

Capítulo

1

Acesso de Banda Larga Sem-fio (WBA) e Redes Metropolitanas Sem-fio (WLAN) baseados no padrão IEEE 802.16 (WiMAX)

Cristiano Bonato Both (cboth@unisc.br)

Rafael Kunst (rkunst@inf.ufrgs.br)

Juergen Rochol (juergen@inf.ufrgs.br)

Abstract

This course studies the state of art on wireless broadband metropolitan area networks. The goal of the IEEE 802.16 group was to standardize the physical layer and the medium access control layer, leading to supply the deficiencies on throughput rates and geographical extension. This system defines the WirelessMAN (WMAN) air interface specification for wireless metropolitan area networks, which is an evolution of WLL (Wireless Local Loop) technology. The main goal of this work is to study the medium access control techniques such as the physical layer of this new standard.

Resumo

Este minicurso aborda o estado da arte no que diz respeito às redes de banda larga sem fio, com abrangência metropolitana, atingindo elevadas taxas de transmissão. O objetivo do grupo IEEE 802.16 ao propor a tecnologia foi o de padronizar as camadas física e de controle de acesso ao meio, visando suprir as deficiências no que se refere as taxas de transmissão e à extensão geográfica. Este sistema definiu o WirelessMAN (WMAN), que é uma evolução da tecnologia WLL (Wireless Local Loop). Na referida padronização, a disponibilidade dos acessos cobre áreas urbanas, suburbanas ou rurais, com alcance médio de dezenas de quilômetros. Sendo assim, este trabalho propoe-se a estudar as características das técnicas de controle de acesso ao meio, além da camada física desse novo padrão.

1.1. Introdução

Atualmente, as redes de computadores transformaram-se em redes de informações que oferecem comunicação de dados, voz e vídeo. As pessoas necessitam obter e trocar

informações a qualquer momento, em diversos lugares. Isso alavanca o crescimento de provedores de serviço que oferecem conexões de banda larga.

As tecnologias que são utilizadas, hoje em dia, para prover conexões possuem um alto custo de implantação e são limitadas a distâncias geográficas [CHOI and CHOI 2005]. Nos últimos anos, as redes sem fio, como por exemplo, as redes locais IEEE 802.11 (*Wireless Local Area Network* - WLAN) tornaram-se uma boa solução para minimizar essas limitações. Pesquisas [Karrer et al. 2004, Cho et al. 2005, Chu et al. 2002] surgiram para aumentar a abrangência de cobertura dessas tecnologias, possibilitando o acesso à banda larga em áreas geograficamente distantes.

Este minicurso aborda o estado da arte no que diz respeito às redes de banda larga sem fio, com abrangência metropolitana, atingindo elevadas taxas de transmissão. O objetivo do grupo IEEE 802.16 ao propor a tecnologia foi o de padronizar as camadas física e de controle de acesso ao meio, visando suprir as deficiências no que se refere as taxas de transmissão e à extensão geográfica. Este sistema definiu o *WirelessMAN* (WMAN), que é uma evolução da tecnologia WLL (*Wireless Local Loop*).

A norma IEEE 802.16d [IEEE-802.16 2004] define a interface aérea para sistemas fixos e a norma IEEE 802.16e [IEEE-802.16 2005] - publicada recentemente - define a interface aérea para sistemas fixos e móveis em redes metropolitanas, como uma solução para acesso sem fio à banda-larga (*Broadband Wireless Access System* - BWA). O sistema conhecido como *WirelessMAN* oferece uma alternativa aos sistemas de acesso tradicionais, como por exemplo, *cable modem* e DSL (*Digital Subscriber Line*). Entretanto, sistemas sem fio possuem a capacidade de prover serviços de acesso a áreas geograficamente inviáveis (técnicamente e financeiramente), com menor custo de infra-estrutura, altas velocidades e bom desempenho [Ghosh et al. 2005].

A tecnologia *WirelessMAN*, como provedora de serviços, irá gerar novas alternativas para aplicações como: serviço de telefonia, distribuição de sinais de TV (*broadcast*) e acesso de banda larga à Internet para usuários residenciais, comerciais, industriais e de centros universitários. Assim, esse é um novo nicho de mercado que está revolucionando as empresas de telecomunicação e os fabricantes de equipamentos de interconexão [Eklund et al. 2002].

As principais vantagens do IEEE 802.16 são: (i) habilidade de prover serviços em áreas de difícil implantação de infra-estrutura, (ii) capacidade de ultrapassar limites físicos, como paredes ou prédios, (iii) alta escalabilidade, (iv) baixo custo de instalação, atualização e manutenção, entre outras [Maciel 2005].

Estas especificações possuem o apoio do consórcio WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), com mais de 150 empresas associadas [WiMAX 2006].

As taxas de transmissão de dados vão de 50 à 150 Mbit/s, dependendo da frequência do canal, do tipo de modulação e das técnicas de controle de erros.

Com o objetivo de prover QoS, o IEEE 802.16 define quatro classes com diferentes requisitos de serviços: aplicações com taxa constante de bits, aplicações de tempo real com taxa variável de bits, aplicações sem requisitos de tempo real e tráfego para o melhor esforço, assim como a configuração da conexão entre a BS (*Base Station*) e a SS (*Sub-*

criber Station) e seus mecanismos de sinalização [IEEE-802.16 2004]. Apesar dessas especificações, não é definido pela norma um mecanismo de gerenciamento para garantia de qualidade de serviço. As quatro classes permitem a distinção entre fluxos de tráfego e a possibilidade de um tratamento diferenciado para cada fluxo. Entretanto, simplesmente classificar os fluxos não garante que eles recebam um serviço com a QoS desejada.

1.1.1. Organização do Texto

O restante deste curso está organizado da seguinte maneira: a Seção 1.2 faz uma introdução ao padrão, assim como as suas principais aplicações, exemplos de topologias e de arquiteturas de rede que podem ser empregadas.

A Seção 1.3 realiza uma abordagem referente à camada física padronizada para a tecnologia. São estudados os tipos de canais utilizados para transmissão de dados, as mensagens de controle do nível físico, as técnicas padronizadas de transmissão, de duple-xagem e de modulação adaptativa. Além disso, estuda-se os mecanismos de codificação e de controle de erros. Por fim, é realizada uma abordagem referente ao emprego de sistemas de antenas adaptativas, cuja finalidade é introduzir maior confiabilidade no envio de dados, através do emprego de diversidade espacial.

A Seção 1.4 apresenta a camada de controle de acesso ao meio da tecnologia. São estudadas as subcamadas que a formam: comum e de convergência de serviços. Em seguida, aborda-se a arquitetura para troca de mensagens padronizada na norma IEEE 802.16. Na sequência, é realizado estudo do tipo de serviço padronizados e, conseqüentemente, do mecanismo de provimento de qualidade de serviço. As técnicas de escalonamento de serviços também são apresentadas. Além disso, estudam-se os mecanismos de aquisição e monitoramento das subportadoras de um canal. O último possui a finalidade de iniciar o processo de adaptação da transmissão de acordo com as condições da interface aérea. Finalmente, são abordados tópicos referentes a segurança da norma em estudo.

A Seção 1.5 realiza uma introdução básica aos equipamentos que estão sendo certificados, no que diz respeito à interoperabilidade, pelo fórum dos fabricantes (WiMAX).

Por fim, na Seção 1.6, são apresentadas considerações finais referentes ao estudado no curso, bem como pesquisas em desenvolvimento nesta área.

1.2. O Padrão IEEE 802.16: Aplicações, Topologias e Arquitetura

Em julho de 1999 o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) criou o grupo de trabalho 802.16, formado por universidades e fabricantes, para desenvolver um padrão para sistemas BWA (*Broadband Wireless Access*) (<http://WirelessMAN.org>). Nestes 7 anos várias emendas foram publicadas pelo grupo, sendo que a última versão da norma (IEEE 802.16e), foi aprovada em 7 de dezembro de 2005 [IEEE-802.16 2005] e publicada em 28 de fevereiro de 2006, com o seguinte escopo: “especificar a interface aérea para sistema fixo e móvel de acesso sem fio à banda larga”.

