serviços solicitados pelos usuários são variados e incluem TDM de voz e dados, conectividade IP, voz sobre IP (VoIP), entre outros. Para

[18] AAS (*Advanced Antenna Systems*); ARQ (*Automatic Repeat reQuest*); STC (*Space-Time Coding*); Mesh (topologia de rede sem fio em malha, conhecida também como multiponto-a-multiponto). As opções ARQ e Mesh são brevemente comentadas na próxima subseção.

oferecer suporte a essa variedade de serviços, o MAC 802.16 deve acomodar tráfego contínuo e de rajada. Adicionalmente, esses serviços irão associar níveis de QoS de acordo com o tipo de tráfego. O MAC 802.16 provê uma larga escala de tipos de serviço, análogos às categorias de serviço mais clássicas como as do ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) até categorias mais recentes tais como o GFR[19] (*Guaranteed Frame Rate*). Além disso, oferece suporte às várias especificações da camada física, personalizadas para a faixa de freqüência em uso, e às regulamentações associadas a mesma [Eklund, 2002].

O protocolo MAC 802.16 deve oferecer suporte a uma variedade de requisições provenientes dos *backhauls*, incluindo o modo de transferência assíncrono (ATM) e protocolos baseados em pacotes. A convergência das subcamadas é usada para mapear o tráfego específico da camada de transporte para o MAC, que é flexível o suficiente para transmitir de forma eficiente qualquer tipo de tráfego. Através de características como supressão de cabeçalho da porção de dados, empacotamento e fragmentação, as subcamadas de convergência e MAC trabalham em conjunto para transmitir o tráfego de uma forma mais eficiente do que o mecanismo de transporte original [Eklund, 2002].

Questões que dizem respeito a eficiência do mecanismo de transporte são também abordadas na interface entre a camada MAC e a camada física. Por exemplo, os esquemas de modulação e codificação são especificados em um perfil de rajada que pode ser ajustado adaptativamente para cada assinante (estação), de forma a otimizar o uso da largura de banda garantindo a disponibilidade do enlace.

O mecanismo de requisição-concessão (controle de acesso) é projetado para ser escalável, eficiente e auto-ajustável. O sistema de acesso do 802.16 não perde em eficiência quando são utilizadas várias conexões por terminal, com diversos níveis de QoS, e um grande número de usuários multiplexados estatisticamente. Ele emprega uma larga variedade de mecanismos de requisição, balanceando a estabilidade do acesso sem contenção com a eficiência do acesso orientado à contenção.

Enquanto as especificações referentes aos mecanismos de alocação de largura de banda e de QoS foram amplamente discutidas, os detalhes referentes a técnicas de escalonamento e gerenciamento de reservas não foram padronizados, apontando aos fabricantes um nicho importante que pode ser explorado e oferecido aos clientes como um diferencial em seus equipamentos. A proposta mais significativa que aborda o mecanismo de escalonamento de recursos para o padrão 802.16 foi definida por Hawa [Hawa, 2002 e Hawa, 2003]. No seu trabalho, Hawa apresenta uma análise estocástica de mecanismos de escalonamento de recursos baseados na técnica de *Fair Queuing*, oferecendo suporte às garantias de QoS para largura de banda e retardo para as classes de serviço definidas no padrão IEEE 802.16.

Além das tarefas básicas de alocação de largura de banda e transporte de dados, a camada MAC inclui uma subcamada de privacidade que oferece autenticação ao acesso à rede e ao estabelecimento de conexão para evitar a perda de serviços, inclui ainda troca de chaves de segurança e criptografia para assegurar a privacidade dos dados.

Para acomodar as demandas da camada física e as diferentes requisições dos serviços oferecidos entre as freqüências de 2 – 11 GHz, o projeto 802.16a atualizou a camada MAC de modo a oferecer um mecanismo de requisição de repetição automática (ARQ – *Automatic Repeat reQuest*) e suporte à topologia em malha (Figura 2.9).

---

[19] Categoria de serviço aprovada pelo Fórum ATM com o objetivo de oferecer suporte ao tráfego TCP/IP em redes ATM.

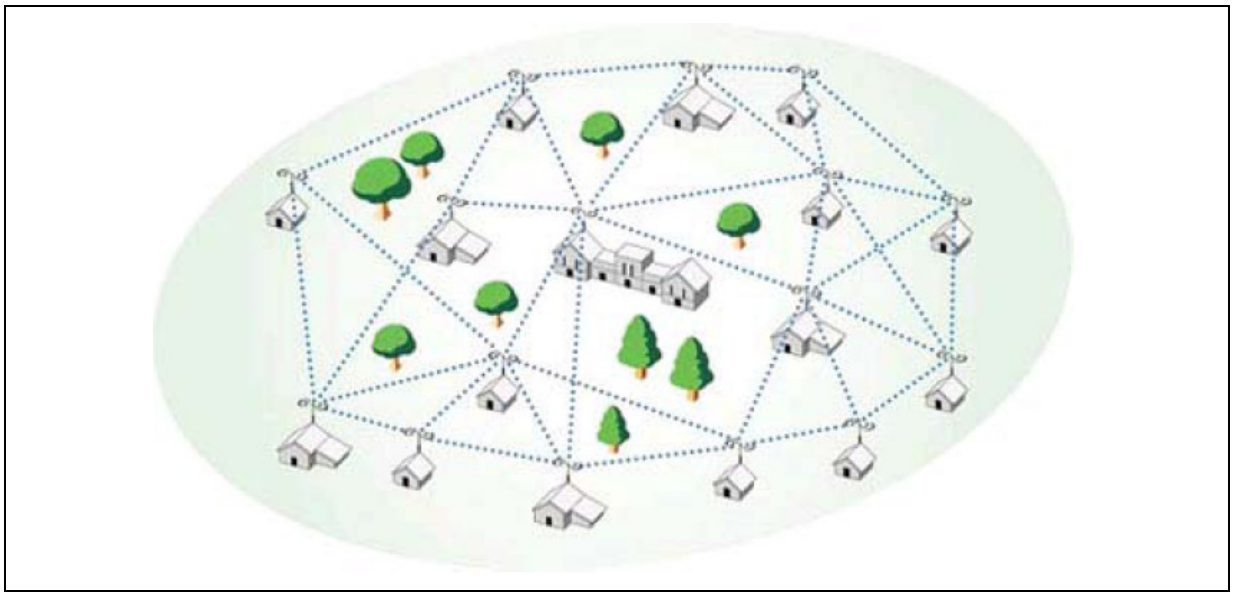


Figura 2.9 – Topologia em malha (*mesh*[20])

A Tabela 2.4 traz de forma resumida uma associação entre as principais características da camada MAC do protocolo IEEE 802.16a e os benefícios introduzidos por essas características.

Tabela 2.4 – Características da camada MAC do IEEE 802.16a [WiMAX, 2004]

Características	Benefícios
Escalonamento TDM/TDMA para *Uplink*/*Downlink*	+ Utilização eficiente da largura de banda
Escalável para centenas de assinantes	+ Possibilita uma distribuição efetiva de custos oferecendo suporte aos assinantes de modo a oferecer ao mercado um caso de negócio robusto
Orientado à conexão	+ QoS por conexão
	+ Roteamento/encaminhamento de pacotes mais rápido
QoS	+ Baixa latência para serviços sensíveis ao retardo (voz TDM, VoIP)
Oferece suporte às classes: UGS (*Unsolicited Grant Service*), rtPS (*Real-Time Polling Service*), nrtPS (*Non Real-Time Polling Service*) e BE (*Best Effort*)	+ Transporte de dados otimizado para o tráfego VBR (ex: vídeo)
	+ Priorização de dados
Requisição de retransmissão automática (ARQ)	+ Melhora o desempenho fim-a-fim ocultando os erros induzidos pela camada RF dos protocolos das camadas superiores
Modulação adaptativa	+ Permite taxas de dados mais elevadas de acordo com as condições do canal, o que melhora a capacidade do sistema

[20] *Mesh*: topologia de rede sem fio, conhecida também como multiponto-a-multiponto, na qual os assinantes (estações) dentro de uma área geográfica estão interconectados e podem atuar como estações repetidoras. Isso permite uma variedade de rotas entre o núcleo da rede e qualquer estação assinante. Sistemas *mesh* não possuem estações base no sentido convecional, como na topologia ponto-a-multiponto [IEEE Std 802.16.2-2001].

Características	Benefícios
Segurança e criptografia (Triple DES)	+ Protege a privacidade do usuário
Largura de banda sob demanda	+ Alocação de capacidade por *frame*
Controle de potência automático	+ Possibilita distribuições celulares minimizando a interferência

2.2 Tecnologias para Acesso Banda Larga à Internet

Nas seções anteriores, o padrão IEEE 802.16 foi apresentado como uma nova tecnologia para solucionar o problema de acesso banda larga à última milha. Nesta seção serão brevemente apresentadas uma série de tecnologias de comunicação disponíveis no mercado mundial que apresentam propostas similares [EFE, 2004; ANATEL, 2003]. Essas tecnologias se dividem de um modo geral em *fixas* e *sem fio*, como veremos a seguir.

Tecnologias Fixas

Dentre as tecnologias cabeadas, o DSL (*Digital Subscriber Line*) e o *cable modem* são as mais populares e dominam o mercado do continente americano. Enquanto essas tecnologias têm sido tipicamente implantadas nas redes existentes, algumas novas tecnologias de transmissão, como os cabos de fibra ótica, têm conquistado popularidade.

- *DSL*: As tecnologias DSL usam pares de cabos de cobre trançados e não necessitam da instalação de um novo cabeamento, o que elimina a necessidade de grandes investimentos em infra-estrutura. Elas utilizam freqüências diferentes para dividir a linha telefônica em dois canais: um para tráfego de voz e outro para dados. Isso é possível já que as redes telefônicas usam somente uma pequena porção da largura de banda disponível para o tráfego de voz. As velocidades obtidas em DSL são influenciadas pela distância entre o aparelho telefônico do assinante e a central telefônica, a qualidade da fiação interna da casa do assinante e do cabeamento externo da rede, assim como o tipo de tecnologia DSL empregada. A tecnologia DSL apresenta diversas variantes – ADSL (*Asymmetrical* DSL), SHDSL (*Single Pair High-Speed* DSL), SDSL (*Symmetrical* DSL). ADSL é uma forma de DSL na qual mais largura de banda é alocada para *download* do que para *upload*, ou seja, existe uma assimetria na distribuição da largura de banda consoante ao fluxo de informação. Essa característica a torna ideal para o uso típico da Internet. SHDSL (DSL simétrico de alta velocidade) é um padrão proprietário sendo utilizado principalmente na América do Norte. Esse padrão oferece um fluxo de tráfego equivalente nas duas direções e, assim como o SDSL (DSL simétrico), não pode compartilhar a linha com sinais analógicos. O SDSL apresenta uma taxa de transferência idêntica nas duas vias, transmitindo a mesma quantidade de dados, na mesma velocidade, em ambas as direções. O SDSL é apropriado para usuários que não apenas necessitam receber, mas também transmitir grandes volumes de dados. A capacidade do SDSL é ajustada de acordo com a qualidade do sinal e uma combinação de velocidade e distância podendo variar de 160 Kbps sobre 7 Kms a 1,5 Mbps sobre 3 Kms.
- *Cable Modem*: As redes cabeadas têm evoluído e com a adoção de novos equipamentos vem viabilizando o envio de dados em ambas as direções, utilizando diferentes canais em blocos separados de 6 MHz de freqüência (correspondendo a aproximadamente 30 Mbps), tornando o acesso à Internet sobre cabo uma solução

viável. Um canal envia dados da Internet para os usuários enquanto um outro é responsável pela recepção de dados do usuário. Entretanto, os assinantes em uma pequena área compartilham os mesmos canais para enviar e receber dados, dessa forma a largura de banda que o usuário recebe está associada a quantidade de largura de banda utilizada pelos seus vizinhos.

- *Fibra Ótica*: O cabo de fibra ótica usa laser ou diodos emissores de luz (LEDs) para transmitir pulsos de luz. Como as luzes utilizam freqüências mais altas, elas podem transmitir centenas de vezes mais dados do que os sinais elétricos ou as ondas de rádio.
- *Rede Elétrica*: Já que a rede de distribuição elétrica possui uma das maiores infra-estruturas instaladas no mundo, ultrapassando as redes telefônicas em tamanho e área de cobertura, a transmissão de dados através da tecnologia PLC (*Power Line Communication*) pode diminuir o custo da implantação de uma infra-estrutura de comunicação.
  De modo similar ao que acontece na tecnologia DSL, os sinais elétricos atuam como portadoras para a transmissão de dados entre a operadora e seus assinantes, transportando-os e efetuando a filtragem nos pontos finais. Na rede elétrica a energia é transmitida a uma taxa de 50 – 60 Hz enquanto em uma rede de dados convencional os dados trafegam a 1 MHz, o que evita a ocorrência de interferência e facilita a filtragem dos dados.

Tecnologias Sem Fio

As tecnologias móveis sem fio para banda larga podem ser classificadas como *satélite*, *rede local sem fio* (WLAN), *fixa sem fio*, *móvel sem fio* e *tecnologias óticas no espaço livre*.

- *Satélite*: É uma tecnologia geralmente mais cara do que a oferecida pelos outros mecanismos de provisão de acesso. É indicada para áreas remotas e regiões rurais. A adoção das tecnologias de satélite traz problemas como latência, segurança, menor largura de banda e qualidade inferior do sinal.
- *WLAN (Wireless LAN)*: Uma rede local sem fio é uma rede local com no mínimo um segmento usando ondas eletromagnéticas para transmitir e receber dados através de pequenas distâncias, sem utilizar a infra-estrutura cabeada, estabelecendo um ponto de acesso. Diversos fatores têm contribuído para o crescimento fenomenal das WLANs: a drástica redução de preços, os benefícios da mobilidade da conexão sem fio, disponibilidade *off-the-shelf* e fácil instalação. As WLANs foram padronizadas pelo IEEE 802.11 e ETSI HiperLAN (*High Performance Radio Local area Network*). O padrão IEEE 802.11b usa uma banda de freqüência de 2,4 GHz para oferecer uma taxa de transmissão de 11 Mbps com um alcance de 100 metros, embora obstáculos como árvores ou paredes entre os adaptadores e o ponto de acesso possam causar uma queda nas velocidades alcançadas. Já o padrão IEEE 802.11a utiliza a banda de freqüência de 5 MHz e viabiliza velocidades de até 54 Mbps, quase cinco vezes mais rápido do que o 802.11b. O padrão HiperLAN/2 opera na mesma freqüência do padrão 802.11a oferecendo taxas de transmissão de até 54 Mbps.
- *Fixa Sem Fio*: Usa freqüências entre 900 MHz e 40 GHz, com as freqüências mais altas capazes de transmitir dados a distâncias maiores mas incapazes de atingir as velocidades das freqüências mais baixas, o que requer visada direta (LOS). Entre as diversas tecnologias fixas sem fio podem ser citados o MMDS (*Multipoint Microwave Distribution System*) e LMDS (*Local Multipoint Distribution System*).

- *3G (Third Generation)*: As redes de telefonia móvel podem vir a ser apontadas como o meio preferencial para a provisão de acesso banda larga. O IMT-2000[21] é algumas vezes denominado "a banda larga para os telefones móveis". Na realidade, as velocidades disponíveis de 144 Kbps para rádios e 2 Mbps para ambientes *indoor* e de baixa mobilidade disponíveis atualmente nas implementações da tecnologia 3G são tecnicamente muito lentas. A despeito dos esforços para uma padronização global através do IMT-2000 nenhum consenso foi obtido. Existem cinco padrões terrestres (interfaces de rádio) baseadas em três tecnologias de acesso distintas (FDMA, TDMA e CDMA). A atenção da indústria tem se voltado para o W-CDMA (*Wideband* CDMA), conhecido na Europa como UMTS e CDMA2000, incluindo CDMA2000 lx, que é largamente implantado na Coréia e no Japão. Como a tecnologia e as velocidades vem sendo aprimoradas, a expectativa é que os preços diminuam.
- *FSO (Free Space Optic)*: As tecnologias óticas no espaço livre usam a mesma tecnologia de laser utilizada nas fibras óticas, mas sem a necessidade de fios, tomando vantagem das velocidades alcançadas pelo uso de ondas de luz infra-vermelha. Apesar da necessidade de se ter visada direta (LOS), velocidades de até 1,25 Gbps podem ser mantidas, oferecendo uma outra opção para solucionar o problema da última milha. Por constituir um canal de grande capacidade e não ocupar as faixas espectrais de rádio, já densamente ocupadas nas regiões metropolitanas, a transmissão ótica livre permite a instalação de pontos de distribuição em áreas de difícil acesso, como em ruas densamente povoadas, favelas, etc.

Após essa breve varredura nas tecnologias para acesso banda larga, serão apresentados os padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.20 para redes sem fio que se relacionam com o padrão 802.16 delineando um novo cenário de acesso banda larga *fixo* e *móvel* sem fio.

2.3 Relacionando os Padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.16

Os padrões IEEE 802.11 e 802.16 não são oponentes, na realidade são tecnologias complementares, solucionam problemas diferentes embora se assemelhem em alguns aspectos (Figura 2.10). Ambos criam "*hot spots*", ou seja, áreas ao redor de uma antena central na qual as pessoas podem compartilhar informações sem a necessidade de uma infra-estrutura fixa (conexão sem fio).

A principal diferença entre os dois padrões é que eles foram projetados para aplicações completamente diferentes. O padrão IEEE 802.11 é uma tecnologia para rede local desenvolvida com o objetivo de adicionar mobilidade às redes locais cabeadas privadas. O padrão IEEE 802.16, por outro lado, foi projetado para prover um serviço de acesso banda larga sem fio (BWA) a regiões metropolitanas. A idéia por trás do BWA é prover um serviço de acesso à Internet sem fio para localizações fixas, competindo com tecnologias como *cable modens* e DSL. Enquanto o mercado do 802.11 tem como alvo o usuário final, o foco do 802.16 está nos provedores de serviço de comunicação [Finneran, 2004].

O padrão IEEE 802.16 irá fornecer o *backhaul* para conectar *hotspots* 802.11, redes domésticas e mesmo redes empresariais e prover a extensão das conexões via cabo e DSL de modo a garantir o acesso banda larga de última milha (Figura 2.10). O padrão tem o potencial de possibilitar o acesso sem fio a milhões de usuários de forma fácil e com baixo custo.

---

[21] O IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications 2000*) é o padrão global para os sistemas de terceira geração (3G) de comunicação sem fio, definido por um conjunto de recomendações interdependentes do ITU.