Esta tecnologia foi desenvolvida para atuar em redes metropolitanas (MANs - *Metropolitan Area Network*), por isso usa a topologia, como pode ser observado na Figura 1.1, oferecendo dois serviços para partilhamento do canal de rádio frequência (RF):

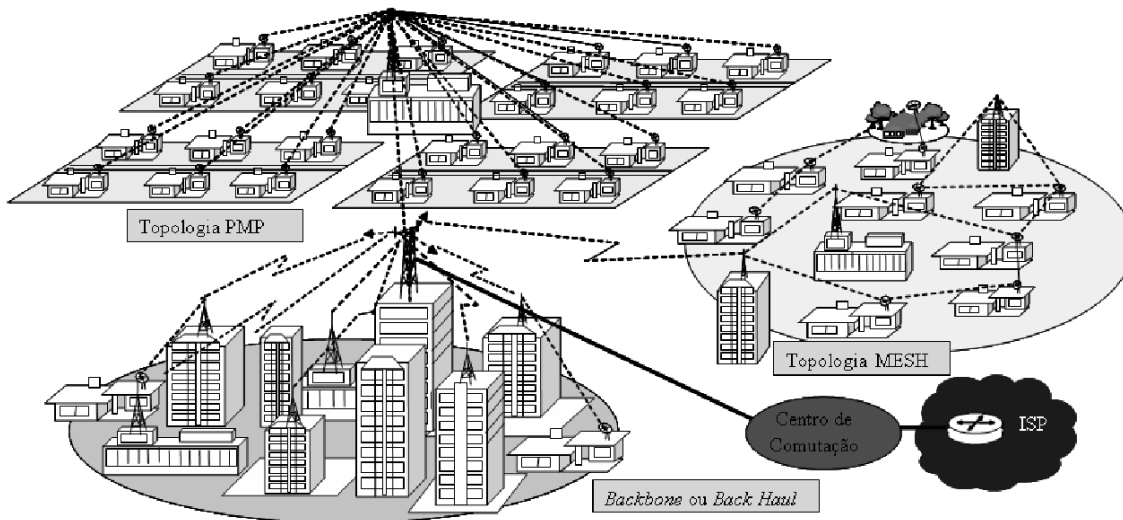


Figura 1.1. Topologia IEEE 802.16

- Topologia PMP (*Point to Multi-Point*): consiste de uma estação base (*Base Station* - BS) e uma ou mais estações clientes (*Subscriber Station* - SS);
- Topologia *Mesh*: os nodos são organizados em forma ad-hoc. Isto é, todas as estações clientes são pares (*peers*) e cada par pode atuar como roteador para repassar pacotes dos seus nodos vizinhos [Akyildiz and Wang 2005, Bruno et al. 2005].

A BS é o nó central que coordena toda a comunicação e as SSs se localizam à diferentes distâncias da BS. A estação base pode estar conectada a uma outra infraestrutura de rede, como por exemplo, um ISP (*Internet Service Providers*), possibilitando uma extensão dos serviços oferecidos aos usuários. Da mesma forma, as estações clientes podem oferecer serviços diferenciados para usuários conectados através de uma rede local cabeada (Ethernet, padrão IEEE 802.3), ou sem fio (padrão IEEE 802.11).

A tecnologia WirelessMAN foi projetada nas camadas física e enlace, esta última estando subdividida em três subcamadas distintas: SS-CS (*Service Specific Convergence Sublayer*, CPS (*Common Part Sublayer*) e subcamada de segurança (*Security Sublayer*). A organização das subcamadas é vista na Figura 1.2 [IEEE-802.16 2004]. As subcamadas serão descritas na Seção 1.4, possuindo as seguintes funções:

- Subcamada de Convergência de Serviços Específicos (SS-CS): a função principal desta subcamada é classificar as unidades de serviços de dados SDUs (*Service Data Units*) para a apropriada conexão MAC, preservando ou habilitando QoS e alocação de largura de banda. A norma especifica dois serviços: encapsulamento de células e encapsulamento de pacotes;
- Subcamada Comum (CPS): nesta subcamada são executadas as principais funções de acesso e controle. Os principais serviços fornecidos por esta subcamada são: acesso de uma SS no sentido *downlink*; acesso de uma SS no sentido *Uplink*; prover

técnicas de QoS para conexões MAC; definir tipos de conexões, classes de fluxos de serviços e estrutura dos quadros MAC; realizar escalonamento de fluxos de serviço e controle de admissão de conexões;

- Subcamada de Segurança: a preocupação do padrão IEEE 802.16 foi definir uma suíte criptográfica - conjunto de funcionalidades desejáveis para atender aos serviços de segurança necessários. O conceito envolvido é o de associações criptográficas, que contém informações sobre quais algoritmos devem ser aplicados, que chaves usar, entre outros. O padrão define ainda um processador dedicado à segurança na estação base (BS). Há ainda alguns requisitos de funcionalidades criptográficas para o tráfego, bem como para a autenticação ponto-a-ponto.

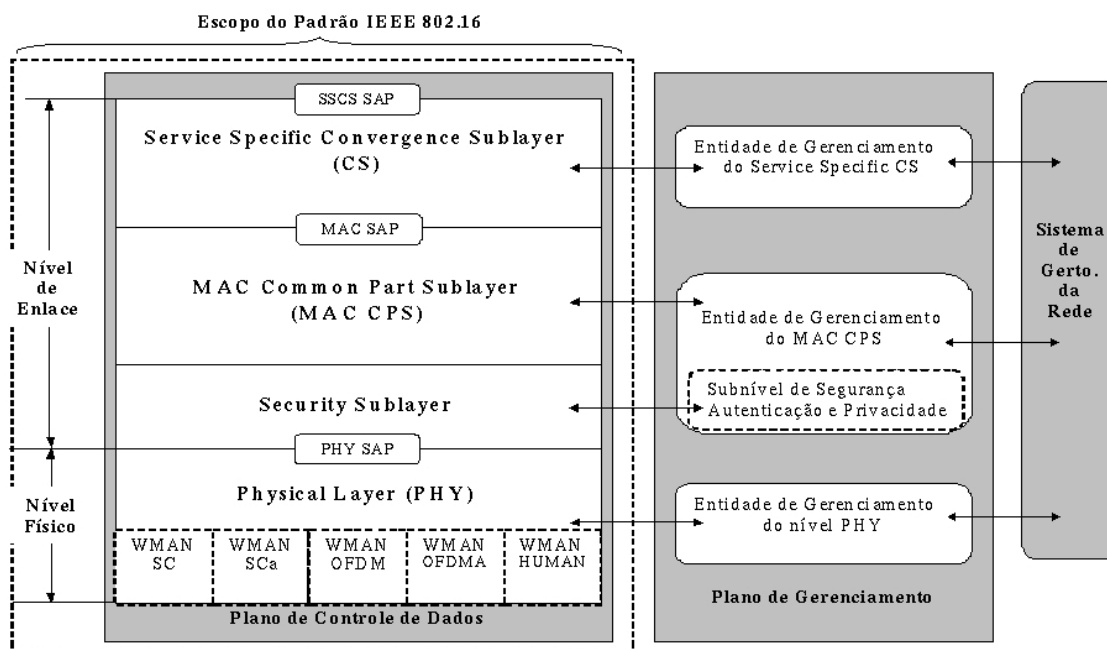


Figura 1.2. Organização das subcamadas do padrão IEEE 802.16

Também é possível observar na Figura 1.2, que a tecnologia possui um sistema de gerenciamento (*top-down* ou *bottom-up*), que prevê a utilização do protocolo SNMP (*Simple Network Management Protocol*). Já na camada física existem 5 tipos diferentes de interfaces aéreas que são suportadas pela tecnologia: WMAN SC, WMAN SCa, WMAN OFDM, WMAN OFDMA e WMAN HUMAN. Essas interfaces serão descritas na próxima Seção 1.3.

1.3. Camada Física

A camada física (PHY) foi inicialmente projetada para operar em intervalos de frequência que variam de 10 GHz até 66 GHz, com exigência de existir linha de visada (LOS - *Line Of Sight*) entre a *Base Station* (BS) e a *Subscriber Station* (SS). Este cenário deve ser melhor adaptado a zonas rurais, onde pode-se obter maiores distâncias no alcance das ondas, assim como maior vazão na rede. Porém, com a necessidade de adaptar-se a

tecnologia à relidade dos grandes centros urbanos, ou seja, locais com muitos obstáculos para a propagação das ondas, o grupo de trabalho IEEE 802.16, em março de 2000, propôs a padronização IEEE 802.16a.

Nesse documento, foi recomendado a adoção de faixas de frequência mais baixas, variando de 2 até 11 GHz. Com isso, eliminou-se a necessidade de linha de visada (NLOS - *Non Line Of Sight*), ao mesmo tempo que a implementação pode-se dar em bandas licenciadas ou não licenciadas.

O fórum de fabricantes, conhecido como WiMAX, disponibilizou diversas opções quanto às bandas de frequência para os primeiros produtos certificados que utilizam o padrão IEEE 802.16d, algumas bandas na faixa licenciada: 2.5 até 2.69 e 3.4 até 3.6 GHz e outras no intervalo espectral não licenciado: 5.725 à 5.850 GHz [Ghosh et al. 2005]. Essas bandas de frequência foram determinadas para garantir a interoperabilidade entre diferentes fabricantes.

As transmissões ocorrem em dois canais diferentes: um canal de descida (*downlink* - DL), o qual é abordado na Subseção 1.3.1, onde o fluxo dos dados é direcionado da BS para as SSs. O outro canal é de subida (*uplink* - UL), onde o sentido da transmissão é direcionado das SSs para a BS, conforme explicado na Subseção 1.3.2.

O padrão define três possíveis tempos de duração para os quadros, os quais são controlados pela BS: 0,5ms, 1ms ou 2ms [Eklund et al. 2002]. A divisão do quadro é dada na medida de *Physical Slots* (PS), onde cada PS equivale a quatro símbolos de modulação QAM, a qual será detalhada na Subseção 1.3.4.

O restante desta Seção está organizado como segue: a Subseção 1.3.1 apresenta os conceitos referentes ao canal de descida *downlink*. A Subseção 1.3.2 discute o canal de subida *uplink*. A Subseção 1.3.3 apresenta as técnicas de transmissão adotadas pela norma IEEE 802.16. Na Subseção 1.3.4 é discutida a subcamada de convergência de transmissão. Por fim, na Subseção 1.3.5 é apresentado o conceito de antenas adaptativas, uma vez que essas são suportadas pela tecnologia.

1.3.1. Canal Downlink

A transmissão de dados por parte da *Base Station* para as *Subscriber Stations* é realizada através do canal conhecido como *downlink* - DL, ou ainda canal de descida. A estrutura de dados utilizada para o envio das informações é chamada de sub-quadro *dowlink*, a qual é apresentada na Figura 1.3.

Como pode-se inferir a partir da análise da Figura 1.3, a transmissão no sentido *downlink* é realizada por difusão, ou seja, somente a BS transmite, utilizando *broadcast*, fazendo com que todas as SS recebam os dados, mas apenas acessem os dados que pertencem a ela, informação que é retiradas do UL-MAP, que é descrito na Subseção 1.3.2.

O subquadro inicia-se com um preâmbulo, cuja função é realizar a sincronização da transmissão. Em seguida, são inseridos o mapa de descida (DL-MAP) e o mapa de canal de subida (UL-MAP). O DL-MAP contém informações referentes às oportunidades de transmissão para cada SS.

Os mapas são compostos por *Information Elements* (IE) que definem como deter-

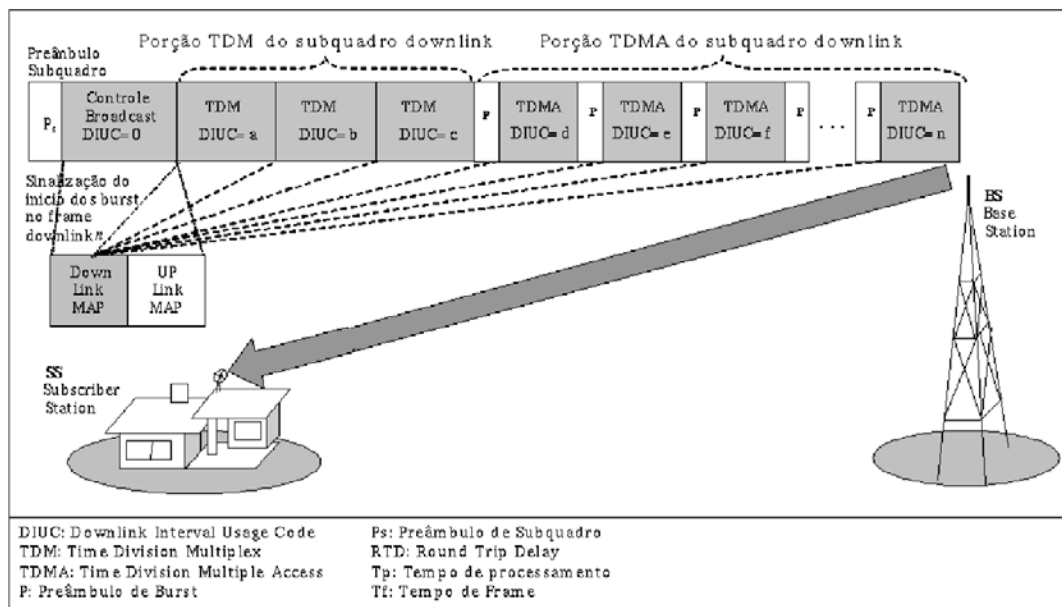


Figura 1.3. Subquadro Downlink

minado intervalo de *uplink* será usado por cada uma das *subscriber stations* que solicitaram ou que têm direito de enviar dados no próximo tempo reservado. Além disso, define um período de contenção que pode ser utilizado pelas SS para requerer oportunidades futuras de transmissão.

A norma IEEE 802.16 define quatro tipos de *Information Elements*, os quais são explicados a seguir [Ramachandran et al. 2002]:

- *Request IE*: indica a duração, em *Physical Slots*, da oportunidade de solicitação de banda para o próximo intervalo *uplink*.
- *Initial Mantaince IE*: especifica as oportunidades de ingresso na rede para novas estações. É utilizado para agendar a negociação inicial de banda e de tipo de tráfego.
- *Station Mantaince IE*: indica, para o próximo intervalo *uplink*, espaço reservado a fim de que as estações realizem manutenção, no que diz respeito à controle de energia e potência de transmissão.
- *Data Grant Burst Type IEs*: especifica as oportunidades de envio de dados (*Packet Data Units* - PDUs) no *uplink*.

A seguir, o quadro apresenta uma porção de dados TDM. Em cada espaço é inserido um identificador do perfil de rajada que está sendo utilizado para sua transmissão, o qual é conhecido como DIUC (*Downlink Interval Usage Code*) e é negociado no momento da inicialização e através das mensagens de *ranging* (processo que testa o canal para definir correções de tempo e potência da transmissão), a qual é executada através do

Station Maintance IE. O perfil de rajada é composto pelos parâmetros de modulação e FEC (*Forward Error-Correction*), os quais são estudados na subseção 1.3.4.

Os dados são transmitidos sempre em ordem decrescente, tomando como parâmetro o quanto é robusto determinado perfil de transmissão. Isso permite que todas as *subscriber stations* possam receber os dados endereçados a elas, antes que encontre um perfil com o qual não consegue lidar em determinado instante de tempo.

No caso de duplexação FDD, além da porção TMD, existe uma porção TDMA (*Time Division Multiple Access*), como pode ser visto na Figura 1.3, a qual insere um novo preâmbulo a cada perfil de rajada, tendo em vista maiores dificuldades de sincronização, causada pelo suporte á transmissão *half-duplex*.

1.3.2. Canal Uplink

A transmissão no canal de subida é realizada pelas *subscriber stations*, tendo como objetivo comunicar-se com a *base station*. Para que seja possível o envio de mensagens por diversas fontes, é utilizada a técnica TDMA. Como o canal é compartilhado, é possível ocorrer colisões. A detecção das mesmas por parte das SS ocorre quando, no próximo UL-MAP, não constar a oportunidade solicitada, nesse caso, a solicitação é encaminhada novamente.

A estrutura de dados utilizada para tráfego de subida é chamada de subquadro *uplink*, e sua estrutura é apresentada na Figura 1.4.

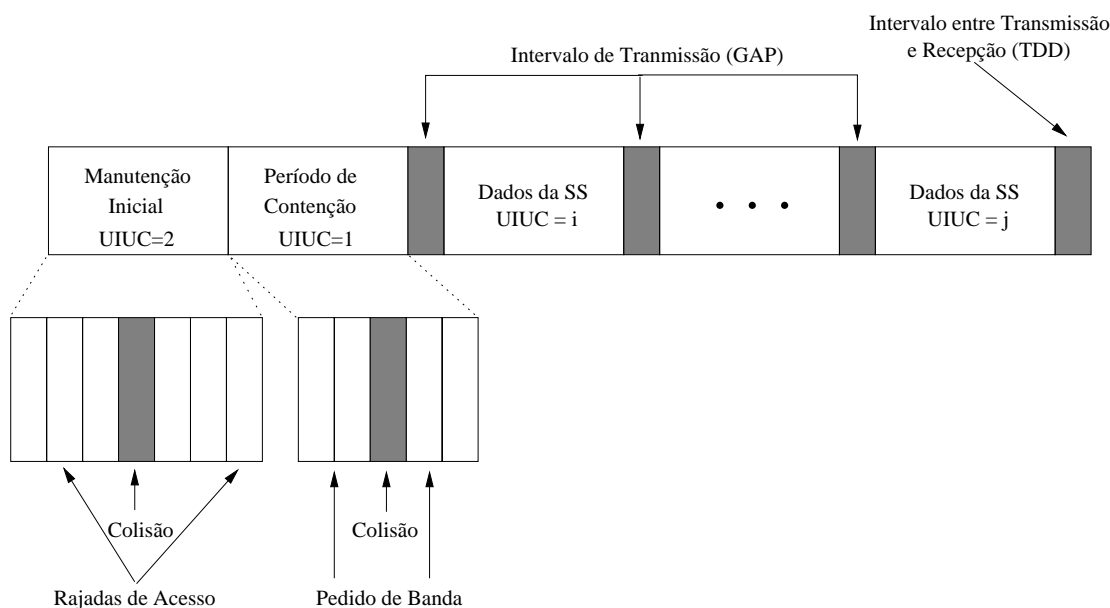


Figura 1.4. Subquadro Uplink

A primeira parte do subquadro corresponde aos *time slots* reservados para manutenção inicial, oportunidade na qual podem ser atendidas requisições de ingresso na rede, bem como de alteração do perfil de rajada. Em seguida, inicia-se o período de contenção, no qual as *subscriber stations* podem realizar solicitações de banda para transmissão no

próximo período de *uplink*.

A última parte do subquadro é composta pelos intervalos de transmissão das *subscriber station*, os quais foram escalonados no UL-MAP encaminhado pela *base station* no último subquadro *downlink* enviado.