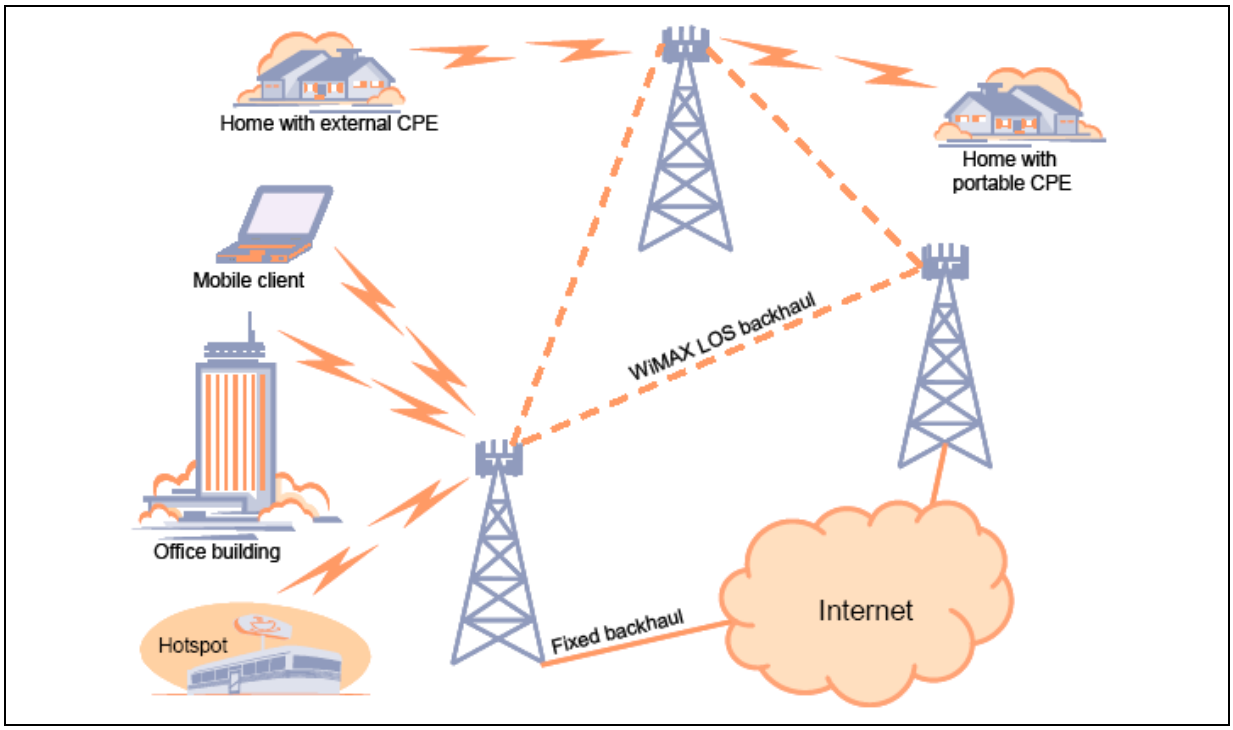


Figura 2.10 – Exemplificando a interoperabilidade entre o IEEE 802.11 e o IEEE 802.16 [Paolini, 2004]

A Tabela 2.5 apresenta um resumo das quatros especificações da família de padrões 802.11 aprovadas.

Tabela 2.5 – Interfaces de rádio do IEEE 802.11 [WiMAX Forum]

	IEEE 802.11	IEEE 802.11a	IEEE 802.11b	IEEE 802.11g
Homologação	Julho de 1997	Setembro de 1999	Setembro de 1999	Junho de 2003
Aplicação	Rede de dados sem fio	Acesso banda larga (LAN)	Rede de dados sem fio	Acesso banda larga (LAN)
Taxa Máxima de Transmissão	2 Mbps	54 Mbps	11 Mbps	54 Mbps
Alcance	100 m	50 m	100 m	100 m
Taxas de *Fallback*	1 Mbps	48 Mbps 36 Mbps 24 Mbps 18 Mbps 12 Mbps 9 Mbps 6 Mbps	5,5 Mbps 2 Mbps 1Mbps	48 Mbps 36 Mbps 24 Mbps 18 Mbps 12 Mbps 9 Mbps 6 Mbps
Número de Canais	79 (FHSS) 3 ou 6 (DSSS)	12	3	3
Freqüência	2,4 GHz	5 GHz	2,4 GHz	2,4 GHz
Modulação	FHSS ou DSSS	OFDM	DSSS	OFDM ou DSSS
Compatibilidade	802.11 (somente)	802.11a (somente)	802.11g	802.11b

A Tabela 2.6 traz de forma resumida uma comparação entre os padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.16. As diferenças são consideráveis, os padrões apresentam características diferentes pois buscam otimizar aspectos distintos.

Tabela 2.6 – Tabela comparativa: IEEE 802.11 x IEEE 802.16 [WiMAX Forum]

	IEEE 802.11	IEEE 802.16
Aplicação Inicial	LAN sem fio	Acesso à banda larga sem fio (BWA)
Taxa de Transmissão	54 Mbps (canal de 20 MHz)	100 Mbps (canal de 20 MHz)
Alcance	Otimizado para 100 m	Até 50 Kms
QoS	Nenhum (Em desenvolvimento: 802.11e)	QoS para voz e vídeo, diferenciação de serviços
Cobertura	Otimizada para NLOS *indoor*	LOS e NLOS Otimizada para NLOS *outdoor*
Segurança	802.11i	Triple-DES, RSA
Níveis de Serviço	Nenhum	Diferentes níveis de serviço oferecem suporte a requisições diferenciadas de largura de banda
Protocolo de Acesso	CSMA/CA (.11b/a/g)	Request/Grant (.16a)
Usuários	Centenas	Milhares

2.4 Relacionando os Padrões IEEE 802.20 e IEEE 802.16e

Paralelo ao IEEE 802.16 existe o grupo de trabalho do padrão IEEE 802.20 (conhecido como Mobile-Fi), ou *Mobile Broadband Wireless Access* (MBWA), que define novas especificações para as camadas física e MAC de modo a garantir a interoperabilidade dos sistemas BWA em um ambiente móvel, operando em bandas licenciadas abaixo de 3,5 GHz. O nome completo do padrão IEEE 802.20 (*Standard Air Interface for Mobile Broadband Wireless Access Systems Supporting Vehicular Mobility – Physical and Media Access Control Layer Specification*) resume a história dessa tecnologia.

A missão do padrão 802.20 é otimizar o transporte de dados baseado em IP, alcançando altas taxas de transmissão de dados (acima de 1 Mbps). O 802.20 oferece suporte à mobilidade veicular de alta velocidade (até 250 Km/h[22]) em ambientes de redes metropolitanas, sendo projetado para garantir alta eficiência espectral e baixa latência. Essas garantias são obtidas graças aos valores atingidos pelo 802.20 para as taxas de transmissão de dados e o número de usuários ativos, que são significativamente mais elevados do que aqueles alcançados pelos sistemas móveis existentes. O objetivo do 802.20 é habilitar o desenvolvimento global do acesso banda larga sem fio ubíquo, interoperável entre diferentes vendedores, atendendo as necessidades de usuários residenciais e empresariais [MBWA WG].

Como uma resposta ao desafio lançado pelo 802.20 vem sendo especificado o padrão **IEEE 802.16e** cuja proposta é estudar a ampliação do padrão 802.16, estendendo a sua pilha de

[22] Valor definido na recomendação ITU-R M.1034-1 [ITU-R M.1034-1].

protocolos (Figura 2.3), de modo a também atender aos usuários finais móveis desde que estes trafeguem em velocidades bem inferiores aos 250 Km/h garantidos pelo padrão 802.20, aproximadamente 150 Km/h (Figura 2.11).

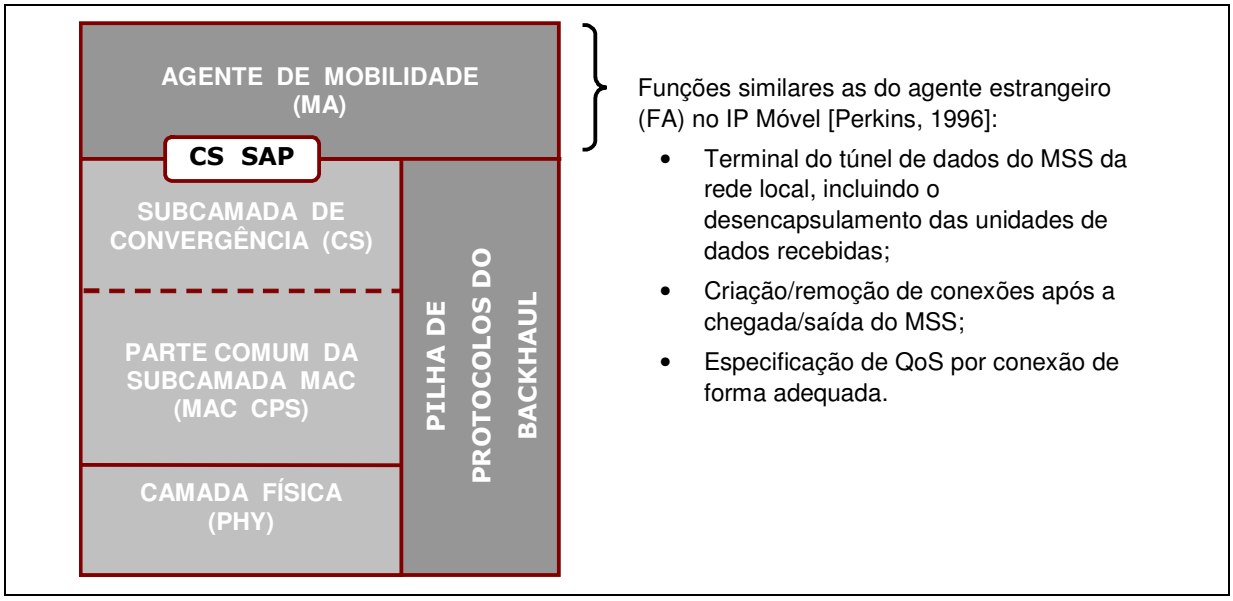


Figura 2.11 – Pilha de protocolos do IEEE 802.16e para estações base[23] [WiMAX Forum]

Aparentemente os dois padrões parecem muito similares, mas existem algumas importantes diferenças entre eles. Como exemplo podemos mencionar a faixa de freqüência, o 802.16e se propõe a oferecer suporte à mobilidade nas bandas licenciadas de 2 – 6 GHz, enquanto o 802.20 irá operar nas bandas licenciadas inferiores a 3.5 GHz.

Apesar das especulações quanto a adoção de um (.16e) ou outro (.20) pelo mercado, o IEEE garante que os dois padrões não são concorrentes e sim complementares. Essencialmente, o 802.16e visa a mobilidade do usuário caminhando com um PDA ou laptop, enquanto o 802.20 cobre questões relativas à mobilidade de alta velocidade. A diferença principal será a forma como os dois padrões serão implantados. A suposição do IEEE é que os provedores de serviços de comunicação irão implantar o 802.16e nas instalações já existentes (802.16a). Já com o 802.20 ocorrerá o oposto, os provedores de serviço estão interessados em uma cobertura mais ubíqua e que requererá uma base de instalação de equipamentos bem maior.

A Tabela 2.7 traz de forma resumida uma comparação entre os padrões IEEE para a banda larga móvel.

Tabela 2.7 – Tabela comparativa: IEEE 802.20 x IEEE 802.16e [WiMAX Forum]

	IEEE 802.20	IEEE 802.16e
Freqüência	< 3,5 GHz (bandas licenciadas)	2 – 6 GHz (bandas licenciadas)
Largura de Banda (escalabilidade)	1,25 MHz (2 x 1,25 MHz FDD e 2,5 MHz TDD) 5MHz	Otimizado para canais com largura de banda > 5 MHz

[23] A pilha de protocolos utilizada nas estações móveis dos assinantes do padrão IEEE 802.16e é a mesma ilustrada na Figura 2.3.

	IEEE 802.20	IEEE 802.16e
Alcance	Acesso à região metropolitana, células com cobertura superior a 15 Kms, NLOS, MAN ubíqua, mobilidade e roaming global (250 Km/h)	Acesso à região metropolitana, NLOS, oferece suporte à mobilidade mantendo compatibilidade com o 802.16a (aproximadamente 150 Km/h)
Taxa de Transmissão	Por célula: > 4 Mbps (DL) > 800 Kbps (UL) Por usuário: > 1 Mbps (DL) > 300 Kbps (UL)	Altas taxas de dados (até 15 Mbps – canal de 5 Mhz)
Segurança	AES	Triple DES, RSA
QoS	Em estudo	Canalização e controle para serviços multimídia com QoS

O padrão 802.16 está sendo desenvolvido para tornar os equipamentos mais baratos e interoperáveis. Segundo analistas de mercado [Broersma, 2004], equipamentos usando o padrão fixo 802.16-REVd devem chegar ao mercado ainda em 2004 e devem ser certificados em 2005. O fórum WiMAX promete que uma atualização relativamente fácil, acrescentando aspectos de mobilidade, será adicionada pelo padrão 802.16e, entretanto no mercado há uma crença de que os equipamentos baseados no 802.16e não estarão disponíveis antes de 2007.

O WiMAX tem a intenção de substituir dois tipos distintos de tecnologia banda larga sem fio: *fixa sem fio* – que deve competir com ADSL e *cable modens* – e *móvel sem fio*, que disponibiliza velocidades de banda larga às localidades pertencentes a uma área de cobertura, incluindo veículos em movimento ou lugares públicos. WiMAX móvel pode complementar os *hotspots* 3G e Wi-Fi.

O lado fixo do WiMAX está a caminho da comercialização, mas de acordo com dados da pesquisa realizada pela Gartner[24] o WiMAX móvel (IEEE 802.16e) não estará disponível para uso comercial antes de 2009. Segundo analistas da Gartner, a solução para o BWA oferecida até o momento pelo WiMAX representa uma solução fixa sem fio que, como já mencionado, representa uma alternativa às tecnologias DSL. WiMAX móvel é uma tecnologia celular nova e ainda tem um longo caminho a percorrer.

2.5 Interoperabilidade entre os Padrões IEEE 802.11, 802.16 e 802.20

As Subseções 2.1, 2.2 e 2.2 apresentaram brevemente os padrões IEEE 802.11, 802.16 e 802.20, relacionando-os como padrões complementares para o acesso sem fio às redes de comunicação de dados. O objetivo desta seção é trazer um resumo comparativo entre os três padrões, ilustrado na Tabela 2.8.

Tabela 2.8 – Tabela comparativa: IEEE 802.11, IEEE 802.16 e IEEE 802.20 [WiMAX Forum]

	IEEE 802.11	IEEE 802.16	IEEE 802.20
Freqüência	2,4 GHz e 5 GHz	10 – 66 GHz 2 – 11 GHz	< 3,5 GHz

[24] Gartner, Inc.: http://www.gartner.com.

	IEEE 802.11	IEEE 802.16	IEEE 802.20
Espectro	Bandas não licenciadas	Bandas licenciadas e não licenciadas	Bandas licenciadas
Tipo de Acesso	LAN	MAN	MAN
Mobilidade	Portabilidade	Fixa, móvel	Mobilidade com velocidade veicular
Energia da Estação	Bateria	Rede elétrica e bateria	Bateria
LOS / NLOS	NLOS	LOS (10 – 66 GHz) NLOS (2 – 11 GHz)	NLOS
Especificações	Camadas física e MAC para LAN	Camadas física e MAC para MAN. Acesso sem fio.	Camadas física e MAC para mobilidade com velocidade veicular

A Figura 2.12 ilustra as plataformas que oferecem interoperabilidade entre as tecnologias para comunicação sem fio. A mobilidade do usuário é classificada em *fixa*, *portátil* (nômade) e *móvel*. Para a mobilidade fixa é apresentado o padrão IEEE 802.16 como um *backhaul* para *hotspots* IEEE 802.11 e para acesso residencial. Na categoria de mobilidade portátil os padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.16e garantem o acesso sem fio. Quando o tipo de mobilidade desejado tem como foco atender a usuários se deslocando com altas taxas de velocidades (até 250 Km/h) o padrão indicado é o IEEE 802.20.

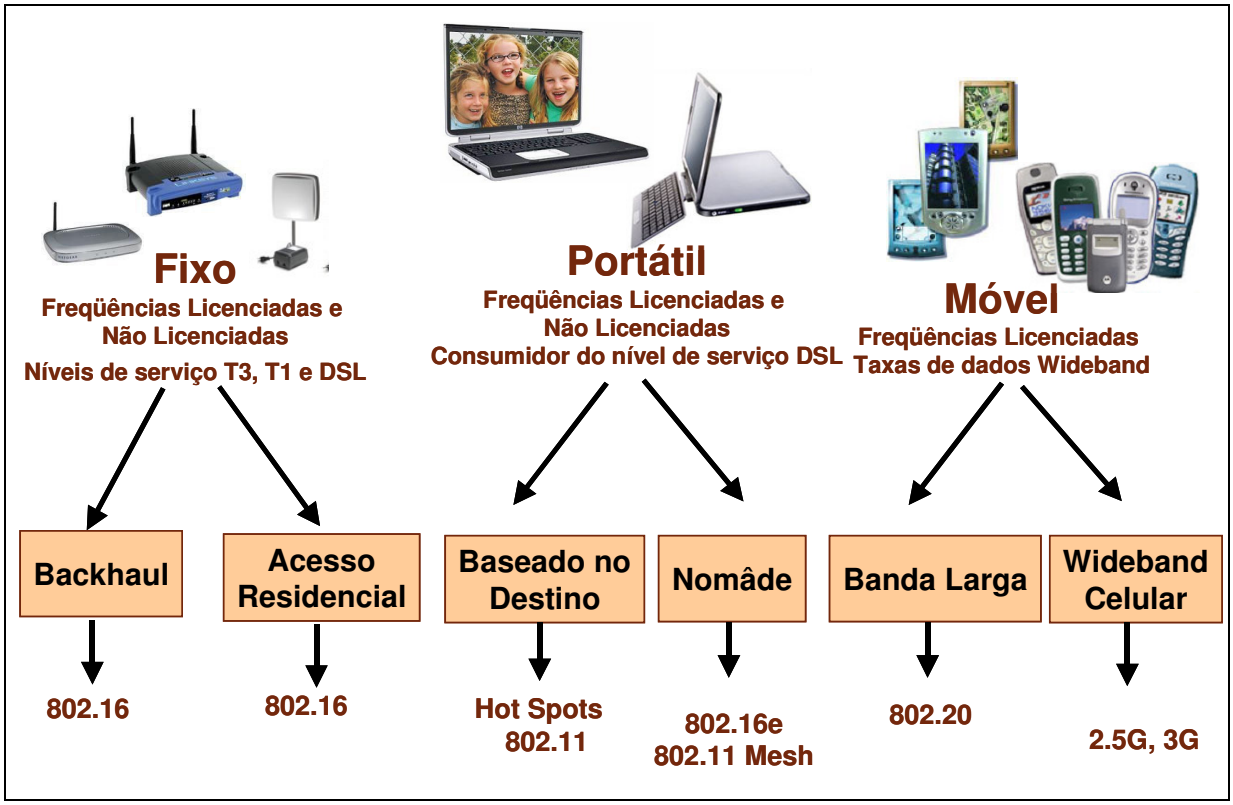


Figura 2.12 – Plataformas de Interoperabilidade sem fio

A Figura 2.13 faz uma releitura da Figura 2.12 tendo como foco as taxas de transmissão oferecidas por cada uma das diferentes tecnologias sem fio, destacando as que já foram implantadas comercialmente e aquelas que ainda estão na fase de desenvolvimento (padronização). A proposta da Figura 2.13 é mapear de forma comparativa as taxas de

transmissão dos usuários nas diferentes tecnologias de acesso através de um gráfico, apresentando na tabela à esquerda da figura a largura de banda em uso por cada padrão.

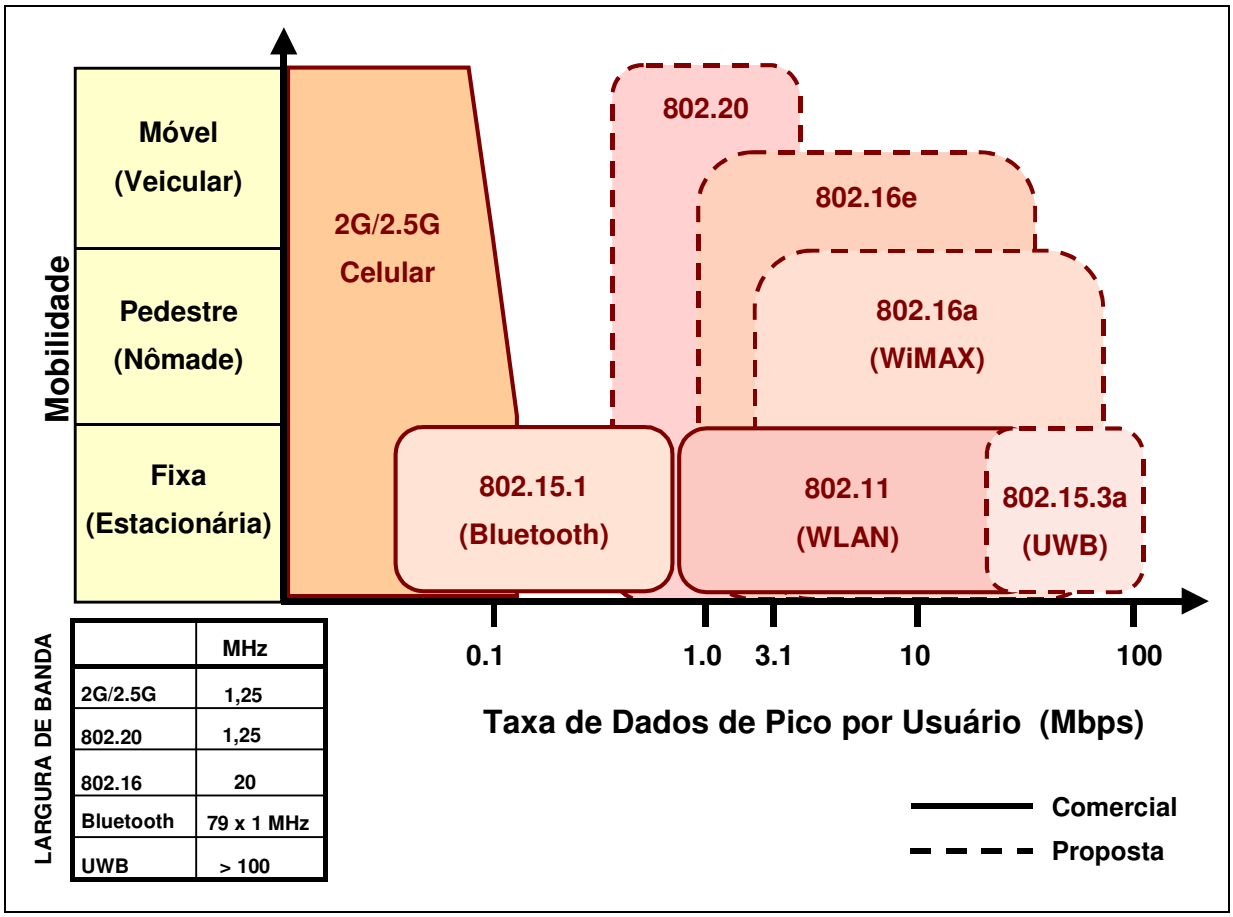


Figura 2.13 – Plataformas de Interoperabilidade sem fio:comparativo das taxas de transmissão

3 Provisão de QoS em Redes Banda Larga Sem Fio

A grande popularidade e disseminação que a Internet vem atingindo nos últimos anos tem despertado o interesse de diversos segmentos, o que tem levado a se pensar na Internet sem fio como a rede do futuro, entretanto, ainda existe um número considerável de questões técnicas que necessitam ser solucionadas. A Internet usa o protocolo IP, que foi originalmente desenvolvido para prover um mecanismo único de entrega de pacotes baseado no serviço de melhor esforço. Esse mecanismo não se mostra eficaz para lidar com a heterogeneidade de tráfego existente que apresenta requisitos distintos dependendo do tipo de serviço sendo oferecido. Para solucionar esse problema deve-se empregar uma infra-estrutura comum de modo a prover diferentes camadas de serviço que se adequem as necessidades dos usuários. Essa solução não reflete o estado atual da Internet.

Um pré-requisito para oferecer serviços multimídia sobre redes sem fio comutadas por pacotes é a provisão de novos mecanismos que permitam a essas redes tratar os pacotes de dados de forma diferenciada, de acordo com as suas limitações e exigências de desempenho. Esses novos mecanismos são coletivamente incluídos em um conceito mais amplo, conhecido como *arquitetura de qualidade de serviço* (QoS). Uma característica desejável em uma arquitetura de QoS para redes sem fio é a capacidade de prover aos usuários sem fio as

mesmas garantias de QoS oferecidas atualmente aos usuários de ambientes cabeados. Nessa arquitetura, a Internet, que é uma rede comutada por pacote, terá suas funcionalidades enriquecidas através de ferramentas que viabilizem o tratamento diferenciado dos pacotes. Um bom exemplo é verificado com o tráfego de tempo real, a transmissão de seus pacotes teria prioridade sobre a das demais categorias de serviço, permitindo que eles chegassem ao seu destino dentro dos limites de retardo requisitados [Hawa, 2003].

A provisão de qualidade de serviço em redes comutadas por pacote pode ser classificada de acordo com um conjunto de parâmetros cuidadosamente selecionado, incluindo: *retardo*, *variação do retardo*, *largura de banda* e *taxa de erro*. A manutenção da QoS nesse tipo de rede requer mecanismos sofisticados de controle e supervisão (conhecidos como funções de gerenciamento de QoS) para assegurar que os parâmetros de QoS solicitados possam não apenas ser obtidos mas ter a garantia da sua manutenção.

A Internet, como é conhecida atualmente, tem sido expandida para o domínio sem fio, especialmente nos últimos anos. As tecnologias sem fio estão ganhando cada vez mais popularidade dentro de ambientes de convivência (trabalho, estudo, etc), os quais exigem sempre mais agilidade e mobilidade. A expectativa é que em um futuro próximo os usuários móveis sejam capazes de acessar de forma transparente as redes de comunicação a partir de qualquer lugar no mundo, a qualquer momento.

A perspectiva de um cenário totalmente móvel (conexão sem fio + dispositivo móvel + Internet sem fio) alimenta o desejo de oferecer aos usuários sem fio conteúdos multimídia, estendendo às redes sem fio as mesmas garantias de QoS fornecidas para as redes cabeadas. O usuário final com um terminal móvel deve ser capaz de usar as mesmas aplicações disponíveis para os usuário em terminais fixos com uma degradação mínima do serviço.

Por ser um meio de natureza inerentemente compartilhada, os ambientes sem fio exigem a adição de um nível extra de complexidade à pilha de protocolos. Quando se fala em redes sem fio, esse novo nível de complexidade é geralmente representado pelo *protocolo de controle de acesso ao meio* (MAC). A camada MAC sem fio é um dos principais componentes na implementação de mecanismos de provisão de QoS. Ela define como a interface aérea deve ser compartilhada entre os usuários em um canal sem fio, tendo dessa forma um impacto significativo no desempenho percebido pelo usuário, na capacidade do sistema e na complexidade no terminal remoto.

A provisão de QoS em uma infra-estrutura sem fio impõe uma série de desafios tecnológicos que não existem nas redes cabeadas. Esses desafios são gerados a partir das próprias limitações do meio sem fio, tais como interferência e desvanecimento do sinal, altas taxas de erro, limitação da largura de banda disponível, entre outros, incorrendo em constantes flutuações na disponibilidade de recursos, que são peculiares aos enlaces sem fio.

Como foi visto na Subseção 2.2 , recentemente várias tecnologias de alta velocidade para a última milha têm sido exploradas para prover acesso à Internet e oferecer serviços multimídia aos usuários finais, dentre essas tecnologias destacam-se as redes híbridas de fibra ótica e cabo coaxial (HFC - *Hybrid Fiber Coax*), as redes de acesso baseadas nas diferentes tecnologias DSL, o acesso via satélite e os sistemas de acesso banda larga sem fio (BWA) fixos. O padrão de fato para a entrega de serviços banda larga para as redes HFC é o protocolo DOCSIS (*Data Over Cable Service Interface Specifications*). Como foi mencionado nas Seções 0 e 2 , o IEEE desenvolveu o protocolo IEEE 802.16 com esse mesmo propósito.

3.1 Arquiteturas de QoS do IETF para Internet Cabeada

Parte do esforço para oferecer suporte ao mecanismo de provisão de qualidade de serviço às aplicações sobre a Internet conduziram o IETF (*Internet Engineering Task Force*) ao desenvolvimento de dois modelos de QoS: o modelo de *serviços integrados* (*IntServ – Integrated Services*) [Braden, 1994] e o modelo de *serviços diferenciados* (*DiffServ – Differentiated Services*) [Blake, 1998].

3.1.1 Modelo de Serviços Integrados

O modelo de serviços integrados lembra em muitos aspectos a arquitetura de QoS das redes ATM. A suposição principal é a de que os recursos (por exemplo, largura de banda, espaço em *buffers*) devem ser reservados explicitamente para cada aplicação de tempo real de modo a prover o nível de QoS especificado. Um protocolo para reserva de recursos (RSVP – *Resource reSerVation Protocol*) [Braden, 1997] é definido para permitir às aplicações reservar recursos de uma forma explícita em cada roteador no instante de configuração de cada chamada [Hawa, 2003], seguindo uma abordagem distribuída e dinâmica.

Rotinas de controle de admissão de chamadas (CAC – *Call Admission Control*) determinam quando uma requisição para recursos pode ser atendida ou não com base no conhecimento total dos recursos disponíveis na rede e nos fluxos já configurados. O *IntServ* apresenta como uma de suas principais características a alta granularidade na alocação de recursos, que é realizada para fluxos individuais. Devido a essa característica o modelo apresenta uma carga de processamento e sinalização muito elevada, não oferecendo uma solução escalável, sendo indicado para uso em redes pequenas ou em redes virtuais privadas (VPNs – *Virtual Private Networks*).

3.1.2 Modelo de Serviços Diferenciados

O *DiffServ* é definido como uma arquitetura para implementação de diferenciação escalável de serviços na Internet. A diferenciação de serviços se baseia em um modelo simples onde o tráfego que entra em um domínio da rede é classificado e condicionado nas fronteiras do domínio, sendo associado a agregadores de comportamento específicos (BA – *Behavior Aggregates*), com cada BA sendo identificado por um código único (DSCP – *DiffServ Code Point*).

O *DiffServ* categoriza o tráfego em diferentes classes. Os pacotes recebem uma marcação no *byte* que corresponde ao tipo de serviço do cabeçalho IP, de acordo com as classes as quais pertençam. Um padrão de 6 bits, o DSCP, é atribuído ao campo ToS (*Type of Service*) ou TCO (*Traffic Class Octet*) dos cabeçalhos dos protocolos IPv4 e IPv6, respectivamente [Figueiredo, 2004]. Os usuários solicitam um nível específico de desempenho preenchendo o campo relativo ao DSCP com um dado valor em cada pacote enviado. Dentro do núcleo da rede, os pacotes são tratados pelos agregadores de acordo com o valor do seu DSCP. A escalabilidade é a característica que se destaca no *framework* do modelo *DiffServ*. Ela é alcançada através da transferência da complexidade do sistema, que antes se concentrava no núcleo da rede (modelo *Intserv*), para os roteadores de borda que processam um volume menor de tráfego. Essa modificação possibilitou a oferta de serviços para tráfegos agregados, reduzindo significativamente a carga de processamento e sinalização do modelo, já que o tráfego não é mais tratado de forma individualizada (fluxos individuais) [Hawa, 2003].

3.2 QoS no Padrão IEEE 802.16

Na especificação para a interface aérea do padrão IEEE 802.16 [IEEE Std 802.16-2001] a definição de QoS está associada a conceitos como: classificação, escalonamento por fluxos de serviço e estabelecimento de serviço (Figura 3.1).

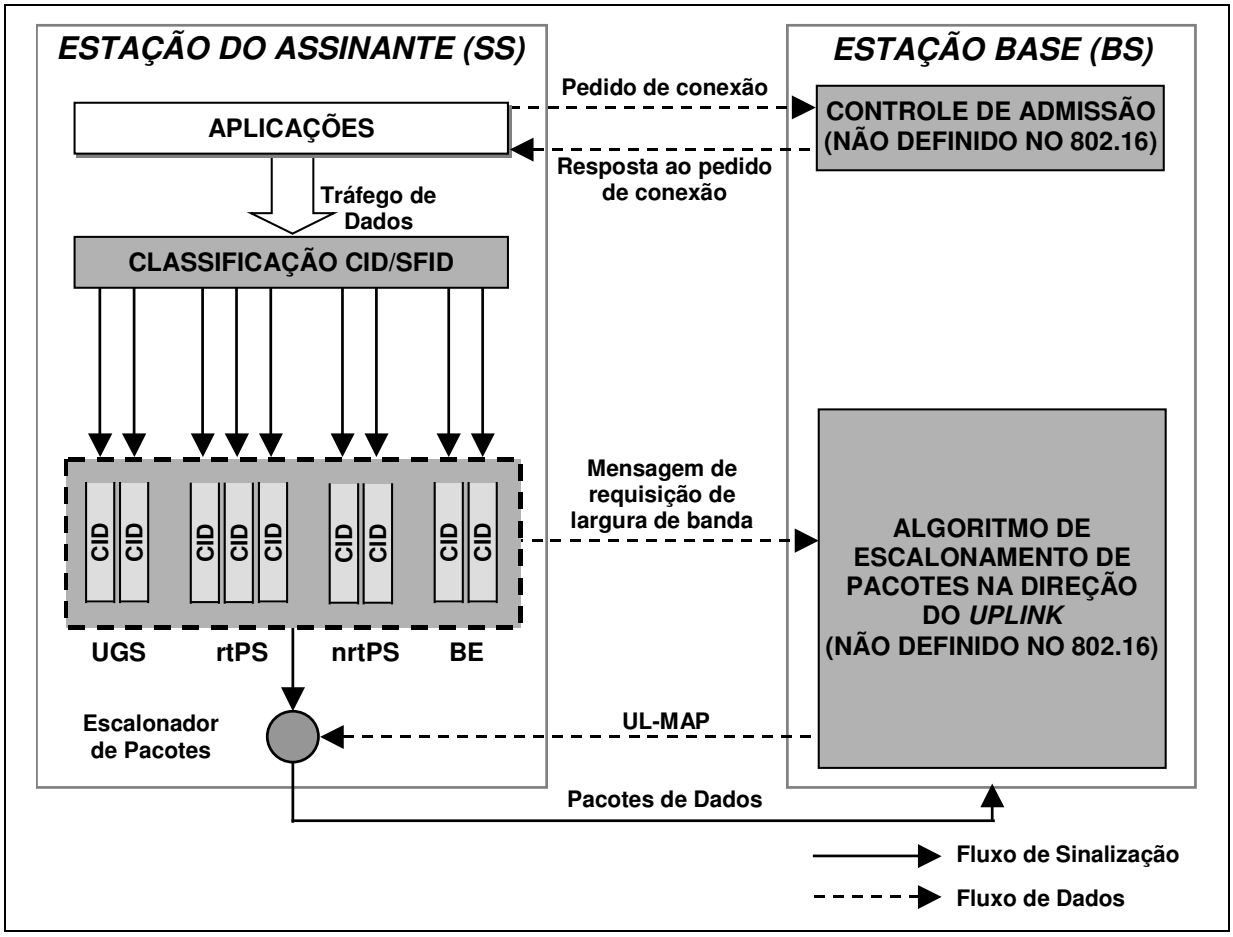


Figura 3.1 – Arquitetura de QoS do padrão IEEE 802.16 [Chen, 2004]

Segundo o padrão [IEEE Std 802.16-2001], as requisições de QoS incluem:

- Função de configuração e registro para pré-configuração da estação do assinante com base nos fluxos de serviço de QoS e parâmetros de tráfego.
- Função de sinalização para o estabelecimento dinâmico de fluxos de serviço com QoS e parâmetros de tráfego.
- Utilização de escalonamento MAC e parâmetros de tráfego de QoS para os fluxos de serviço do *uplink*.
- Utilização de parâmetros de tráfego de QoS para os fluxos de serviço do *downlink*.
- Agrupamento das propriedades de um fluxo de serviço em *Classes de Serviço*, de modo que as entidades das camadas superiores e as aplicações externas requisitem os fluxos de serviço de acordo com os parâmetros de QoS desejados, garantindo uma consistência global.