No DL, como já visto, os dados são transmitidos por difusão, enquanto no UL o meio é compartilhado através de múltiplos acesso. O padrão fornece a flexibilidade de dois esquemas para alocação de banda [IEEE-802.16 2004]. Além disso, são padronizados cinco modelos de interface aérea. Essas técnicas de transmissão são discutidas na Subseção 1.3.3.

1.3.3. Técnicas de Transmissão no Padrão IEEE 802.16

O padrão IEEE 802.16 suporta duas possibilidades quanto à técnicas de duplexação: TDD (*Time-Division Duplex*) e FDD (*Frequency-Division Duplex*).

A técnica de duplexação por divisão de tempo (TDD), faz com que o *uplink* e o *downlink* compartilhem o mesmo canal de rádio-freqüência, ou seja, eles não transmitem simultaneamente. Sendo assim, são definidos intervalos de tempo, sendo que o canal é alternado, de acordo com a distribuição do tempo, entre *uplink* e *downlink*. O funcionamento desse esquema é apresentado na Figura 1.5

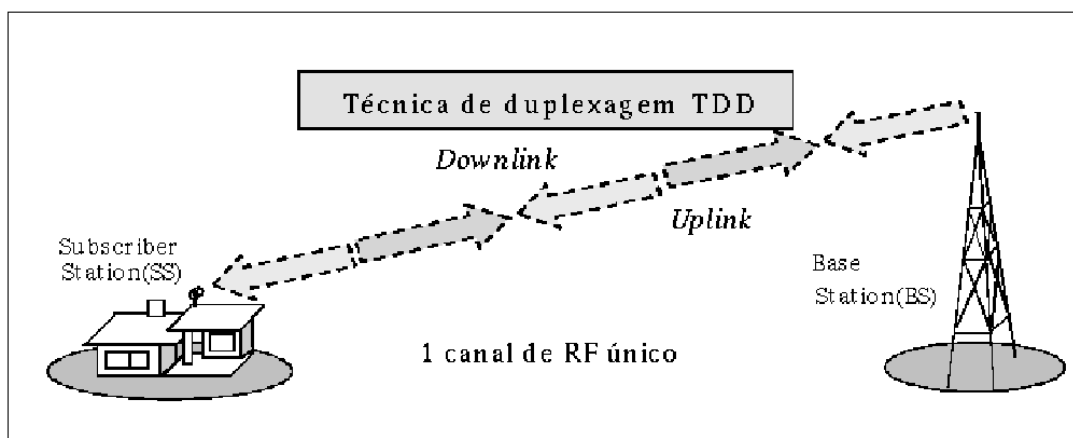


Figura 1.5. Duplexação TDD

O esquema de duplexação por divisão de freqüência (FDD), possibilita que o *uplink* e o *downlink* operem em canais de diferentes freqüências. Isso permite que seja implementado um sistema o qual faz com que as *subscriber stations* operem em *half-duplex*, ou seja, otimiza o enlace aéreo, ao mesmo tempo que não aumenta muito o custo da solução, pois há transmissão simultânea nos canais.

Existe também a possibilidade de utilizar-se *full-duplex*, ou seja, ambos canais trafegando dados ao mesmo tempo, fato que torna o sistemas mais complexo e conseqüentemente o encarece. O funcionamento dessa técnica é ilustrado pela Figura 1.6.

Tanto a técnica de transmissão TDD quanto a FDD possuem a capacidade de tra-

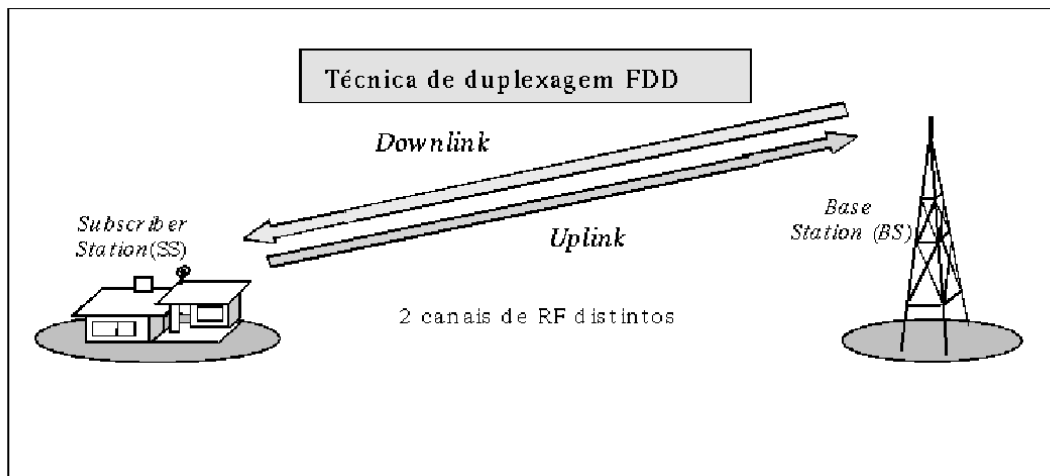


Figura 1.6. Duplexação FDD

balhar com adaptação dinâmica do perfil de rajada, onde a modulação e a codificação é definida dinamicamente para cada rajada de dados transmitida, como é visto na Subseção 1.3.4.

O padrão IEEE 802.16a/d possui diferentes especificações de interfaces aéreas que em conjunto com a camada MAC fornece confiabilidade ponto-a-ponto para o enlace. As cinco especificações das interfaces aéreas são:

- **WirelessMAN-SC (*Single Carrier*)**: a camada física com interface aérea usa uma única portadora que opera a altas frequências, sendo assim necessária a garantia de linha de visada;
- **WirelessMAN-SCa (*Single Carrier adaptive*)**: usa uma única portadora adaptativa para a interface aérea, com isso é possível a transmissão fora de linha de visada;
- **WirelessMAN-OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*)**: multiplexação por divisão de frequência ortogonal com 256 portadoras, 192 são utilizadas para dados, 56 são anuladas, por serem utilizadas como banda de resguarda, e 8 são pilotos, ou seja, utilizadas para auxiliar na sincronização. O acesso múltiplo para diferentes estações clientes (SSs) é baseado em divisão de tempo (TDMA - *Time-Division Multiple Access*). É o padrão recomendado pelo fórum dos fabricantes (WiMAX) por sofrer menos com interferência e permitir o cálculo da transformada rápida de Fourier (FFT - *Fourier Fast Transform*). A Figura 1.7 mostra um exemplo de canal utilizando WirelessMAN-OFDM;
- **WirelessMAN-OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*)**: OFDM com 2048 portadoras. O acesso múltiplo é fornecido atribuindo um subconjunto de portadoras para um único receptor. Este esquema de acesso múltiplo é fornecido para ser usado combinando TDMA e OFDMA.

- WirelessMAN HUMAN (*High-speed Unlicensed MAN*): especificação para redes metropolitanas não licenciadas, suporta os mesmos padrões, possuindo alguns componentes específicos de canalização e transmissão de máscara espectral.

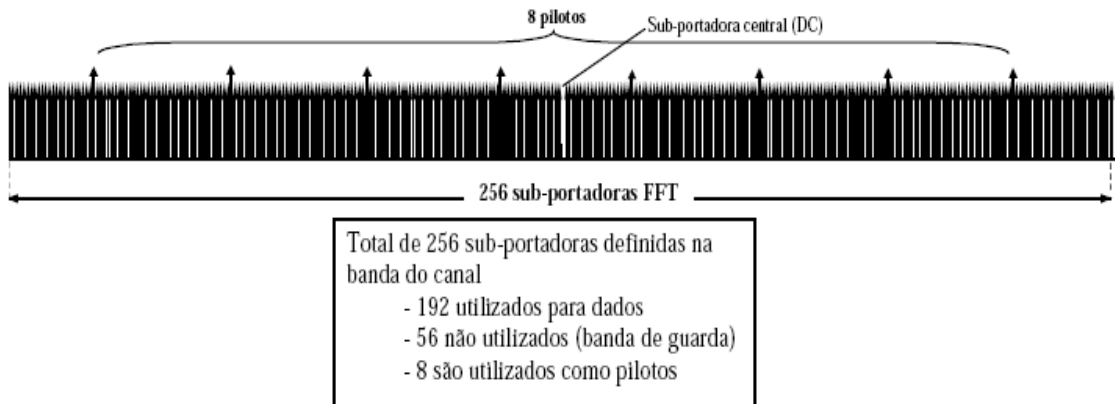


Figura 1.7. Canal de Transmissão WirelessMAN-OFDM

1.3.4. Convergência de Transmissão

A subcamada de Convergência de Transmissão (*TCS - Transmission Convergence Sublayer*) faz a ligação entre a camada Física e a camada de controle de acesso ao meio (MAC). Sua função é encapsular os PDUs (*Packet Data Units*) recebidos da camada MAC em blocos FEC (*Forward Error-Correction*), de acordo com um perfil de envio de rajada, para que posteriormente sejam transmitidos através da interface aérea.