O mecanismo mais importante na provisão de QoS está associado à transferência de pacotes da interface MAC através de um fluxo de serviço identificado de forma única por um

CID (*Connection IDentifier*). Um fluxo de serviço é um fluxo unidirecional de pacotes ao qual está associado um nível de QoS específico. A estação do assinante (SS - *Subscriber Station*) e a estação base (BS – *Base Station*) garantem a qualidade de serviço de acordo com o conjunto de parâmetros de QoS definidos para o fluxo. A Figura 3.2 ilustra a arquitetura de QoS do padrão IEEE 802.16 para a estação do assinante e a Figura 3.3 para a estação base.

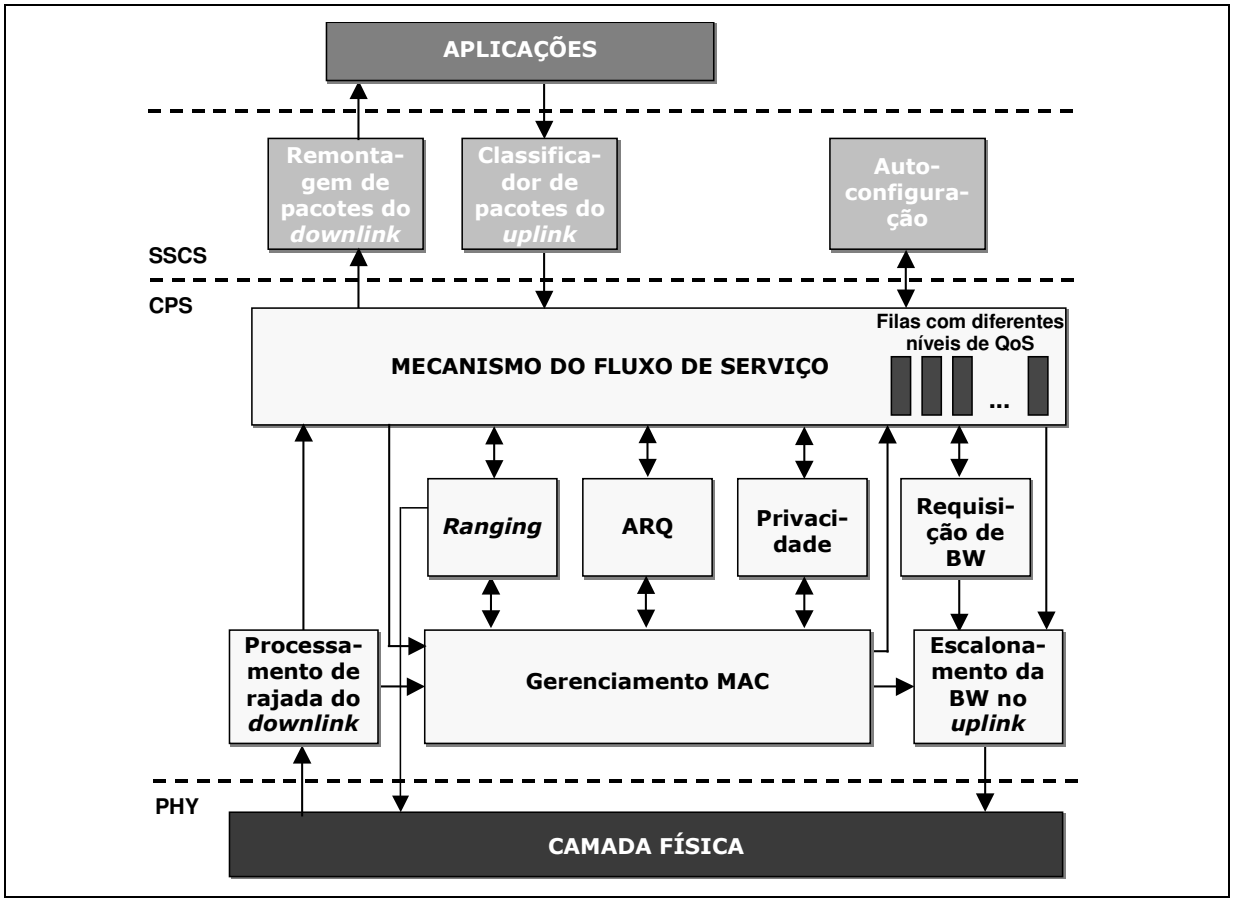


Figura 3.2 – Arquitetura da camada MAC na estação do assinante [Yaghoobi, 2003]

O objetivo de se definir parâmetros de QoS é especificar a ordem de transmissão e o escalonamento dos fluxos de serviço na interface aérea. Entretanto, esses parâmetros devem ser identificados e tratados por outros mecanismos na rede (externos a interface aérea) de modo que se possa oferecer QoS fim-a-fim, bem como garantir o policiamento do comportamento das SSs.

Os fluxos de serviço são definidos nas duas direções de transmissão (*uplink* e *downlink*) e podem existir mesmo sem que tenham sido ativados para a transmissão do tráfego. Os fluxos de serviço possuem um identificador de 32 bits denominado SFID (*Service Flow IDentifier*); fluxos de serviço ativos têm um identificador de conexão de 16 bits (CID).

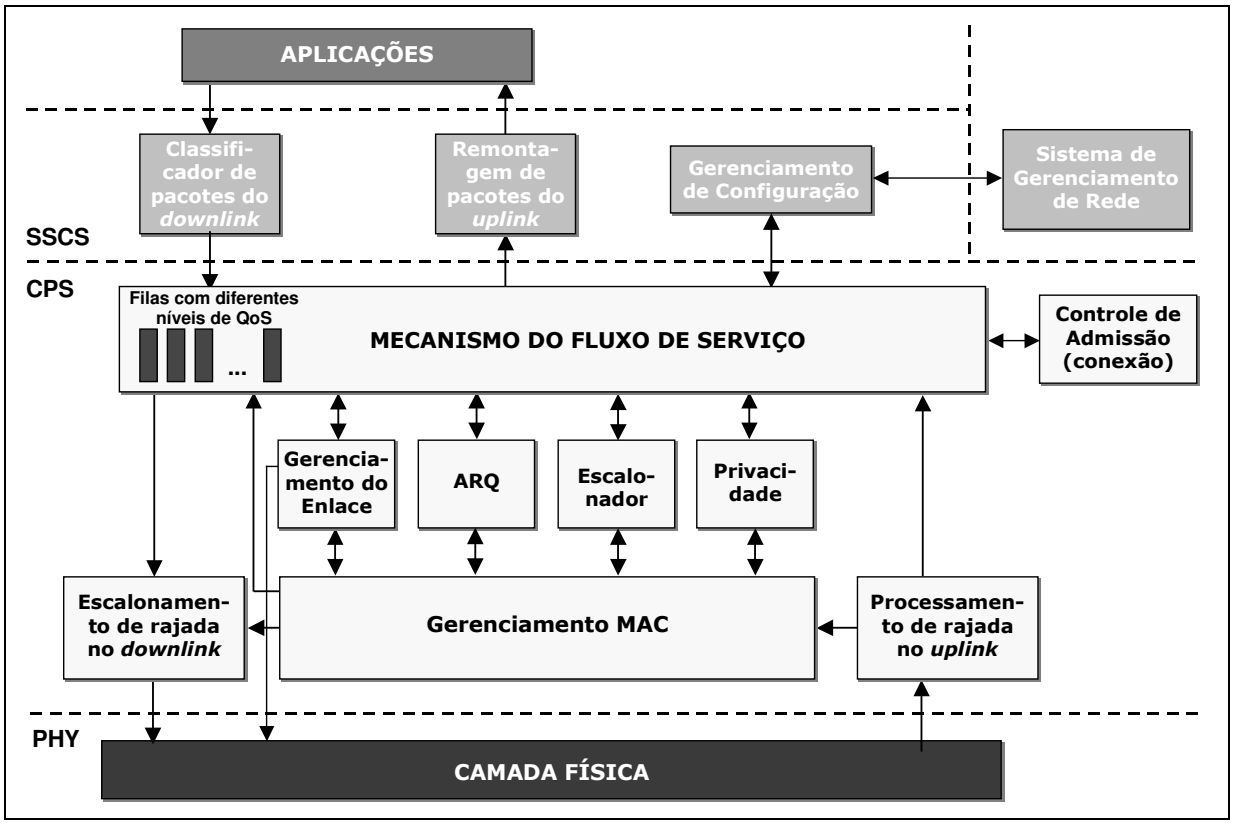


Figura 3.3 – Arquitetura da camada MAC na estação base [Yaghoobi, 2003]

3.2.1 Modelo de Objetos

Os principais objetos da arquitetura de provisão de QoS do padrão IEEE 802.16 são ilustrados na Figura 3.4. Os atributos sublinhados identificam de forma única os objetos ao qual pertencem. Os atributos opcionais são denotados por colchetes. O relacionamento entre o número de objetos é marcado ao final de cada linha de associação entre eles. Por exemplo, um fluxo de serviço pode estar associado com *0* ou *N* (muitos) PDUs, mas um PDU é associado com exatamente um fluxo de serviço. O fluxo de serviço é o conceito central do protocolo MAC. Como mencionado anteriormente, ele é identificado unicamente através de um SFID. Os fluxos de serviço podem estar na direção de *uplink* ou de *downlink*. Os fluxos de serviço admitidos são mapeados pelo CID.

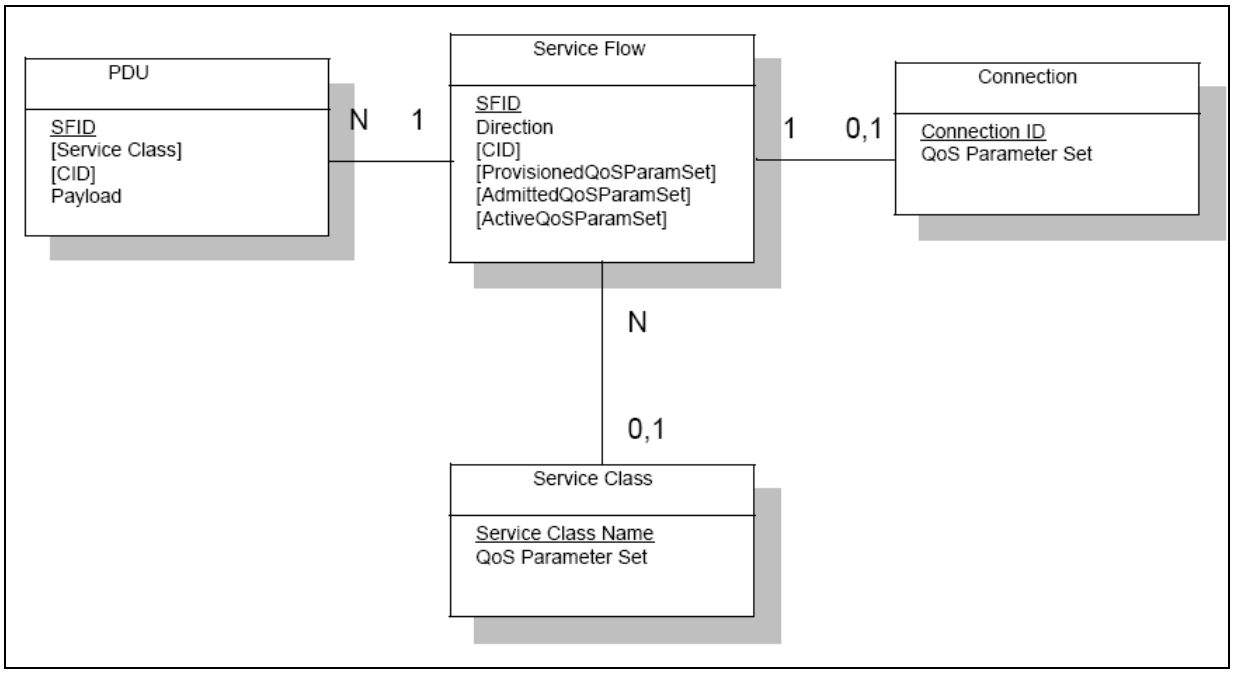


Figura 3.4 – Teoria do modelo do objeto de operação [IEEE Std 802.16-2001]

3.2.2 Fluxos de Serviço

Um *Fluxo de Serviço* é um serviço de transporte da camada MAC responsável pela transmissão unidirecional dos pacotes provenientes da estação do assinante (*uplink*) ou da estação base (*downlink*)[25]. Um fluxo de serviço é caracterizado por um conjunto de parâmetros de QoS tais como latência, retardo e garantias de vazão. Com o propósito de padronizar a operação entre a SS e a BS, esses parâmetros incluem detalhes de como a SS solicita *mini-slots* para *uplink* e o comportamento esperado do escalonador de *uplink* da BS.

Os fluxos de serviço são parcialmente caracterizados pelos seguintes atributos:

- *Identificador do Fluxo de Serviço* (SFID): Um SFID é assinalado para todos os fluxos de serviço existentes. O SFID serve como o principal identificador na SS e na BS para o fluxo. Um fluxo de serviço tem no mínimo um SFID e uma direção associada.
- *Identificador da Conexão* (CID): O mapeamento para um SFID somente é realizado quando a conexão tem seu(s) fluxo(s) de serviço admitido(s).
- *ProvisionedQoSParamSet*: Um conjunto de parâmetros de QoS fornecido por mecanismos externos aos definidos no padrão 802.16, como, por exemplo, pelo sistema de gerenciamento de rede.
- *AdmittedQoSParamSet*: Define um conjunto de parâmetros de QoS para os quais a BS (e possivelmente a SS) reserva recursos. O principal recurso reservado é a largura de banda, mas outros recursos também podem ser reservados (por exemplo, memória) para viabilizar a ativação do fluxo.

[25] Um *fluxo de serviço*, como definido no escopo do padrão IEEE 802.16, não tem nenhum relacionamento direto com o conceito de "fluxo" definido pelo grupo de trabalho *Integrated Services* (IntServ) do IETF [Shenker, 1997]. Um fluxo *intserv* é uma coleção de pacotes que compartilham os pontos finais da camada de transporte. Diversos fluxos *intserv* podem ser servidos por um único fluxo de serviço 802.16.

- *ActiveQoSParamSet*: Especifica um conjunto de parâmetros de QoS que define o serviço sendo atualmente provido para o fluxo de serviço. Somente um fluxo de serviço ativo pode encaminhar pacotes.
- *Authorization Module*: Uma função lógica dentro da BS que aprova ou rejeita cada mudança nos *parâmetros de QoS* e *classificadores* associados a um fluxo de serviço. Para tanto, define um "envelope" que limita os possíveis valores dos conjuntos de parâmetros *AdmittedQoSParamSet* e *ActiveQoSParamSet*.

O relacionamento entre os conjuntos de parâmetros de QoS é ilustrado na Figura 3.5 e na Figura 3.6. O *ActiveQoSParamSet* é sempre um subconjunto do *AdmittedQoSParamSet*, que é sempre um subconjunto do "envelope" de autorização. No modelo de autorização dinâmico (Figura 3.6), esse envelope é determinado pelo Módulo de Autorização (rotulado como *AuthorizedQoSParamSet*). No modelo de autorização provisionado (Figura 3.5) esse envelope é determinado pelo *ProvisionedQoSParamSet*.

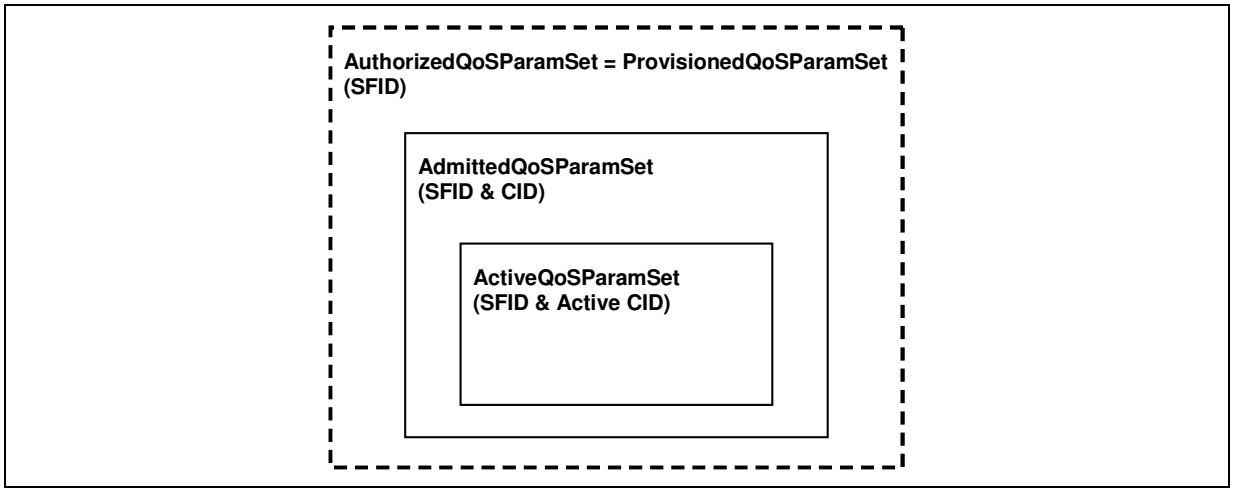


Figura 3.5 – "Envelope" do Modelo de Autorização Provisionado [IEEE Std 802.16-2001]

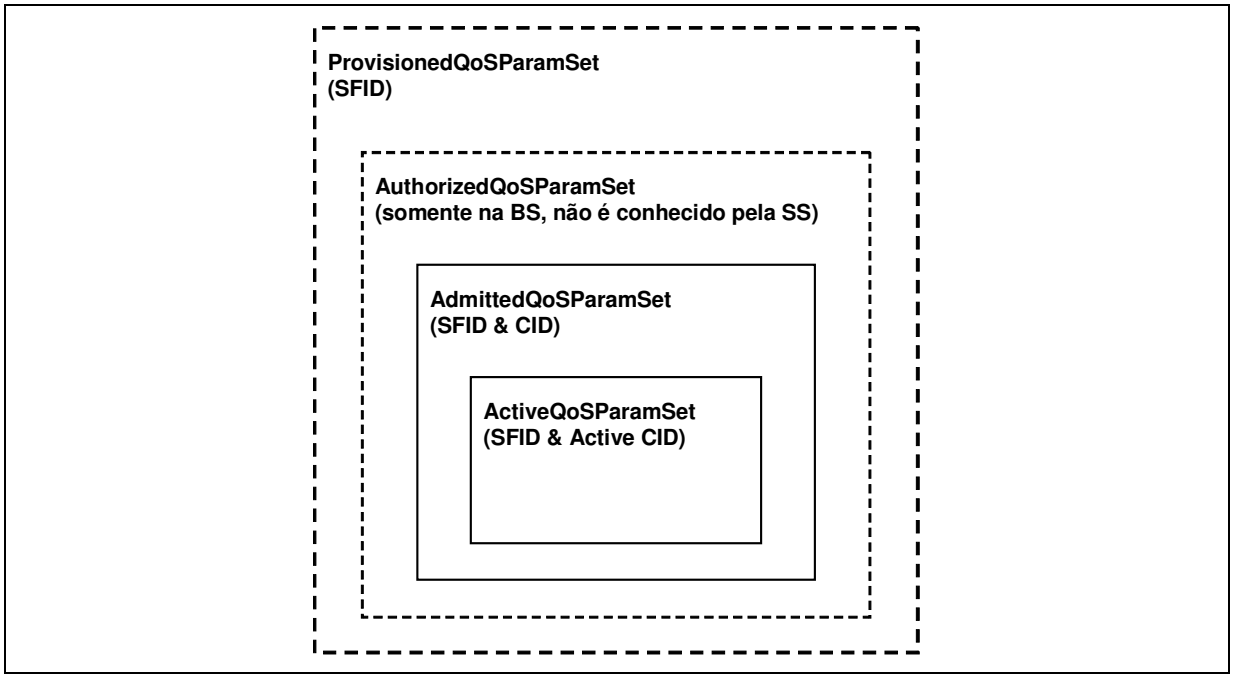


Figura 3.6 – "Envelopes" do Modelo de Autorização Dinâmico [IEEE Std 802.16-2001]

É interessante pensar em três tipos de fluxos de serviço:

- *Provisionado*: Conhecido pela provisão, por exemplo, do sistema de gerenciamento de rede. Os conjuntos de parâmetros *AdmittedQoSParamSet* e *ActiveQoSParamSet* para esse tipo de fluxo são ambos nulos.
- *Admitido*: Esse tipo de fluxo de serviço possui recursos reservados pela BS para o seu conjunto de parâmetros *AdmittedQoSParamSet*, mas esses parâmetros não estão ativos (o *ActiveQoSParamSet* é nulo). Os fluxos de serviço admitidos podem ter sido provisionados ou sinalizados por algum outro mecanismo.
- *Ativo*: Esse tipo de fluxo de serviço apresenta recursos comprometidos pela BS para o seu conjunto de parâmetros *ActiveQoSParamSet*. Por exemplo, a estação base pode estar enviando mapas contendo concessões não solicitadas para a transmissão de um fluxo de serviço UGS (*Unsolicited Grant Service*). O conjunto de parâmetros *ActiveQoSParamSet* desse fluxo não é nulo

3.2.2.1 Mecanismo de Classificação dos Fluxos de Serviço

O mecanismo principal para a provisão de QoS no padrão IEEE 802.16 é o responsável pela associação dos pacotes a um fluxo de serviço, ou seja, o mecanismo de classificação (Figura 3.7).