A Figura 1.8 mostra a transformação dos PDUs da camada MAC em blocos FEC. O quadro de dados recebido da camada MAC contém além dos PDUs, um ponteiro (Po), que é responsável por apontar para o primeiro bloco não fragmentado da sequência, o que permite que haja sincronização. Em seguida, cada parte é transformada em um bloco FEC, contendo tipo de modulação e codificação individuais. Por fim, os símbolos de modulação codificados são transformados em *physical slots* para serem enviados através da interface aérea.

Os esquemas de modulação suportados pela norma são, em ordem crescente de bits associados a cada símbolo:

- BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), que é binária, ou seja, associa dois bits por símbolo de modulação;
- QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) e 4-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*), as quais associam quatro bits a cada símbolo transmitido;
- 16-QAM: associa 16 bits a cada símbolo de modulação.

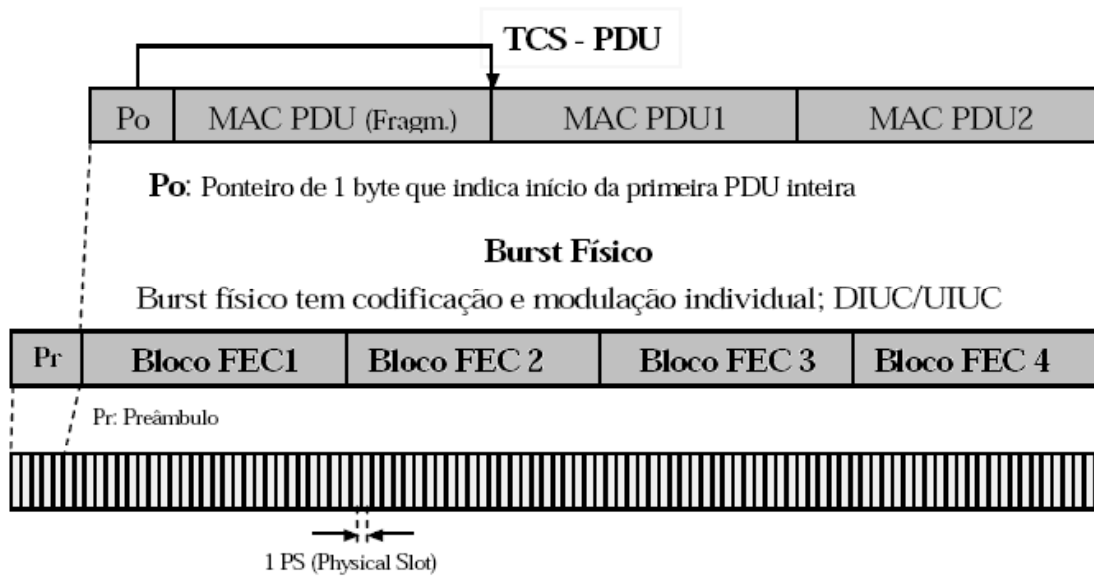


Figura 1.8. Transformação dos PDUs MAC em Blocos FEC

- 64-QAM: a mais poderosa de todas, permite maior vazão da rede, no entanto pode ser utilizada somente em canais de transmissão em boas condições, ou seja, com baixas taxas de erros. Associa 64 bits a cada símbolo de modulação.

Em termos de codificação dos dados enviados, a norma sugere a utilização de *Forward Error-Correction* (FEC) combinado com Códigos Convolucionais (*Convolutional Codes* - CC) para codificar os dados e detectar para posteriormente corrigir os erros que venham a ocorrer. Opcionalmente pode-se utilizar *Turbo Codes* para codificação e HARQ (*Hybrid Automatic-Repeat-Request*) para controle de erros.

Os sistemas de correção de erros do tipo *Forward Error-Correction* funcionam através do tratamento dos erros detectados por parte do destinatário da mensagem, à medida que os dados são recebidos. Para tornar a utilização dessa técnica possível, é necessário que os dados sejam codificados na origem, através da adição de bits redundantes, para então serem transmitidos e, por fim, decodificados no destino, que também é responsável por verificar a ocorrência de erros e, caso eles sejam detectados, por corrigí-los.

No padrão IEEE 802.16, é indicada a utilização de códigos Reed-Solomon para FEC. Um código Reed-Solomon é definido como $RS(n,k)$, onde são transmitidos n bits, dos quais k são dados e $(n - k)$ são bits de paridade. A capacidade de correção de erros é proporcional ao número de bits de paridade inseridos à mensagem original, sendo definida pela fórmula 1:

$$t = \frac{n - k}{2} \quad (1)$$

Os mecanismos de *Automatic-Repeat Request* (ARQ) consistem na retransmissão de dados no caso da detecção de erros por parte do receptor. Esta técnica também

pode ser utilizada em casos nos quais pacotes de dados tenham sido descartados devido a congestionamentos ou qualquer outra dificuldade enfrentada pela rede

Já mecanismos de HARQ fazem uso de técnicas que combinam mecanismos de FEC com ARQ, para aumentar a confiabilidade dos quadros transmitidos através de um canal aéreo sujeito a erros. A principal diferença de uma técnica de HARQ, se comparada com uma ARQ é devidos as retransmissões. Estas, no HARQ são combinadas com as transmissões anteriores, tornando assim o sistema mais confiável [Choi and Shin 2001].

Os códigos convolucionais possuem como característica o fato de poderem codificar blocos de dados de tamanho variado. O funcionamento do codificador é baseado na utilização de um registrador de deslocamento, sendo assim, no padrão IEEE 802.16, tal registrador é utilizado para realizar espalhamento dos bits (*interleaving*), inserindo assim, diversidade temporal na transmissão, minimizando a possibilidade de que um erro em rajada comprometa os dados de forma irreversível. Já os *Turbo Codes* são uma evolução dos códigos convolucionais e, embora padronizados, não são atualmente empregados em sistemas que utilizam a tecnologia.

O perfil de rajada é composto basicamente por um tipo de modulação, uma codificação e um código Reed-Solomon que pode ter sua taxa variada. O perfil varia de acordo com as condições do canal, sendo que o mesmo é constantemente monitorado quanto à sua relação sinal ruído (*Signal to Noise Ration* - SNR).

Quanto menor a relação sinal ruído, pior estão as condições do canal e, portanto, um perfil mais robusto é escolhido, ou seja, um menor número de bits por símbolo será utilizado e a capacidade de correção de erros será aumentada, diminuindo assim a vazão da rede. À medida que a SNR aumenta, um perfil menos robusto é utilizado, portanto, mais bits serão ligados a cada símbolo de modulação e a capacidade da codificação FEC e dos códigos convolucionais será diminuída. A técnica de alteração do perfil segue limites de mudança e apresenta uma zona de sobreposição. O perfil é alterado somente quando atinge o nível de saída obrigatório. O mecanismo é mostrado na figura 1.9.

A norma IEEE 802.16 apresenta sete configurações de perfis, em nível de codificação e modulação, as quais são mostradas em ordem decrescente de robustez do perfil. A Tabela 1.1, adaptada da norma, apresenta tal classificação.

Tabela 1.1. Perfis de Rajada Definidos pela Padrão IEEE 802.16

Identificador	Modulação	Codificação
0	BPSK	1/2
1	QPSK	1/2
2	QPSK	3/4
3	16-QAM	1/2
4	16-QAM	3/4
5	64-QAM	2/3
6	64-QAM	3/4

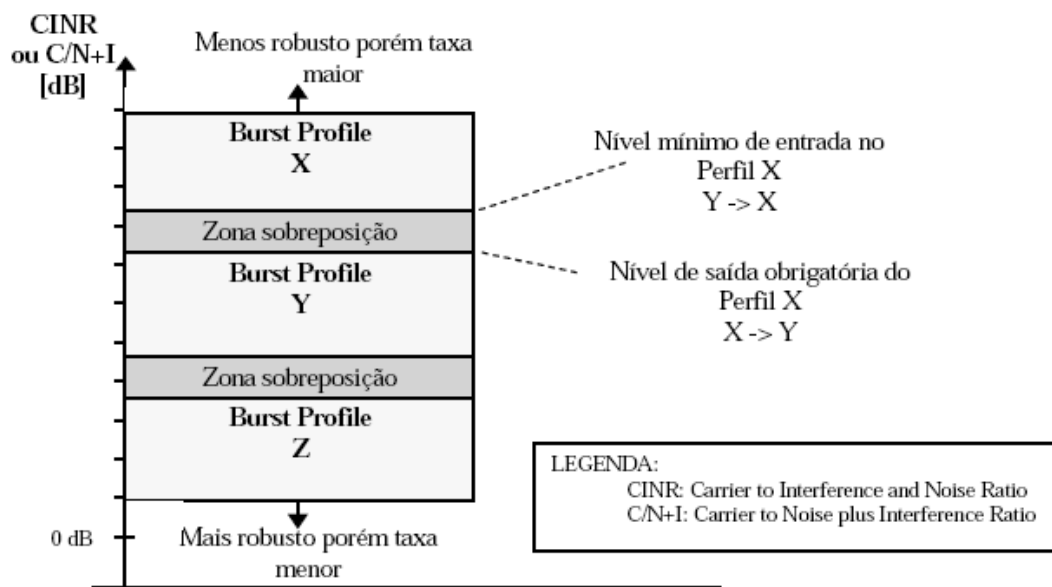


Figura 1.9. Limites para Mudança do Perfil de Rajada

1.3.5. Sistemas de Antenas Adaptativas

O padrão IEEE 802.16 define uma funcionalidade opcional e um mecanismo de sinalização que permitem a utilização de sistemas de antenas inteligentes, o que prove diversidade espacial, diminuindo a possibilidade de ocorrer erros, uma vez que cada canal (*downlink* e *uplink*) é transmitido por uma antena diferente. Além disso, é possível a utilização de mais de duas antenas, adicionando redundância em cada um dos canais.

Um sistema de sinalização adicional entre a estação base e as estações clientes foi desenvolvido, permitindo que as SSs enviem retorno sobre a qualidade do canal para a BS. Esse sistema, além de adicionar diversidade espacial, pode melhorar a utilização do espectro, conseqüentemente aumentando a vazão do sistema.

1.4. Camada MAC

A tecnologia IEEE 802.16 foi projetada para cobrir grandes distâncias geográficas, com altas taxas de transmissão, utilizando aplicações ponto-a-multiponto, isto é, atendendo a centenas de usuários com diferentes demandas de tráfego (dados, voz e vídeo), como descrito na Seção 1.1. Estas características exigem que a camada de acesso ao meio seja flexível para suportar diferentes fluxos de tráfegos, eficiente para atender um elevado número de usuários e robusta para suportar tanto tráfego contínuo quanto em rajadas, garantindo a qualidade destes serviços (QoS).

Para atender essas necessidades o grupo IEEE projetou a camada de enlace em três subcamadas: Subcamada de Convergência de Serviços Específicos, Subcamada Comum e Subcamada de Segurança, que foram observadas na Figura 1.2 e serão descritas nas próximas Seções.

1.4.1. Subcamada de Convergência de Serviços Específicos

A subcamada de convergência de serviços específicos realiza a interface entre as camadas de mais alto nível com a subcamada comum de acesso ao meio, utilizando o ponto de serviço de acesso CS (*Service Access Point* - CS SAP). O padrão IEEE 802.16 define dois mapas de serviços para convergência das informações:

- Serviço de encapsulamento de células ATM;
- Serviço de encapsulamento de pacotes, definida para mapear serviços de pacotes como o IPv4, IPv6, entre outros.

A função principal desta subcamada é classificar as unidades de serviços de dados SDUs (*Service Data Units*) para a apropriada conexão MAC, preservando ou habilitando QoS e alocação de largura de banda. O mapeamento pode ser realizado de várias formas, dependendo do tipo de serviço associado. Esta subcamada também pode realizar funções mais sofisticadas, tal como, supressão/reconstrução do cabeçalho ou dados para aumentar a eficiência do enlace [Eklund et al. 2002].

1.4.2. Subcamada Comum

Uma das principais características da tecnologia IEEE 802.16 é o controle de acesso ao meio (MAC) ser orientado a conexão. Isso deixa claro a diferença entre outras tecnologias sem-fio, que possuem o controle de acesso ao meio não orientado a conexão, como por exemplo, a tecnologia IEEE 802.11.

Todos os serviços são mapeados para a sua apropriada conexão. Isto fornece um mecanismo para pedido de largura de banda, associação de QoS e parâmetros de tráfego para transportar e mapear as informações nos serviços de convergência apropriados (serviços ATM ou de pacotes). As conexões são referenciadas com um identificador de conexão (CID) de 16 bits que está definido em um campo do cabeçalho do PDU, como pode ser observado na Figura 1.10.

O PDU é a unidade de dados responsável pela troca de informações entre as camadas MAC da BS e as camadas MAC das SSs. O quadro consiste em um cabeçalho de tamanho fixo e dados de tamanho variáveis, com um campo de 1 bit CI (*CRC Indicator*) indicando a opção para checagem cíclica de redundância (CRC). A verificação de erros é opcional, pois a norma [IEEE-802.16 2004] não restringe a utilização de mecanismos de retransmissão de quadros, como descrito na Seção 1.3.

O endereço MAC padrão possui 48 bits, sendo que o formato do PDU pode ser definido por dois tipos de cabeçalho, o genérico e o de pedido de largura de banda (veja Figura 1.10). Eles são distinguidos por 1 bit no campo HT (*Header Type*) e também pelo fato do PDU de pedido de largura de banda não conter dados. O campo EC (*Encryption Control*), com 1 bit indica se os dados estão criptografado. Já, o campo *Type* com 6 bits indica o tipo de informação no seu subcabeçalho. Podem existir três tipos de informações:

- subcabeçalho de gerenciamento de concessão: é responsável pelo gerenciamento de concessão, usado por uma SS para solicitar largura de banda para a BS;

HT = 0 (1 bit)	EC (1 bit)	Type (6 bits)	Rsv (1 bit)	CI (1 bit)	EKS (2 bit)	Rsv (1 bit)	LEN (3 bits)
LEN (8 bits)			CID (8 bits)				
CID (8 bits)			HCS (8 bits)				

Figura 1.10. Formato do cabeçalho genérico do PDU

- subcabeçalho de fragmentação: contém informações que indicam a presença e orientação de fragmentação de um SDU em vários PDUs;
- subcabeçalho de empacotamento: é indicado a presença de múltiplos pacotes SDUs dentro de um único PDU.

A fragmentação e o empacotamento podem ocorrer tanto na BS, para conexões *downlink*, quanto na SS, para conexões *uplink*, isso irá depender do tamanho dos dados a serem enviados. Por exemplo, como pode ser observado na Figura 1.11, na subcamada de convergência de serviços específicos (SS-CS) da BS uma unidade de serviços de dados (SDU) pode ser fragmentada em várias unidades de dados (PDUs), ou vários SDUs podem ser empacotados em um único PDU. Utilizando o ponto de serviço de acesso MAC (*Service Access Point* - MAC SAP). Assim que o(s) PDU(s) chegar(em) na SS os processos de desfragmentação/desempacotamento serão realizados na subcamada comum (CPS), enviando para a subcamada de convergência de serviços específicos da SS a(s) unidade(s) de serviços de dados reconstituída(s). O IEEE 802.16 possui avanços para incorporar os processos de fragmentação e empacotamento, tais como o protocolo de controle de informação (*Protocol Control Information* - PCI), para maximizar a flexibilidade, eficiência e eficácia da tecnologia.

Os outros campos encontrados no cabeçalho do PDU são: o campo EKS (*Encryption Key Sequence*) com 2 bits, que informa se há chaves de criptografia sendo utilizadas. O campo LEN (*Length*) com um total de 11 bits, indica o tamanho do quadro, com o cabeçalho incluso. Ainda possuindo dois campos Rsv, com 1 bit cada, para reserva. E finalmente, o campo HCS (*Header Check Sequence*) com 8 bits é utilizado na detecção de erros no próprio cabeçalho.

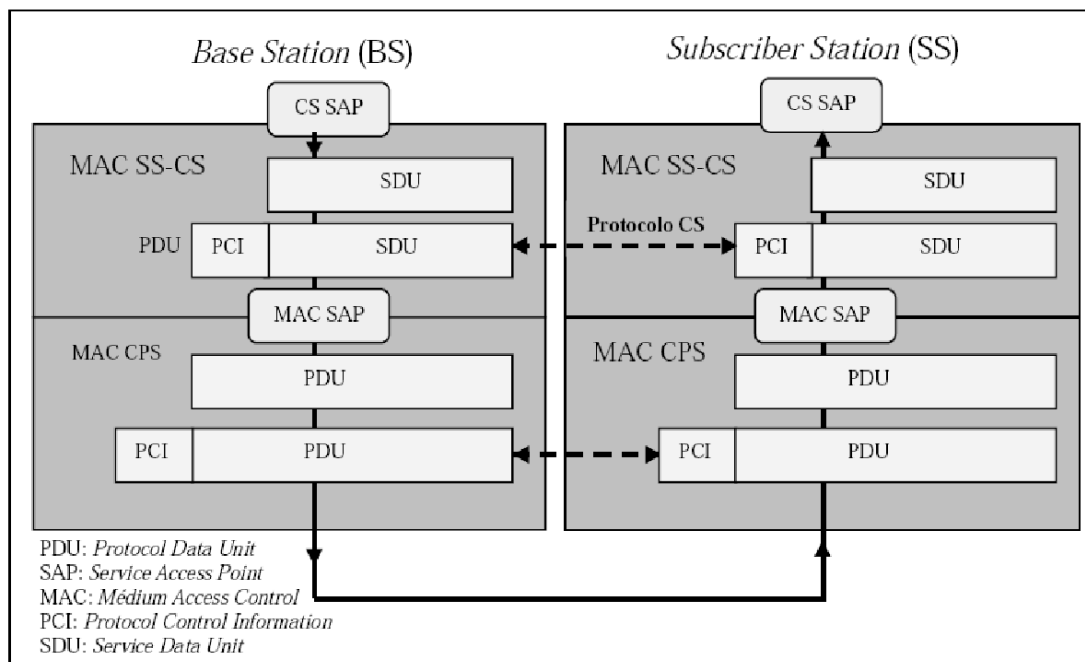


Figura 1.11. Fragmentação e Empacotamento com SDUs e PDUs

Como descrito anteriormente, existe um cabeçalho específico para pedido de largura de banda, como pode ser observado na Figura 1.12. Este, por sua vez, possui menos campos que o cabeçalho genérico, tais como: CI, EKS e Rsv, sem esquecer que também não transmite dados. No cabeçalho de pedido de largura de banda o campo HT é definido com valor 1 e o EC com valor 0, visto que não haverá carga útil para ser encriptada. A novidade deste cabeçalho é o campo BR (*Bandwidth Request*), com 16 bits que armazena a especificação da largura de banda solicitada pela estação cliente. Os outros campos CID, HCS e *Type* possuem funções idênticas as já detalhadas anteriormente.