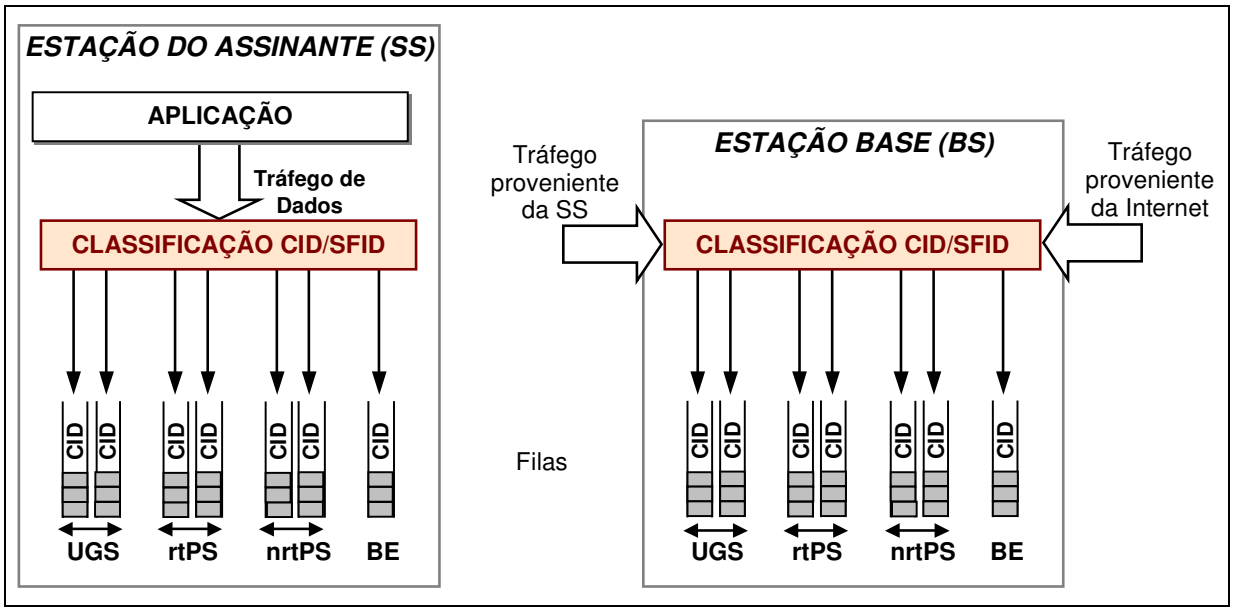


Figura 3.7 – Mecanismo de classificação [Chen, 2004]

Cada aplicação deve primeiramente registrar-se na rede. A rede irá associar a aplicação a um fluxo de serviço através da atribuição de um identificador único (SFID). Todos os pacotes devem ser rotulados com o SFID atribuído de modo que a rede possa prover a QoS apropriada. Quando a aplicação quer enviar pacotes de dados, ela solicita o estabelecimento de uma conexão com a rede e recebe um CID. Dessa forma, os pacotes de dados do padrão IEEE 802.16 incluem identificadores por fluxo e por conexão.

O conjunto de ferramentas que oferece suporte a provisão de QoS para os tráfegos *uplink* e *downlink* incluem: funções para configuração e registro dos fluxos de serviço, sinalização para estabelecimento dinâmico de QoS baseado nos fluxos de serviço e nos parâmetros de tráfego, escalonamento e parâmetros de tráfego para fluxos de serviço *uplink* e *downlink* e

agrupamento de propriedades do fluxo de serviço em classes de serviço para permitir o agrupamento de requisições.

Como foi visto na Subseção 2.1 o canal de acesso do padrão 802.16 emprega TDM para *downlink* e TDMA para *uplink*. O módulo de escalonamento de pacotes aloca largura de banda para as conexões em função do número de *slots* alocados por conexão pelo canal TDM. Esse módulo também determina quando uma conexão tem permissão para transmitir dados, tornando-se ativa.

O módulo de escalonamento de pacotes para o *uplink* é mais complexo pois as filas são distribuídas entre várias SSs. Maiores detalhes sobre a estrutura do fluxo de *uplink* são apresentados na Seção 3.2.4 .

3.2.2.2 Mecanismo de Requisição e Alocação de Largura de Banda

A largura de banda requisitada pode ser *incremental*, representando a quantidade adicional de largura de banda necessária, ou *agregada*, representando a quantidade total de largura de banda necessária.

A requisição de largura de banda pode ser iniciada diretamente pela conexão ou em resposta a recepção de uma mensagem de *polling* da estação base. A BS concede ou aloca largura de banda através de um dos seguintes mecanismos: *Grant Per Subscriber Station* (GPSS) ou *Grant Per Connection* (GPC).

No *mecanismo de alocação de largura de banda por estação assinante* (GPSS) a estação base concede o recurso para a SS e esta pode redistribuir a largura de banda entre as suas conexões mantendo a QoS de acordo com o nível de serviço negociado. Esse mecanismo se adequa a cenários onde existem muitas conexões por terminal, o que possibilita ajustes mais sofisticadas de acordo com as necessidades de QoS das aplicações. Nesse contexto, a sobrecarga na BS é reduzida pois a implantação de GPSS requer SSs mais "inteligentes". A utilização de GPSS é obrigatória na especificação da camada física do padrão IEEE 802.16 que utiliza a faixa de freqüência entre 10 – 66 GHz (padrão base). O padrão IEEE 802.16a adota apenas o mecanismo de alocação GPSS.

No *mecanismo de alocação de largura de banda por conexão* (GPC) a estação base concede o recurso para a estação assinante por conexão. Esse mecanismo é recomendado para cenários onde existem poucos usuários por SS. Sua implantação provoca uma sobrecarga de processamento na BS mas permite que a implementação das SSs seja mais simples.

Antes que as estações dos assinantes possam efetuar requisições por largura de banda, a estação base deve alocar largura de banda com o propósito específico de garantir essas requisições. Esse processo é denominado *polling*. Existem dois mecanismos de *polling* na estação base:

- *Unicast*: Cada SS é interrogada individualmente pela estação base para informar se deseja utilizar o meio para transmissão, nesse caso, a BS aloca largura de banda para o envio de mensagens de requisição (de largura de banda). Nessa modalidade o bit PM (*Poll-me*) é utilizado para requisitar um *polling*.
- *Baseado em Contenção*: A técnica de requisição de largura de banda baseada em contenção é empregada quando uma quantidade insuficiente de largura de banda é disponibilizada individualmente pelo envio de mensagens da BS para muitas SSs inativas. A alocação é feita por *multicast* ou *broadcast* para um grupo de SSs que devem disputar por uma oportunidade de enviar suas requisições de largura de banda.

3.2.2.3 Utilização da MIB do Padrão IEEE 802.16 na Provisão de Serviço

O modelo de gerenciamento de rede é constituído por um módulo de gerência, pelos nós gerenciados (estações dos assinantes e estação base) e por uma base de dados do fluxo de serviço. As SSs e as BSs coletam e armazenam informações sobre os objetos gerenciados utilizando o formato especificado na estrutura da MIB (*Management Information Base*) ***wmanIfMib*** definida para o padrão IEEE 802.16 [Chou, 2004] (Figura 3.8). A base de dados do fluxo de serviço contém informações sobre o fluxo e sobre a QoS a ele associada. Essas informações orientam a BS e a SS na criação das conexões de transporte quando um serviço é provido ou quando uma SS entra na rede.

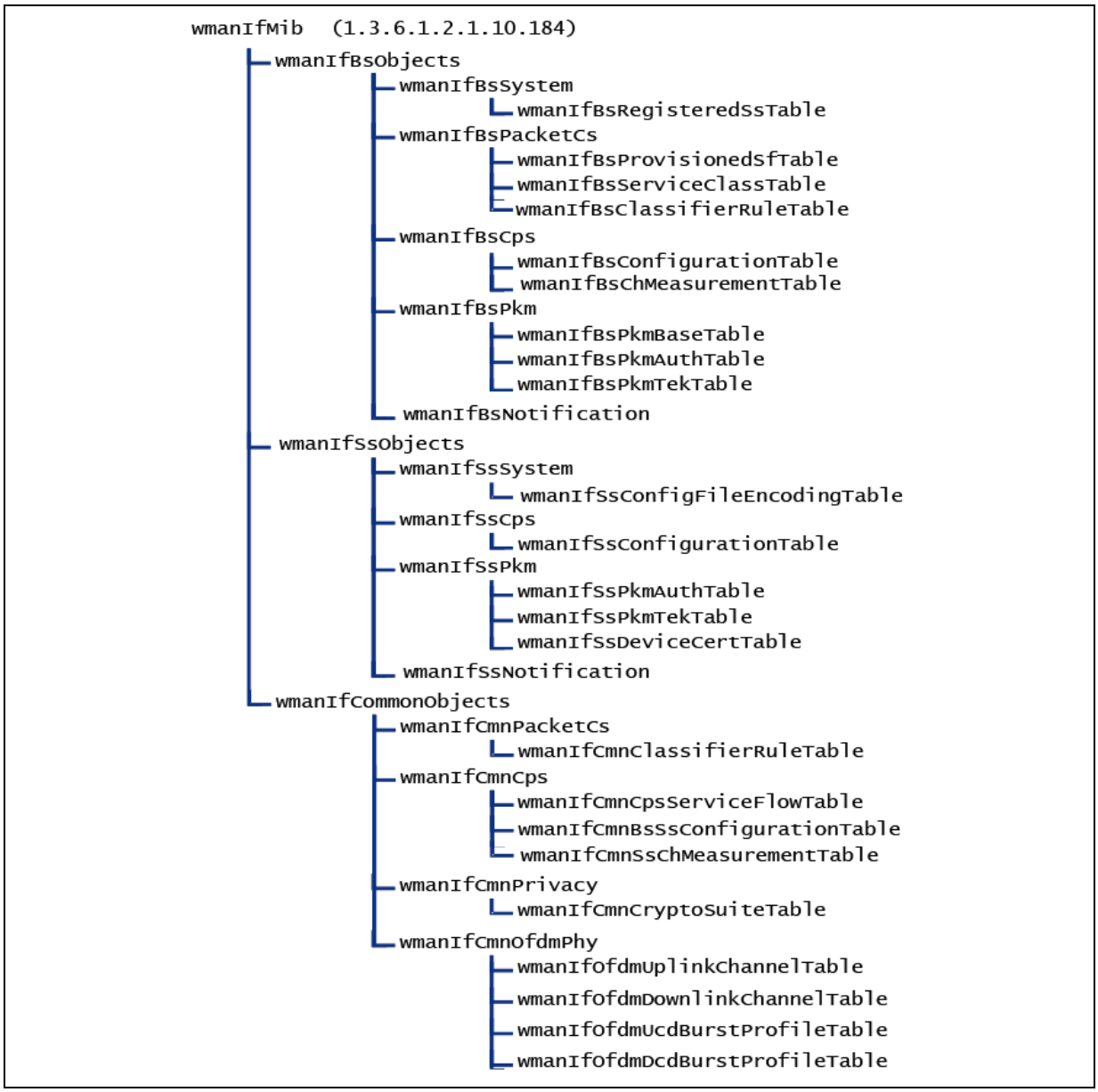


Figura 3.8 – Estrutura da MIB *wmanIfMib* [Chou, 2004]

A MIB representada pela *wmanIfMib* contém três tabelas (destacadas na Figura 3.9) que oferecem suporte à provisão do fluxo de serviço:

- `wmanIfBsProvisionedSfTable`: Tabela que contém informações sobre o fluxo de serviço pré-provisionado para ser usado na criação de conexões quando um usuário entra na rede.
- `wmanIfBsServiceClassTable`: Tabela que contém parâmetros de QoS associados aos fluxos de serviço. Os principais parâmetros incluem (*i*) prioridade do tráfego, (*ii*) taxa de pico, (*iii*) tráfego máximo de rajada, (*iv*) taxa mínima reservada, (*v*) variação de retardo tolerada e (*vi*) latência máxima.
- `wmanBsClassifierRuleTable`: Tabela que contém as regras para que o classificador possa mapear os pacotes de *downlink* e *uplink* para o fluxo de serviço.

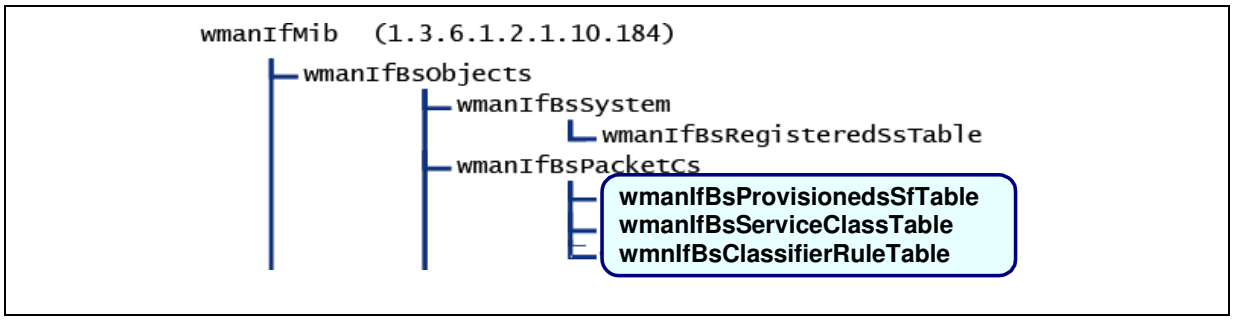


Figura 3.9 – Tabelas referentes à provisão do fluxo de serviço [Chou, 2004]

A Figura 3.10 traz um exemplo que descreve como as informações sobre o fluxo de serviço são povoadas. As tabelas A, B e C indicam que duas estações de assinantes, identificadas pelos endereços MAC 0x123ab54 e 0x45feda1, foram pré-provisionadas. Cada SS possui dois fluxos de serviço, identificados por um *sfIndex*, com os parâmetros de QoS associados (*QoSIndex*) sendo identificados através dos valores 1 e 2, respectivamente. O campo *QoSIndex* aponta para uma entrada de QoS na tabela `wmanIfBsServiceClassTable` que contém três níveis de QoS: *Gold*, *Silver* e *Bronze*. O campo *sfIndex* aponta para uma entrada na tabela `wmanBsClassifierRuleTable`, indicando quais regras deverão ser usadas para classificar os pacotes em um dado fluxo de serviço.

Quando a estação assinante com o endereço MAC 0x123ab54 registra-se junto a estação base esta cria uma entrada em `wmanIfBsRegisteredTable`, representada pela tabela D. Com base no endereço MAC, a estação base será capaz de localizar a informação sobre o fluxo de serviço que foi pré-provisionado nas tabelas A, B e C. A estação base utilizará uma mensagem DSA (*Dynamic Service Addition*) para criar fluxos de serviço com *sfIndex* 100001 e 100002, com a informação do fluxo de serviço pré-provisionado. São criadas duas entradas em `wmanIfCmnCpsServiceFlowTable` na tabela E. Os fluxos de serviço estarão então disponíveis para o cliente para que ele possa enviar seu tráfego de dados.

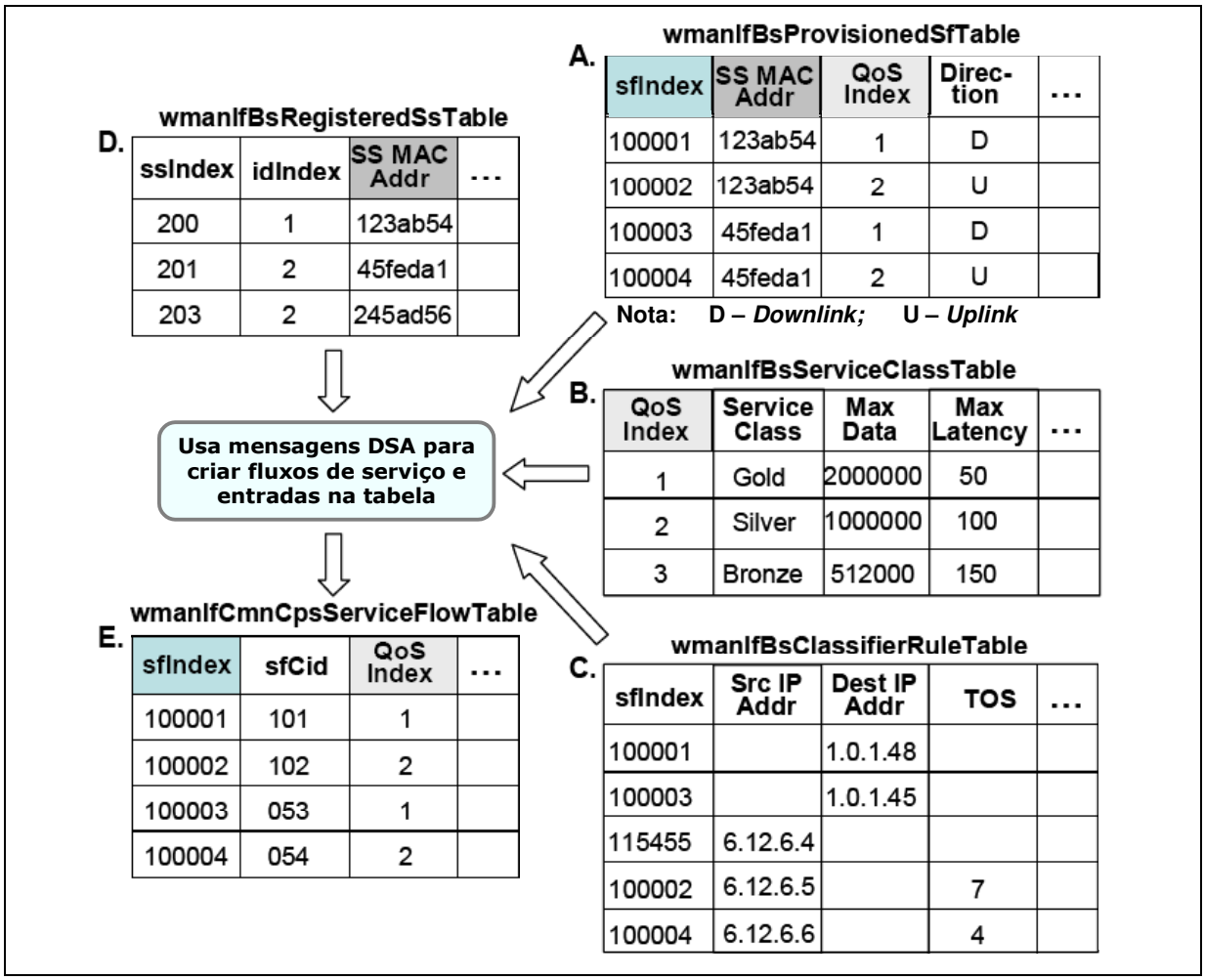


Figura 3.10 – Provisão do fluxo de serviço [Nair, 2004]

3.2.3 Classes de Serviço

Com base nos tipos de fluxo de serviços especificados no padrão DOCSIS o padrão IEEE 802.16 define quatro categorias de serviço as quais devem ser tratadas de forma diferenciada pelo mecanismo de escalonamento da camada MAC. As classes de serviço do 802.16 são: *Unsolicited Grant Service* (UGS), *Real-Time Polling Service* (rtPS), *Non Real-Time Polling Service* (nrtPS) e *Best Effort* (BE). Nas próximas subseções elas são brevemente detalhadas [Hawa, 2002].

3.2.3.1 Unsolicited Grant Service

A categoria UGS é projetada para oferecer suporte aos fluxos de serviço de tempo real que geram pacotes de dados de tamanho fixo em intervalos periódicos, ou seja, tráfego CBR (*Constant Bit Rate*). Essa categoria de serviço pode ser representada pelo tráfego gerado por emulação T1/E1 e por aplicações de voz sobre IP sem supressão de silêncio. O serviço oferece periodicamente concessões *não solicitadas* para transmissão de dados. Isso elimina a sobrecarga e a latência das requisições das estações dos assinantes (SS – *Subscriber Stations*) para enviar pedidos de transmissão. No UGS, a SS é proibida de usar qualquer requisição de

contenção e a estação base (BS – *Base Station*) não oferece qualquer oportunidade de requisição *unicast*[26] para a SS. Requisições de *piggyback* também são proibidas no UGS.

Os parâmetros mais importantes para os fluxos de serviço UGS são: *Unsolicited Grant Size*, *Grants Per Interval*, *Nominal Grant Interval* e *Tolerated Grant Jitter* (Figura 3.11). O escalonamento ideal para assegurar tais parâmetros é definido pelo tempo de referência t_0, com os tempos desejados de transmissão sendo $t_i = t_0 + i * interval$, onde *interval* corresponde ao parâmetro *Nominal Grant Interval*. O tempo atual de concessão t'_i deve estar no intervalo entre $t_i \leq t'_i \leq t_i + jitter$, onde *jitter* corresponde ao parâmetro *Tolerated Grant Jitter*. Quando múltiplas concessões são solicitadas por intervalo todas as concessões devem estar dentro do intervalo de *jitter*.

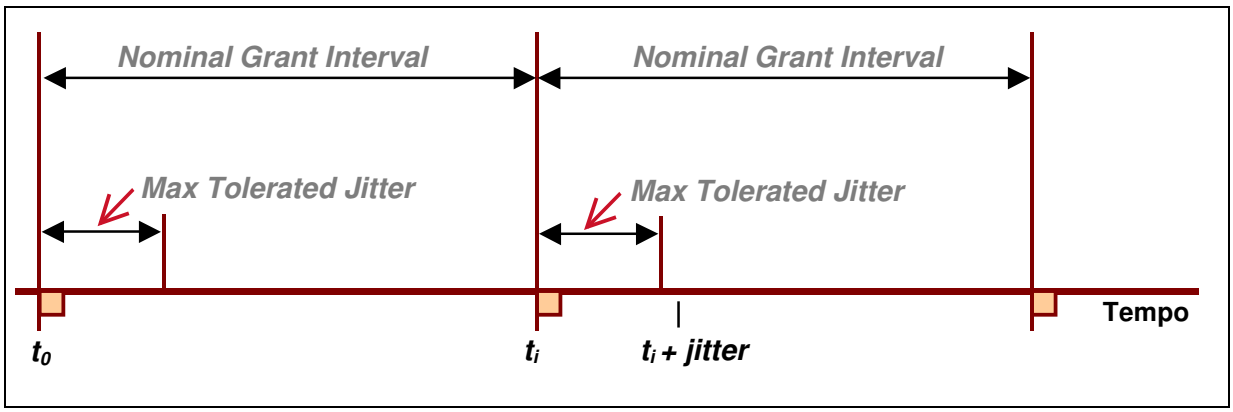


Figura 3.11 – Concessão de privilégio de acesso de dados (*data grants*) em um fluxo de serviço UGS

3.2.3.2 Real-Time Polling Service

A categoria rtPS é projetada para oferecer suporte aos fluxos de serviço de tempo real que geram pacotes de dados de tamanho variável em intervalos periódicos, como, por exemplo, o tráfego gerado por transmissão de vídeo no formato MPEG ou voz sobre IP com supressão de silêncio. O serviço oferece periodicamente oportunidades de requisição *unicast*, as quais vão ao encontro das necessidades do fluxo de tempo real (largura de banda e retardo) e permitem que a SS especifique o tamanho da concessão desejada. A SS não tem permissão de utilizar qualquer esquema de requisição de contenção ou de *piggyback*. Os principais parâmetros para essa categoria de serviço são: *Nominal Polling Interval*, *Tolerated Poll Jitter e Minimum Reserved Traffic Rate*. O escalonamento ideal para assegurar tais parâmetros é muito similar ao definido para os fluxos de serviço UGS.

3.2.3.3 Non Real-Time Polling Service

A categoria nrtPS é projetada para oferecer suporte aos fluxos de serviço não tempo real que geram pacotes de tamanho variável em intervalos periódicos, como, por exemplo, o tráfego gerado por aplicações FTP, e-mail, SMS, *multicast/broadcast*, MMS, entre outros. O serviço oferece periodicamente oportunidades de requisição *unicast* (*polls*), utilizando intervalos de

[26] Uma oportunidade de requisição *unicast* (do inglês *unicast request opportunity*) é um intervalo do canal de *upstream* no qual somente uma SS específica pode enviar uma requisição de largura de banda para a BS. Esse processo difere do intervalo de contenção no qual muitas SSs disputam entre si para transmitir suas requisições.

tempo mais espaçados do que na categoria rtPS. Isso assegura que o fluxo receba oportunidades de requisição mesmo durante períodos em que a rede esteja congestionada. Além disso, a SS pode utilizar oportunidades de requisição de contenção e de *piggyback*. Os principais parâmetros para essa categoria são: *Nominal Polling Interval*, *Minimum Reserved Traffic Rate* e *Traffic Priority*.

3.2.3.4 Best Effort

Na categoria BE a SS pode utilizar oportunidades de requisição de contenção e de *piggyback* mas não pode usar *polls* periódicos, além disso, não é permitido o envio de concessões periódicas para a transmissão de dados pela BS. O serviço de melhor esforço é tipicamente oferecido pela Internet para o tráfego gerado por navegação na Web. Os principais parâmetros para essa categoria de serviço são: *Minimum Reserved Traffic Rate* e *Traffic Priority*.

É importante mencionar que para as categorias nrtPS e BE, o padrão especifica que a BS deve usar o parâmetro prioridade de tráfego para determinar a precedência na requisição do serviço e na geração da concessão para a transmissão de dados. Além disso, a BS deve oferecer preferencialmente oportunidades de requisição de contenção baseadas em prioridade.

3.2.3.5 Observações sobre as Classes de Serviço do Padrão IEEE 802.16

Na sua criação, como mencionado na Subseção 3.2 , cada conexão da SS para a BS é associada a uma classe de serviço. Quando os pacotes são classificados na subcamada de convergência (camada MAC), a conexão na qual o fluxo se enquadra é escolhida com base no tipo de garantias de QoS solicitadas pela aplicação. A Figura 3.12 descreve o funcionamento do mecanismo de provisão de QoS no padrão IEEE 802.16 para oferecer suporte aos serviços multimídia, incluindo voz (com TDM), voz sobre IP (VoIP), TFTP, HTTP e e-mail.

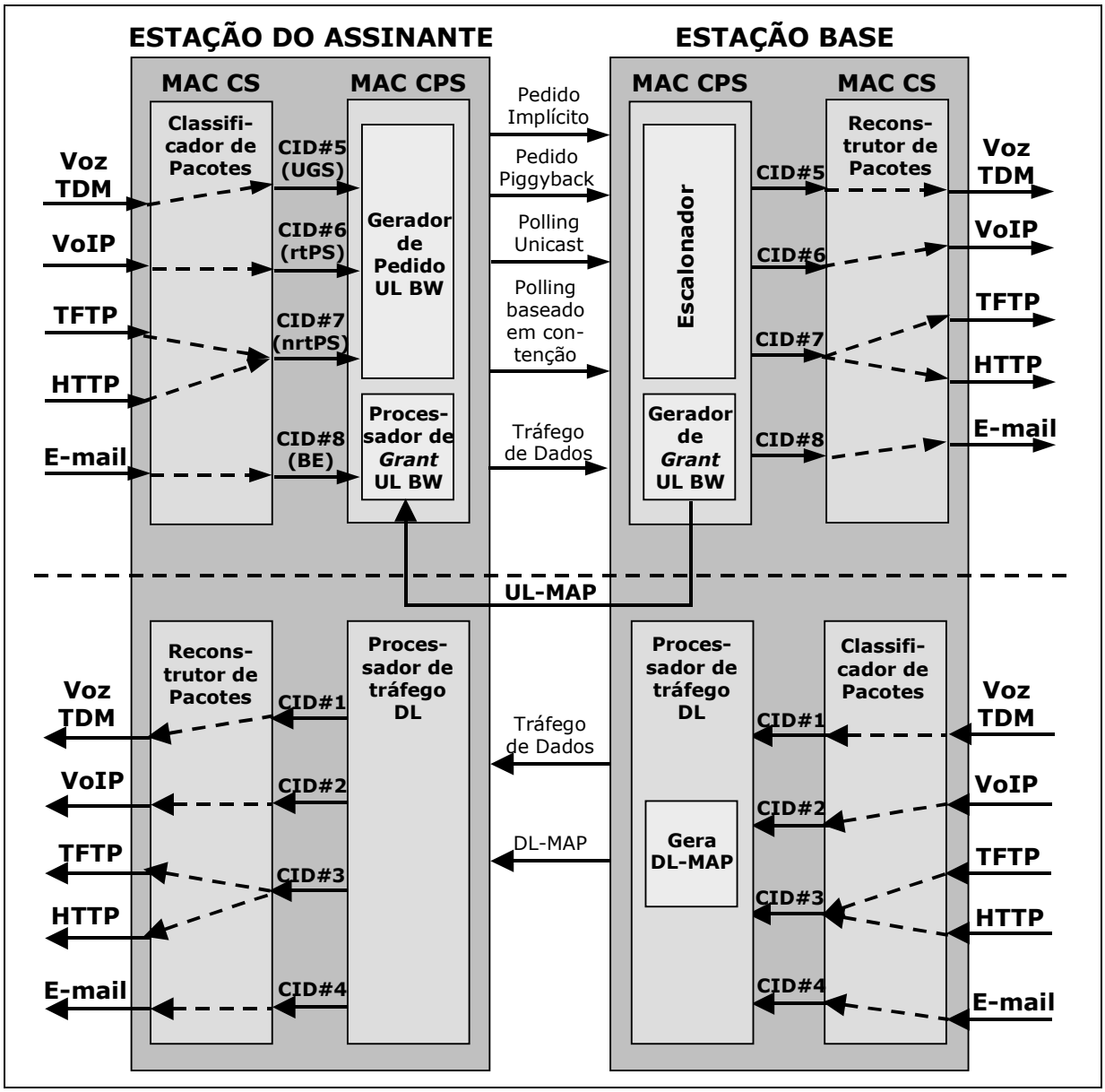


Figura 3.12 – Mecanismo de QoS para aplicações multimídia [Nair, 2004]

A Tabela 3.1 sumariza as opções de *polling* e concessão (*grant*) disponíveis para as conexões de *uplink* nas categorias de serviço do padrão IEEE 802.16 [IEEE C802.16d-04/60r1].

Tabela 3.1 – Tabela comparativa entre as categorias de serviço do padrão IEEE 802.16

Classe de Serviço	Requisição *PiggyBack*	"Roubo" de Largura de Banda[27]	*Polling*
UGS	Não é permitida	Não é permitida	O bit PM (*Poll-me*) é usado para requisitar um *polling unicast* para as necessidades de largura de banda de conexões não-UGS.
rtPS	Permitida	Permitida para GPSS	O escalonamento só permite *polling unicast*.

[27] Do inglês *bandwidth stealing*.

Classe de Serviço	Requisição *PiggyBack*	"Roubo" de Largura de Banda[27]	*Polling*
nrtPS	Permitida	Permitida para GPSS	O escalonamento pode restringir o fluxo de serviço para o *polling unicast* através de uma política de transmissão/requisição; de outro modo todas as formas de *polling* são permitidas.
BE	Permitida	Permitida para GPSS	Todas as formas de *polling* são permitidas.

3.2.4 Estrutura da Transmissão no *Uplink*

Nas transmissões de *uplink* várias SSs compartilham o canal através da técnica de acesso múltiplo por divisão do tempo (TDMA). A mensagem de mapeamento de *uplink* (UL-MAP – *UpLink Map Message*) é usada para prover um canal de acesso às estações dos assinantes (SSs). A mensagem UL-MAP define um canal de acesso assim como um perfil de tráfego UIUC (*Uplink Interval Usage Code*). As mensagens de mapeamento de *uplink* e *downlink* (DL-MAP – *DownLink Map Message*) indicam o início do *slot* de tempo de cada rajada de dados. Essas mensagens são transmitidas no subframe de *downlink*, ilustrado na Figura 3.13.

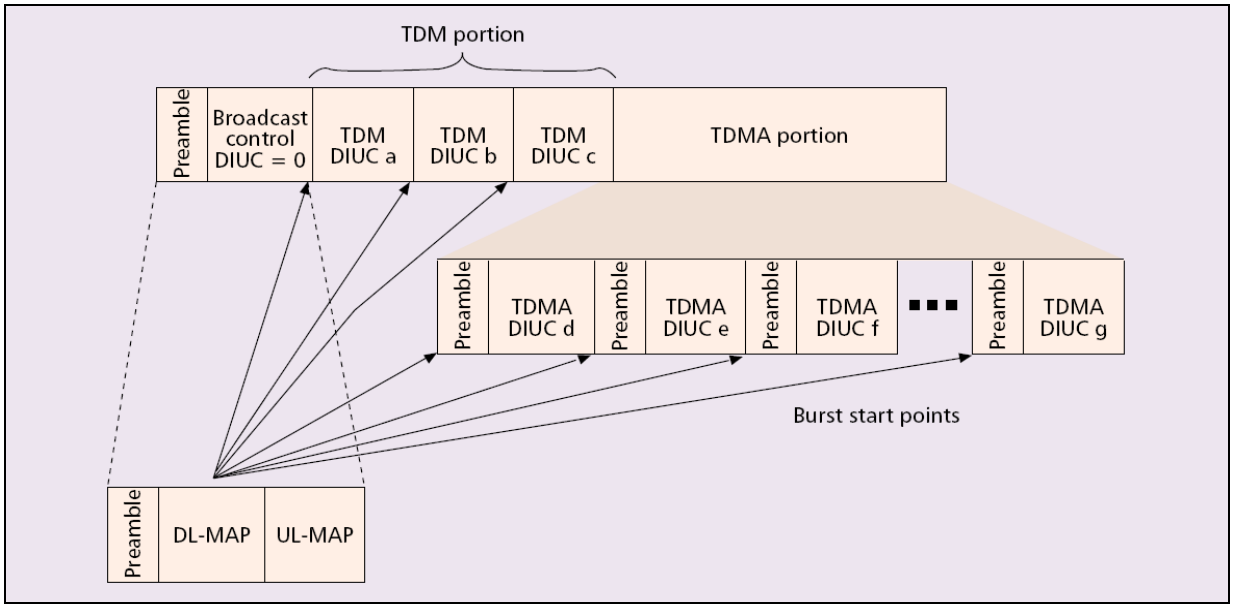


Figura 3.13 – Estrutura do subframe de *downlink* [Eklund, 2002]

O subframe de *uplink* utilizado na faixa de freqüência de 10 – 66 GHz (padrão IEEE 802.16) é apresentado na Figura 3.14. As estações base transmitem de acordo com a alocação de largura de banda efetuada pela utilização do perfil de rajada especificado no UIUC contido na mensagem UL-MAP. O subframe de *uplink* pode conter também alocações baseadas em contenção para os primeiros acessos ao sistema e requisições de largura de banda via *multicast* ou *broadcast*. As oportunidades oferecidas aos primeiros acessos ao sistema são dimensionadas de modo a permitir um tempo de guarda extra para estações assinantes que não tenham resolvido com antecedência o tempo de transmissão necessário para evitar o atraso para a BS. O subframe inclui os seguintes períodos: *Initial Maintenance*, *Request Contention Opportunities* e *Scheduled Data Grants*.