É interessante analisar o encapsulamento das informações nas camadas MAC e física de forma conjunta para compreender a estrutura de dados global da tecnologia IEEE 802.16. Esta análise será realizada de forma *top-down*, como pode ser observado na Figura 1.13. Na camada MAC as informações são encapsuladas de unidades de serviços de dados (SDUs) para um protocolo de unidade de dados (PDU), isto é, as informações passam da subcamada de convergência de serviços específicos para a camada MAC comum. Já na camada física, mais especificamente na subcamada de convergência de transmissão, os PDUs são encapsulados em rajadas de blocos FEC, que podem ser adaptativos em relação ao meio físico, como descrito na Subseção 1.3.4. Por fim, os blocos FEC são encapsulados em subquadros *downlink* ou *uplink* ocupando *slots* físicos, estruturados de acordo com as interfaces aéreas utilizadas (WMAN SC, WMAN SCa, WMAN OFDM, WMAN OFDMA e WMAN HUMAN).

HT = 1 (1 bit)	EC = 0 (1 bit)	Type (6 bits)	BR (8 bits)
		BR (8 bits)	CID (8 bits)
		CID (8 bits)	HCS (8 bits)

Figura 1.12. Formato do cabeçalho de pedido de banda do PDU

1.4.2.1. Arquitetura para Troca de Mensagens em Redes IEEE 802.16

A definição dos PDUs na subcamada comum de acesso ao meio tem como objetivo definir o formato das trocas de informações no tráfego *downlink* e *uplink*. Outro objetivo desta subcamada é dar suporte as características físicas, tais como, os dados no DL são transmitidos por difusão, enquanto no UL o meio é compartilhado através de múltiplos acessos, utilizando dois esquemas para alocação de banda FDD e TDD, como descrito na Subseção 1.3.3.

O controle de acesso ao meio inicialmente constroi o subquadro *downlink* com o quadro de seção de controle contendo campos para as mensagens DL-MAP e UL-MAP. Estas mensagens indicam as transmissões físicas sobre o tráfego *downlink*, bem como a alocação de largura de banda e perfil de rajada sobre o tráfego *uplink*.

Durante o DL a transmissão é relativamente simples, pois somente a BS transmite neste sub-quadro. Os PDUs são transmitidos por difusão para todas as SSs, que por sua vez, capturam apenas os pacotes destinados a elas. Já na transmissão UL, no módulo de escalonamento de pacotes para o *uplink* na BS, também conhecido como (*Uplink Packet Scheduling* - UPS) e que pode ser observado na Figura 1.14, determina o número de segmentos que será atribuído para cada SS do sub-quadro. Esta informação é transmitida por difusão pela BS através da mensagem UL-MAP no começo de cada quadro, como pode ser observado na Figura 1.14.

Como descrito anteriormente, o controle de acesso ao meio é orientado à conexão, a aplicação deve estabelecer uma conexão entre a BS e o fluxo de serviço associado, representado pelas filas de escalonamento, para os quatro fluxos de serviços (UGS, rtPS, nrtPS ou BE), que serão descritos na Subseção 1.4.2.2. A BS identifica as conexões

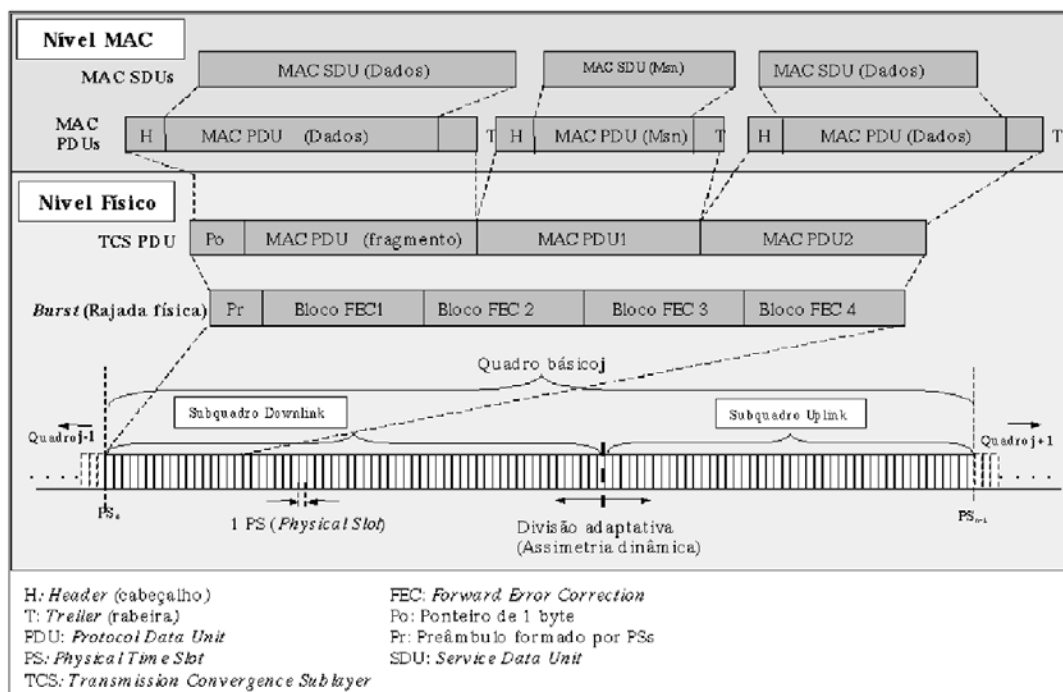


Figura 1.13. Encapsulamento das Informações nas Camadas MAC e Física

com um CID (*Connection ID*) único para cada uma, (veja Figura 1.14). A tecnologia IEEE 802.16 define um mecanismo de troca de informações para requisição de conexão e resposta (*Connection Request, Response*) entre SSs e o módulo de controle de admissão na BS, que não é definido pelo padrão WirelessMAN.

Todos os pacotes da camada de aplicação em uma SS são classificados de acordo com o CID e encaminhados para uma fila apropriada. A SS recupera o pacote na fila e transmite-o para a rede no segmento de tempo determinado na UL-MAP enviada pela BS. A UL-MAP é definida pelo módulo UPS baseada nas mensagens *BW-Request* (veja Figura 1.14) que reportam o tamanho atual da fila de cada conexão na SS [Maheshwari 2005].

O formato das mensagens UL-MAP contém informações específicas, descrito na Subseção 1.3.2 (*Information Element - IE*) que incluem as oportunidades de transmissão, ou seja, os segmentos de tempo durante os quais a SS pode transmitir durante o subquadro UL. Após receber a UL-MAP, as estações clientes transmitem os pacotes de dados (PDUs) em segmentos de tempo pré-definidos como indicados no IE [Ramachandran 2004].

Desta forma, é importante salientar que o IEEE 802.16 define os mecanismos de sinalização para o estabelecimento de uma conexão (*Request/Response*) e para o gerenciamento da implementação de qualidade de serviços (QoS), com controle de fluxo, controle de admissão e policiamento de tráfego [Maciel 2005].

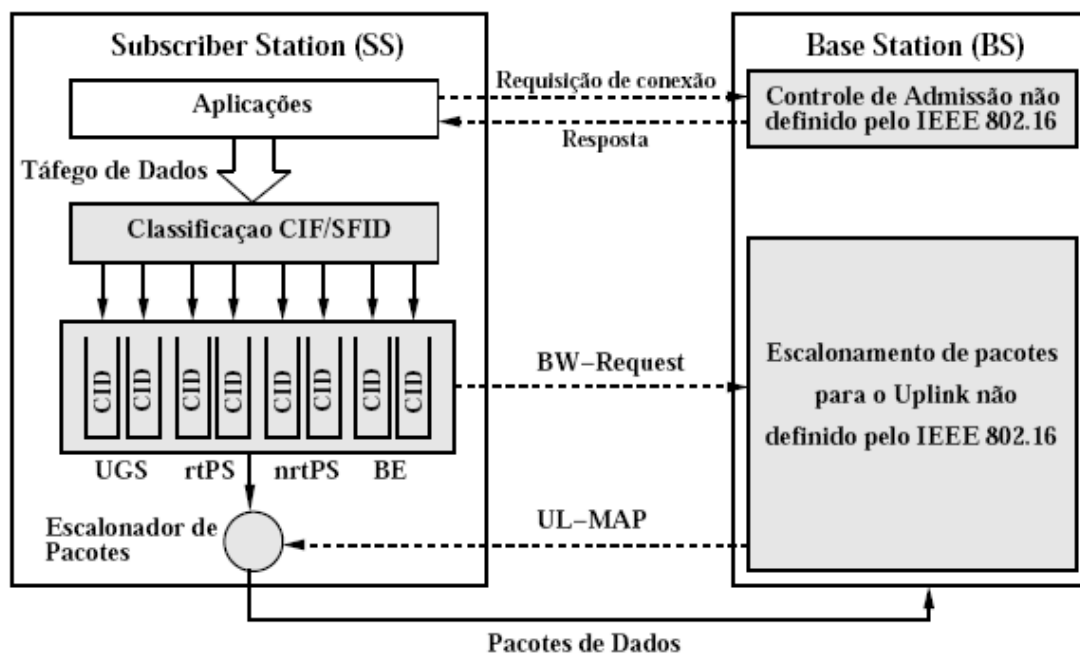


Figura 1.14. Troca de Informações entre BS e SS na IEEE 802.16 [Maciel 2005]