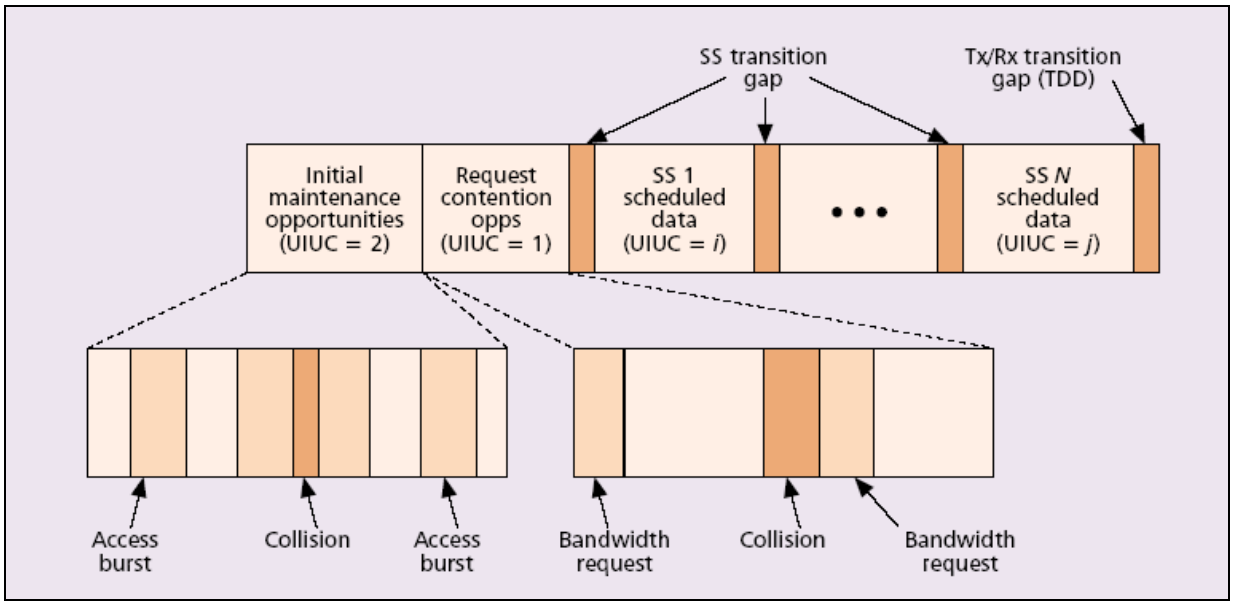


Figura 3.14 – Estrutura do subframe de *uplink* [Eklund, 2002]

3.2.4.1 Inicialização da Estação Base

Uma estação assinante que deseje ter acesso a uma rede de comunicação deve passar por um processo de inicialização com a BS correspondente, o qual é ilustrado pela máquina de estados representada na Figura 3.15. O processo de inicialização da SS pode ser resumido nas seguintes etapas:

- *Fazer uma busca (scan) por um canal de downlink e estabelecer sincronização com a BS:* A SS pode fazer uma chamada para um canal de *downlink* que esteja armazenado em sua memória ou rastrear continuamente por novos possíveis canais na banda de freqüência de *downlink* até encontrar um sinal válido. Depois que um canal é encontrado são efetuadas a sincronização e a tentativa de adquirir um canal para parâmetros de controle para o *downlink* através de uma busca por mensagens DL-MAP enviadas pela BS.
- *Obter os parâmetros de transmissão:* A SS busca por uma mensagem de descrição do canal de *uplink* da BS de modo a recuperar os parâmetros de transmissão para um possível canal de *uplink*.
- *Ajuste de parâmetros locais (ranging)*: O processo é iniciado com a SS enviando uma mensagem de requisição de *ranging* MAC. Caso a SS não receba uma resposta ela envia novamente um pedido de *ranging* usando uma potência de transmissão mais alta. Eventualmente a SS recebe uma resposta. A resposta pode indicar sucesso ou que correções na potência e no indicador de tempo (dia, hora) devem ser efetuadas pela SS. Se a resposta indica sucesso a SS está pronta para enviar dados no canal de *uplink*, caso contrário a SS deve efetuar as correções e enviar um novo pedido de *ranging*.
- *Negociação de capacidades básicas*: A SS envia para a BS uma mensagem de requisição de capacidades descrevendo-as em termos dos níveis de modulação suportados, esquemas e taxas de codificação e métodos de duplexação. A BS aceita ou nega a admissão de uma SS com base nas suas capacidades.

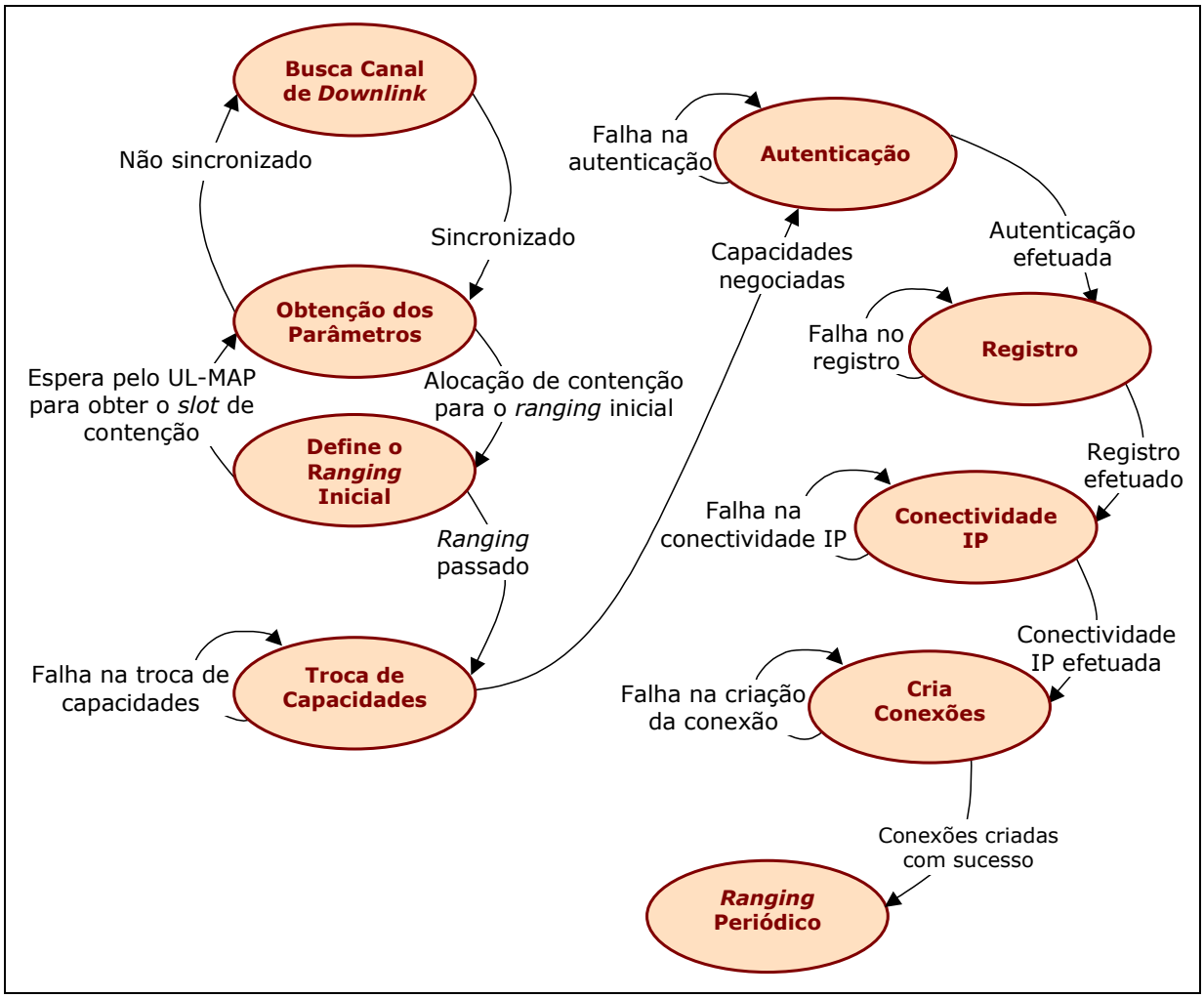


Figura 3.15 – Mecanismo de acesso à rede [Nair, 2004]

- *Autenticação e troca de chaves*: A BS conduz um processo de autorização da SS para que ela possa entrar na rede, o que inclui a troca chaves de segurança entre a BS e a SS.
- *Processo de registro*: A SS envia uma mensagem de requisição de registro para a BS e a BS envia uma resposta à solicitação de registro da SS. A troca de mensagens de registro inclui suporte a parâmetros como versão do protocolo IP, gerenciamento de SS, parâmetros ARQ, opção de classificação, CRC e controle de fluxo.
- *Estabelecimento de conectividade IP*: A SS inicializa o DHCP para obter um endereço IP e outros parâmetros os quais viabilizam o estabelecimento de conectividade IP com a BS. A SS usa o protocolo TFTP (*Trivial File Transfer Protocol*) para obter os parâmetros operacionais.
- *Sincronização temporal*: A SS e a BS precisam ter a mesma informação sobre a data e a hora atuais, utilizando para esse fim o protocolo especificado pela RFC 868 [Postel, 1983].
- *Transferência de parâmetros opcionais*: A BS envia informação adicional de configuração para a SS.
- *Criação da Conexão de Transporte*: As conexões de transporte são criadas depois que as etapas de registro e de transferência de parâmetros operacionais são finalizadas.

Para os fluxos de serviços pré-provisionados o processo de criação da conexão é iniciado pela BS. A BS envia para a SS uma mensagem dinâmica de requisição para a adição de um fluxo de serviço e a SS envia uma resposta para confirmar a criação da conexão. A criação de conexão para fluxos de serviços não pré-provisionados é iniciado pela SS através do envio de uma mensagem de requisição de adição para fluxos de serviços dinâmicos para a BS. A BS responde com uma mensagem de confirmação.

4 QoS: Integrando os Padrões IEEE 802.11 e IEEE 802.16

O objetivo desta seção é identificar os pontos relevantes para a elaboração de uma proposta de arquitetura para provisão de QoS em redes sem fio que integre os padrões IEEE 802.16 e IEEE 802.11.

4.1 Arquitetura Genérica para Provisão de QoS

Qualidade de serviço é fundamental para diversos tipos de aplicações. A definição de *QoS* tem um aspecto subjetivo, podendo variar de aplicação para aplicação de acordo com as características desejadas para o serviço oferecido pela rede. Porém, de alguma forma, esta subjetividade inicial deve ser traduzida em parâmetros que serão negociados entre as aplicações e a rede.

Muitas propostas têm sido apresentadas com a finalidade de modelar os mecanismos envolvidos na provisão da qualidade de serviço. Em linhas gerais, pode-se definir uma arquitetura que garanta a provisão de QoS em ambientes genéricos contemplando-se as seguintes fases: (*i*) iniciação do sistema, (*ii*) requisição de serviços, (*iii*) estabelecimento de contratos de serviço e (*iv*) manutenção de contratos de serviço (Gomes, 2001).

- *Iniciação do Sistema*: o processo de iniciação do sistema está relacionado à definição da infra-estrutura que dará suporte aos serviços oferecidos e que determinará a forma de descrição do estado interno da mesma. As informações sobre a disponibilidade de recursos do ambiente fazem parte da especificação do estado interno de um provedor.
- *Requisição de Serviços*: após a iniciação do sistema, usuários podem requisitar serviços a qualquer momento. Uma requisição é feita através da caracterização da carga de processamento e comunicação a ser produzida ou consumida pelos usuários, e da especificação da QoS desejada.
- *Estabelecimento de Contratos de Serviço*: a fase de estabelecimento de contratos é iniciada quando uma nova requisição de serviço é recebida pelo sistema. Ele então determinará se existem recursos suficientes para garantir a QoS desejada pelo usuário e se a admissão dos seus fluxos não irá provocar uma degradação na QoS dos fluxos previamente admitidos. A admissão de um novo contrato de serviço resultará na *alocação dos recursos* necessários ao atendimento do serviço, ocasionando mudanças no estado interno do sistema. Caso o sistema não possua recursos disponíveis para atender à solicitação do usuário, o pedido será rejeitado, podendo dar início a uma nova negociação.
- *Manutenção de Contratos de Serviço*: quando os fluxos do usuário são admitidos, o sistema deve garantir que a QoS negociada seja mantida durante todo o tempo que durar a comunicação. É essa garantia que define um contrato de serviço e, como em

todo contrato, ambas as partes envolvidas devem colaborar, ou seja, o usuário deve ater-se à carga caracterizada e o sistema deve manter a QoS negociada. Para que os contratos estabelecidos possam ser mantidos, é necessário efetuar medições periódicas referentes à QoS que está sendo fornecida aos usuários do sistema de modo que, ao se detectarem condições inadequadas para a manutenção dos fluxos admitidos, os mecanismos de sintonização[28] e renegociação[29] possam ser disparados. O não cumprimento do contrato por uma das partes pode ocasionar desde uma mera notificação até a interrupção do serviço para aquele usuário.

4.2 Arquiteturas Propostas

O padrão IEEE 802.16 reflete o estado da arte no acesso banda larga sem fio à Internet. Ele disponibiliza atualmente as especificações das camadas MAC e física, não estando efetivamente em uso, com previsão para distribuição comercial a partir de 2005 (BWA fixa) e 2007 (BWA móvel). Como conseqüência, não existe na literatura científica um número considerável de trabalhos que explorem o padrão IEEE 802.16 e, no caso específico do foco dessa pesquisa, aspectos relativos a uma arquitetura para a provisão de QoS com base nesse padrão.

O mecanismo de escalonamento definido por Hawa [Hawa, 2002 e Hawa, 2003] é o primeiro a ser proposto para a provisão de QoS no padrão IEEE 802.16. Nesse trabalho é apresentada uma arquitetura de escalonamento que oferece suporte às garantias de QoS de parâmetros como largura de banda e retardo para vários tipos de tráfego, incluindo todos os que são atendidos pelas classes de serviço definidas no padrão IEEE 802.16. Um aspecto interessante dessa arquitetura é que ela pode ser facilmente integrada aos modelos de QoS do IETF: *Intserv* e *Diffserv* (Seção 3.1). Como se pode observar, comparando essa solução com a proposta apresentada na Subseção 4.1 para uma arquitetura genérica de provisão de QoS a única etapa contemplada é a de estabelecimento de contratos de serviços através da otimização do mecanismo de escalonamento de recursos.

Uma outra proposta interessante é o DiffMobil [Figueiredo, 2004] onde uma arquitetura para a provisão de qualidade de serviço fim-a-fim em redes GPRS (*General Packet Radio Services*) é apresentada. Apesar do trabalho não fazer nenhuma menção ao padrão IEEE 802.16, existem pontos de interseção. Assim como o 802.16, o GPRS é um padrão para as redes comutadas por pacotes e introduz essa tecnologia nas redes GSM (*Global System for Mobile communications*). A solução proposta na arquitetura DiffMobil consiste em (*i*) uma política e um algoritmo de controle de admissão baseado em guarda para a interface aérea, otimizado pela adição dos módulos de diagnóstico e de controle de fluxo, e (*ii*) a utilização do *DiffServ* no núcleo IP da rede GPRS, introduzindo mecanismos de priorização de tráfego de acordo com as categorias de serviço descritas no *DiffServ*, fazendo um mapeamento entre essas categorias com as do núcleo GPRS. Com a integração das soluções de QoS do núcleo e da interface aérea é garantida a provisão de QoS fim-a-fim.

---

[28] Mecanismo responsável pelo redimensionamento da parcela de utilização dos recursos, a qual foi disponibilizada ao usuário do serviço durante a negociação da QoS, na fase de estabelecimento de contratos de serviço.

[29] Uma nova negociação só será efetuada se o redimensionamento realizado pelo mecanismo de sintonização não for bem sucedido.

4.3 Discussão

A introdução de QoS no padrão IEEE 802.11e foi tímida, os mecanismos introduzidos oferecem suporte a uma única conexão e a um número limitado de parâmetros de QoS. O padrão 802.11 se baseia em uma arquitetura distribuída, na qual a operação da camada MAC é distribuída entre os pontos de acesso e as estações dos assinantes. Por outro lado, o padrão IEEE 802.16 é baseado em uma arquitetura de controle centralizada, onde a estação base, através do seu escalonador, tem controle total sobre o acesso sem fio às mídias pelas estações de assinantes. Diferentemente do 802.11, o padrão 802.16 oferece suporte a múltiplas conexões e a um conjunto completo de parâmetros de QoS. Além disso o 802.16 oferece um classificador de pacotes para mapear as conexões entre os vários usuários e interfaces, indo desde Ethernet a ATM. Essa flexibilidade garantida pelo padrão IEEE 802.16 aumenta a complexidade do desenvolvimento e implantação de serviços para as redes de acesso banda larga sem fio fixas e móveis [Nair, 2004].

Uma arquitetura para provisão de QoS que integre as redes IEEE 802.11 e IEEE 802.16 deve considerar as diferenças relativas aos dois padrões, harmonizando a simplicidade do 802.11 com a complexidade do 802.16 através de mapeamentos dos parâmetros de QoS e adaptação das funções referentes a camada MAC, que hora estarão sendo executadas de forma centralizada (.16) e hora serão realizadas de forma distribuída (.11). Será necessário a definição de perfis de QoS de acordo com os parâmetros e funcionalidades da camada MAC, de modo que a QoS oferecida não seja degradada a ponto de se tornar perceptível ao assinante.

Para que se possa definir uma arquitetura de provisão de QoS genérica para o acesso banda larga sem fio é necessário que se defina uma proposta que integre as arquiteturas *IntServ* e *DiffServ*. Isso irá garantir mais flexibilidade e proverá uma solução mais realística para o problema da provisão de QoS. A integração dessas arquiteturas no padrão IEEE 802.16 irá implicar em um mapeamento entre as classes de serviço definidas no padrão e aquelas definidas no *IntServ* e *DiffServ*.

Pelos experimentos efetuados no DiffMobil, podemos observar a importância dos módulos de diagnóstico e controle de fluxo, operando em conjunto com o mecanismo de controle de admissão, para que se garanta um mecanismo justo de provisão de QoS na interface aérea.

Considerando o processo de provisão de QoS como definido na arquitetura genérica [Gomes, 2001], é necessário que se avalie os módulos de negociação e sintonização à luz dos módulos de diagnóstico e controle de fluxo como definidos no DiffMobil para interface aérea.

5 Conclusões

Na primeira semana de junho de 2004 a indústria de serviço móvel ultrapassou a marca de 1,5 bilhões de assinantes em todo o mundo. A empresa de pesquisa EMC[30] prediz que a indústria irá ultrapassar a marca de 2 bilhões no início de 2006 e alcançará a marca de 2,45 bilhões ao final de 2009, previsão considerada otimista para alguns outros pesquisadores de mercado. Esse crescimento virá principalmente de mercados emergentes, incluindo Brasil, China e Índia. Como no final de 2003, a China correspondia ao maior mercado móvel seguido pelos Estados Unidos, Japão, Alemanha e Itália. Para 2009, a EMC espera que a

[30] EMC Corporation: http://www.emc.com/.

China e os Estados Unidos permaneçam no topo da lista, seguidos de perto pela Índia, Brasil e Japão.

O crescimento da indústria de serviço móvel é um indicador da grande aceitação das tecnologias que apontam soluções para o problema da mobilidade. Esse grande mercado de usuários de telefonia móvel (sem considerar os usuários de PDAs, *laptops*, etc) aponta para a necessidade de se oferecer cada vez mais serviços que se assemelhem ao que esses "consumidores" se habituaram com o advento das redes de computadores, da internet, da web e das aplicações multimídia e de tempo real. As exigências por esses serviços reforçam a necessidade de se garantir a qualidade dessas aplicações.

Como pode ser verificado ao longo desse trabalho, o padrão IEEE 802.16 é apresentado como uma solução ao problema de conexão da última milha, oferecendo uma tecnologia que em breve será responsável pela inclusão à Internet de regiões hoje não alcançadas pelo acesso banda larga.

Com o objetivo de se antecipar as necessidades por serviços com qualidade, que possam ser devidamente cobrados gerando lucros e divisas para os diversos provedores de serviço de acesso e de comunicação, é necessário que se pense em uma arquitetura que possa garantir uma QoS fim-a-fim.

Na Seção 4.3 foram levantados alguns pontos referentes a provisão de QoS em redes IEEE 802.11 e IEEE 802.16. Entretanto, é necessário um estudo mais aprofundado quanto aos aspectos relativos a QoS definidos por esses padrões de modo que se possa gerar uma proposta consistente que trate a integração dos mesmos.

Referências Bibliográficas

ANATEL. Broadband Access and Digital Broadcasting: Where we are and where we go from here. *The Broadband and Digital Broadcasting Conference*. São Paulo. April 23, 2003. Disponível em http://www.anatel.gov.br/Tools/frame.asp?link=/acontece_anatel/palestras/conselhodiretor/palestra_jl_06_05_2003.pdf [Acesso em: Agosto de 2004]

Arc Chart. Wireless to the max – WiMAX. 19 June 2003. Disponível em http://www.arcchart.com/blueprint/show.asp?id=328&qtabs=99999 [Acesso em: Agosto de 2004]

BLAKE, S. et al. *An Architecture for Differentiated Services*. RFC 2475, December 1998. Disponível em http://www.ietf.org/rfc/rfc2475.txt [Acesso em: Agosto de 2004]

BRADEN, R. et al. *Resource ReSerVation Protocol* (RSVP). RFC 2205, Setembro de 1997. Disponível em http://www.ietf.org/rfc/rfc2205.txt [Acesso em: Agosto de 2004]

BRADEN, R.; CLARK, D.; SHENKER, S. *Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview*. RFC 1633, June 1994. Disponível em http://www.ietf.org/rfc/rfc1633.txt [Acesso em: Agosto de 2004]

BROERSMA, Matthew. *WiMax – don't believe the hype*. ComputerWorld. April 30, 2004. Disponível em http://www.computerworld.co.nz/news.nsf/UNID/FDF7465B975BE42BCC256E850069973C [Acesso em: Agosto de 2004]

BROERSMA, Matthew. *WiMAX – don't believe the hype*. Techworld. 29 April 2004. Disponível em http://www.techworld.com/mobility/news/index.cfm?NewsID=1475&Page=1&pagePos=4 [Acesso em: Julho de 2004]

CHEN, Tao. *QoS Support in Packet Networks* (presentation). University of Trento, Italy. May,

2004. Disponível em: http://science.unitn.it/~tomasi/think/pdf/chp.ppt [Acesso em: Setembro de 2004]

CHOU, J. et al. MAC and PHY MIB for WirelessMAN and WirelessHUMAN BS and SS. *IEEE S802.16mgt-04-04*. May 13, 2004. Disponível em http://grouper.ieee.org/groups/802/16/mgt/contrib/C80216mgt-04_04.pdf [Acesso em: Agosto de 2004]

dailywireless.org. IEEE Scores 802.16d. June 25, 2004. Disponível em http://www.dailywireless.org/modules.php?name=News&file=article&sid=2741 [Acesso em: Agosto de 2004]

EFE – The Financial Express. *Tech Options For Robust Networks.* India, New Delhi. May 05, 2004. Disponível em http://www.financialexpress.com/fe_full_story.php?content_id=58442 [Acesso em: Agosto de 2004]

EKLUND, Carl; MARKS, Roger B.; STANWOOD, Kenneth L; WANG, Stanley. IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN™ Air Interface for Broadband Wireless Access. *IEEE C802.16.02/05*. June 04, 2002. Disponível em http://www.ieee802.org/16/docs/02/C80216-02_05.pdf [Acesso em: Agosto de 2004]

EWALT, David M. *Pick A Standard: Wireless Standards Proliferate*. Information Week. May 3, 2004. Disponível em http://www.informationweek.com/story/showArticle.jhtml?articleID=19205552 [Acesso em: Julho de 2004]

FIGUEIREDO, Fátima de Lima P. D. *DiffMobil – Uma Arquitetura de Qualidade de Serviço Fim-a-Fim em Redes GPRS*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Ciência da Computação. Belo Horizonte. 2004.

FINNERAN, Michael F. *Wimax versus Wi-Fi: a comparison of Technologies, Markets, and Business Plans*. June 1, 2004. Disponível em http://searchnetworking.techtarget.com/searchNetworking/downloads/Finneran.pdf [Acesso em: Agosto de 2004]

GOMES, A.T.A.; Colcher, S.; Soares, L.F.G. Modeling QoS Provision on Adaptable Communication Environments. *In: IEEE International Conference on Communications*. Finlândia. Junho de 2001. Disponível em ftp://ftp.telemidia.puc-rio.br/pub/docs/conferencepapers/2001_06_gomes.pdf [Acesso em: Agosto de 2004]

GREEN, Heather. *No Wires, No Rules*. Buseness Week Online. April 26, 2004. Disponível em http://www.businessweek.com/magazine/content/04_17/b3880601.htm [Acesso em: Julho de 2004]

HAWA, Mohamed & PETR, David W. Quality of Service Scheduling in Cable and Broadband Wireless Access Systems. *Tenth International Workshop on Quality of Service*, pp. 247--255, May 2002. Disponível em http://citeseer.ist.psu.edu/hawa02quality.html [Acesso em: Agosto de 2004]

HAWA, Mohammed. *Stochastic Evaluation of Fair Scheduling with Applications to Quality-of-Service in Broadband Wireless Access Networks*. PhD's Thesis. Thesis University of Kansas. August 2003. Disponível em http://www.ittc.ukans.edu/research/thesis/documents/mohammed_hawa_thesis.pdf [Acesso em: Agosto de 2004]

HAWA, Mohammed; W. David Petr. Quality of Service Scheduling in Cable and Broadband Wireless Access Systems. *In: Tenth International Workshop on Quality of Service (IWQoS 2002)*. Miami, Florida, May 2002, pp. 247-255. Disponível em http://www.ittc.ku.edu/publications/documents/Hawa2002_iwqos_paper.pdf [Acesso em: Agosto de 2004]

IEEE C802.16d-0460r1. *REVd Sponsor Ballot Recirc #1 – Resolution to issues regarding comment 150*. April 24, 2004. Disponível em http://wirelessman.org/tgd/contrib/C80216d-04_60r1.pdf [Acesso em: Agosto de 2004]

IEEE Std 802.16.2-2003. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems – Amendment 2: Medium Access Control Modifications and Additional Physical Layer Specifications for 2–11 GHz (Amendment to IEEE Std 802.16-2001). April 01, 2003. Disponível em http://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?isNumber=26891 [Acesso em: Agosto de 2004]

IEEE Std 802.16.2-2001. IEEE Recommneded Practice for Local and metropolitan area networks. Coexistence of Fixed Broadband Wireless Access Systems. September 10, 2001. Disponível em http://ieeexplore.ieee.org/xpl/tocresult.jsp?isNumber=20557 [Acesso em: Agosto de 2004]

IEEE Std 802.16-2001. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks. *Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*. December 06, 2001. Disponível em http://standards.ieee.org/getieee802/download/802.16-2001.pdf [Acesso em: Agosto de 2004]

INTEL Corporation. *IEEE 802.16* and WiMAX – Broadband Wireless Access for Everyone*. White Paper. July 1, 2003. Disponível em http://www.intel.com/ebusiness/pdf/wireless/intel/80216_wimax.pdf [Acesso em: Julho de 2004]

ITU – International Telecommunications Union. *Birth of Broadband*. September 2003. Disponível em http://www.itu.int/osg/spu/publications/sales/birthofbroadband/ [Acesso em: Agosto de 2004]

ITU-R Recommendation M.1034-1. Requirements for the radio interface(s) for International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000), 1998

KAY, Russell. *QuickStudy: WiMAX*. ComputerWorld. 01 December 2003. Disponível em http://www.computerworld.com/mobiletopics/mobile/story/0,10801,87555,00.html [Acesso em: Agosto de 2004]

LAWSON, Stephen. *WiMAX starting to make its move*. Network World. 06 July 2004. Disponível em http://www.nwfusion.com/news/2004/0607WiMAX.html [Acesso em: Agosto de 2004]

LIPSET, Vikki. *802.16e vs. 802.20*.Wi-Fi Planet. September 4, 2003. Disponível em http://www.wi-fiplanet.com/columns/article.php/3072471 [Acesso em: Agosto de 2004]

MARKS, Roger. The IEEE 802.16 WirelessMAN Standard for Broadband Wireless Metropolitan Area Networks (presentation). *Fifth Annual International Symposium On Advanced Radio Technologies*. Colorado, USA. March 2003. Disponível em http://www.its.bldrdoc.gov/meetings/art/art03/slides03/mar_r/mar_slides.pdf [Acesso em: Agosto de 2004]

MBWA WG. *IEEE 802.20 Mobile Broadband Wireless Access (MBWA) Working Group*. 2002. Disponível em http://grouper.ieee.org/groups/802/20/. [Acesso em: Agosto de 2004]

NAIR, Govindan et al. *IEEE 802.16 Medium Access Control and Service Provisioning*. Intel Technology Journal. Volume 08, Issue 03. August 20, 2004. Disponível em http://www.intel.com/technology/itj/2004/volume08issue03/art04_ieee80216mac/vol8_art04.pdf [Acesso em: Agosto de 2004]

PAOLINI, Monica. *Wi-Fi, WiMAX and 802.20 – The Disruptive Potential of Wireless Broadband*. March, 2004. Disponível em http://www.eyeforwireless.com/WiMAXupdate.pdf [Acesso em: Agosto de 2004]

POSTEL, J.; Harrenstien, K. *Time Protocol*. RFC 868, May 1983. Disponível em http://www.ietf.org/rfc/rfc868.txt [Acesso em: Setembro de 2004]

PRADO, Eduardo. *WiMAX em Bancos. Imagina se a moda "pega"?* WirelessBR. 2004. Disponível em http://www.wirelessbrasil.org/wirelessbr/colaboradores/eduardo_prado/artigo_40.html [Acesso em: Agosto de 2004]

RAMACHANDRAN, Shyamal. *Link Adaptation Algorithm and Metric for IEEE Standard 802.16*. Master's Thesis. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. Electrical Engineering. February 12, 2004. Disponível em http://scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-02272004-133201/unrestricted/ramachandran_thesis.pdf [Acesso em: Agosto de 2004]

SHENKER, S.; PARTRIDGE, C.; GUERIN, R. *Specification of Guaranteed Quality of Service*. RFC 2212, September 1997. Disponível em http://www.ietf.org/rfc/rfc2212.txt [Acesso em: Agosto de 2004]

STEPANOV, Maxim & ROSNER, Gedon. *Dynamic Customization and Adaptive Content Delivery for Wireless Clients*. Seminar on Databases in the Internet Environment. The Hebrew University, Institute of Computer Science. November 17, 2002. Disponível em http://www.cs.huji.ac.il/course/2002/sdbi/2003/wireless.ppt [Acesso em: Agosto de 2004]

Tech Options For Robust Networks. The Financial Express. May 05, 2004. Disponível em http://www.financialexpress.com/fe_full_story.php?content_id=58442 [Acesso em: Julho de 2004]

VAUGHAN-NICHOLS, Steven J. *The New Last Mile Broadband*: WiMAX. Enterprise IT Planet. April 30, 2004. Disponível em http://www.enterpriseitplanet.com/networking/features/article.php/3348111 [Acesso em: Julho de 2004]

Webopedia. 2004. http://www.webopedia.com. [Acesso em: Agosto de 2004]

Wikipedia. Line-of-sight propagation. Disponível em http://en.wikipedia.org/wiki/Line-of-sight_propagation [Acesso em: Agosto de 2004]

WiMAX Forum. Disponível em http://www.wimaxforum.org/ [Acesso em: Julho de 2004]

WiMAX. *IEEE 802.16a Standard and WiMAX Igniting Broadband Wireless Access*. White Paper. 2004. Disponível em http://www.WiMAXforum.org/news/downloads/WiMAXWhitepaper.pdf [Acesso em: Agosto de 2004]

YAGHOOBI, Hassan. *802.16 Broadband Wireless Access: the next big thing in wireless* (presentation). IDF Fall 2003 Conferences. Intel Broadband Wireless Division, Wireless Networking Group. September 16, 2003 Disponível em: http://www.intel.com/idf/us/fall2003/presentations/F03USWNTS111_OS.pdf [Acesso em: Setembro de 2004]

Apêndice 1 Acrônimos

3GPP	3rd Generation Partnership Project
AAS	Advanced Antenna Systems
ADSL	Asymmetric Digital Subscriber Line
AES	Advanced Encryption Standard
ARQ	Automatic Repeat reQuest
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BA	Behavior Aggregate
BE	Best Effort
BRAN	Broadband Radio Access Networks
BS	Base Station
BWA	Broadband Wireless Access
CAC	Call Admission Control
CBR	Constant Bit Rate
CDMA	Code Division Multiple Access
CID	Connection IDentifier
DES	Data Encryption Standard
DFS	Dynamic Frequency Selection
DHSS	Direct Sequence Spread Spectrum
DiffServ	Differentiated Services
DL-MAP	DownLink Map Message
DOCSIS	Data Over Cable Service Interface Specification
DSA	Dynamic Service Addition
DSCP	DiffServ Code Point
DSL	Digital Subscriber Line
DSSS	Direct-Sequence Spread Spectrum
EDGE	Enhanced Data rates for GSM Evolution
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FDD	Frequency Division Dyuplex
FDM	Frequency Division Multiplexing
FDMA	Frequency Division Multiple Access
FEC	Forward Error Correction
FFT	Fast Fourier Transform
FHSS	Frequency-Hopping Spread Spectrum

FTP	File Transfer Protocol
GFR	Guaranteed Frame Rate
GPC	Grant Per Connection
GPRS	General Packet Radio Services
GPSS	Grant Per Subscriber Station
GSM	Global System for Mobile communications
HFC	Hybrid Fiber Coax
HIPERACCESS	High Performance Radio Access
HIPERLAN	High Performance Radio LAN
HIPERMAN	High Performance Radio Metropolitan-Area Network
HIPERPAN	High Performance Radio Personal-Area Network
HTTP	HyperText Transfer Protocol
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force
IMT 2000	International Mobile Telecommunications 2000
IntServ	Integrated Services
IP	Internet Protocol
IPv4	Internet Protocol Version 4
IPv6	Internet Protocol Version 6
ITU	International Telecommunication Union
LAN	Local Area Network
LED	Light Emitting Diode
LMDS	Local Multipoint Distribution System
LOS	Line Of Sight
MAC	Medium Access Control
MAN	Metropolitan Area Network
MBWA	Mobile Broadband Wireless Access
MIB	Management Information Base
MMDS	Multipoint Microwave Distribution System
MMS	Multimedia Message Service
MPEG	Moving Picture Experts Group
NLOS	Non Line Of Sight
nrtPS	Non-Real-Time Polling Service
OFDM	Orthogonal Frequency Division Multiplexing
PAN	Personal Area Network

PHY	Physical Layer
PLC	Power Line Communication
QAM	Quadrature Amplitude Modulation
QoS	Quality of Service
QPSK	Quadrature Phase Shift Keying
RF	Radio Frequency
RSVP	Resource reSerVation Protocol
rtPS	Real-Time Polling Service
SA	Smart Antennas
SDL	Symmetrical DSL
SFID	Service Flow IDentifier
SHDSL	Single Pair High-Speed DSL
SMS	Short Message Service
SoHo	Small office Home office
SS	Subscriber Station
STC	Space-Time Coding
TCO	Traffic Class Octet
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time-Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TFTP	Trivial File Transfer Protocol
ToS	Type of Service
UGS	Unsolicited Grant Service
UIUC	Uplink Interval Usage Code
UL-MAP	UpLink Map Message
VoIP	Voice over IP
VPN	Virtual Private Network
W-CDMA	Wideband CDMA
Wi-Fi	Wireless Fidelity
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WirelessHUMAN	Wireless High-Speed Unlicensed Metropolitan Area Networks
WISP	Wireless Internet Service Provider
WLAN	Wireless Local Area Network
WMAN	Wireless Metropolitan Area Network