1.4.2.2. Qualidade de Serviço

A rede WirelessMAN deve prover serviços para três diferentes tipos de aplicações: serviço de telefonia, distribuição de sinais de TV (*broadcast*) e acesso de banda larga à Internet. Para isso, foram definidos quatro classes com distintos requisitos de qualidade de serviço, que podem ser observadas na Figura 1.14 e serão descritas a seguir:

1. *Unsolicited Grant Service* (UGS): este serviço suporta tráfego com taxa constante (*Constant Bit Rate* - CBR) ou fluxos similares tais como, voz sobre IP (VoIP). Estas aplicações requerem uma largura de banda constante, por isso, os parâmetros dos seus tráfegos são negociados apenas durante o pedido de conexão. Uma conexão UGS pode incluir serviços ATM e E1/T1;
2. *Real-Time Polling Service* (rtPS): este serviço é voltado para aplicações de tempo real com taxa de transmissão variável (*Variable Bit Rate* - VBR), como por exemplo, MPEG vídeo ou teleconferência. Estas aplicações possuem requisitos específicos de banda, bem como, um atraso máximo tolerável;
3. *Non-Real-Time Polling Service* (nrtPS): este serviço é voltado para fluxos sem requisitos de tempo real, mas que necessitam melhores condições do que o serviço “de melhor esforço”, como por exemplo, transferências de arquivos. Estas aplicações são insensíveis ao atraso no tempo e requerem um mínimo de alocação de banda;
4. *Best Effort Service* (BE): este serviço é voltado para tráfego “de melhor esforço”, onde não existe garantia de QoS, tais como HTTP. As aplicações recebem banda

disponível após a alocação dos três fluxos anteriores.

O padrão IEEE 802.16 especifica os serviços associados a classes de fluxo de tráfego, mecanismos de sinalização para troca de informações entre a BS e as SSs, bem como configuração de conexões [IEEE-802.16 2004]. Porém, é desejável que haja um gerenciamento para classes de fluxo distintos, para que o comportamento de um determinado fluxo não afete os demais. Outro controle importante é monitorar os perfis de rajadas, isto é, as adaptações ocorridas nas modulações e nas técnicas de correção de erros. Essas adaptações influenciam na largura de banda para as diferentes classes de fluxos e nas garantias de QoS [Chen et al. 2005].

1.4.2.3. Escalonamento de Serviços

A norma [IEEE-802.16 2004] prevê suporte a dois tipos de concessão para oportunidades de transmissão:

- concessão baseado em conexão (*Grants per Connection* - GPC): a largura de banda é explicitamente garantida para cada conexão, de acordo com o seu tipo de fluxo, que requisita sua própria oportunidade de transmissão;
- concessão baseado em estação (*Grants per Subscriber Station* - GPSS): a estação cliente requisita oportunidades de transmissão para todos os serviços que ela mantém, e esta SS é responsável por alocar as oportunidades recebidas entre os diferentes tipos de fluxos. Tornando assim, um agregado de largura de banda e necessitando mais inteligência na habilitação de qualidade de serviço.

As solicitações de largura de banda nas SSs devem ser realizadas segundo as suas demandas, tanto para uma concessão GPC, quanto para GPSS. Estas necessidades são gerenciadas pelo escalonador de pacotes SS, de acordo com os fluxos de tráfego das filas de conexão (CID). Porém, no tipo GPSS como existe um agregado de largura de banda, o escalonador de pacotes SS pode gerenciar de forma mais adequada as altas prioridades de largura de banda, retirando fluxos de pedidos com baixa prioridade, garantindo assim, a QoS da estação cliente.

Os dois tipos de concessão permitem uma negociação equilibrando simplicidade e eficiência nas SSs. Porém, a necessidade de concessões extras para largura de banda, a probabilidade de mais entradas de fluxos em uma estação cliente e a habilidade de reagir mais rapidamente as necessidades de adaptações da camada física, torna o tipo GPC menos eficiente e escalável que o GPSS.

Existem quatro formas de solicitação de largura de banda, que como pode ser observado na Figura 1.15 é representado pelo módulo “*UL-BW Request Generator*”:

- *Piggyback Request*: os pedidos de largura de banda são realizados junto com os quadros de dados;

- *Implicit Request* ou *BW-Request*: pedido de largura de banda mais tradicionalmente utilizado. A solicitação de banda usa o PDU com o campo HT igual a 1 e o EC com valor 0;
- *Unicast Polling*: as estações clientes enviam pedidos de alocação de largura de banda em intervalos de tempo, sem contenção;
- *Contention Based Polling*: as SSs enviam mensagens BW-Request durante um intervalo de reserva. A contenção é resolvida usando o algoritmo *back-off*.

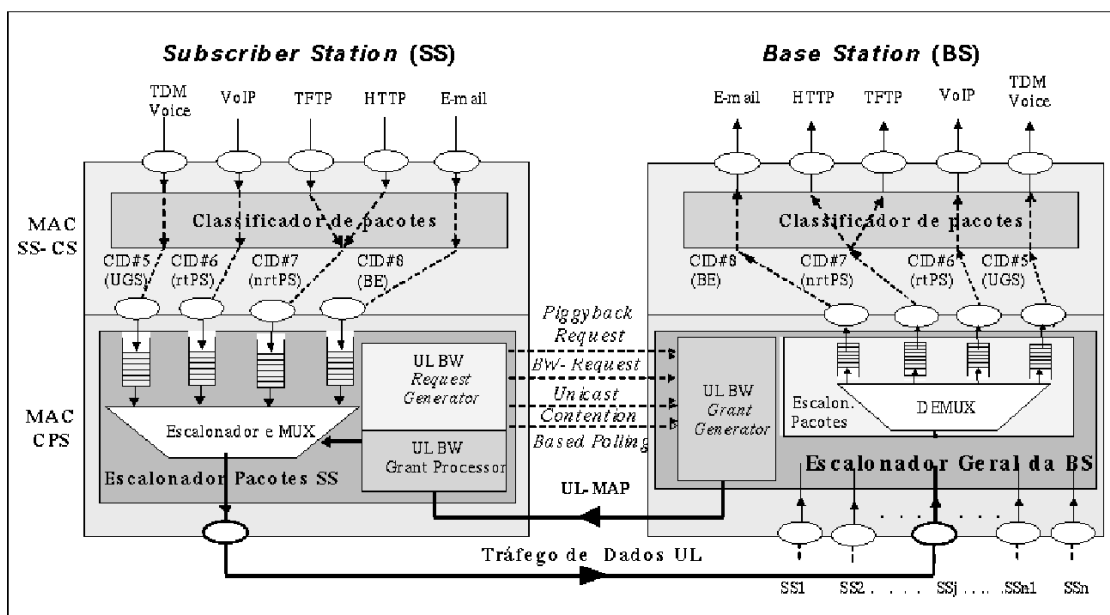


Figura 1.15. Arquitetura de Escalonamento do Sentido Uplink

Todas as mensagens de pedido de largura de banda são recebidas na BS pelo módulo “UL-BW Grant Generator”, que de acordo com a gerência do escalonador geral das BS concede tempos de transmissão para as estações (GPSS) ou para das conexões (GPC). As concessões dos tempos são armazenadas nos (*Information Element - IE*) das mensagens UL-MAP. Com este mecanismo de gerenciamento o escalonador consegue garantir qualidade de serviço para diferentes alocações de largura de banda.

Neste contexto, o escalonamento de fluxos de tráfego desempenha um papel crucial em sistemas que fornecem garantias de qualidade de serviço [Kurose and Ross 2001]. A classificação permite a distinção entre diferentes fluxos de tráfego e a possibilidade de tratamentos diferenciado. Entretanto, simplesmente classificar os fluxos não garante que eles recebam um serviço com a QoS desejada. A classificação é apenas um mecanismo para distingui-los. A diferenciação no tratamento destes fluxos é uma decisão de um escalonador de fluxos de tráfego. Porém, o padrão [IEEE-802.16 2004] não especifica qual algoritmo de escalonamento deve ser utilizado. Essa implementação está a cargo dos

fabricantes dos equipamentos, que com isso, irão pesquisar e desenvolver soluções com diferentes objetivos e desempenhos.

Outra técnica que não é especificada pela norma é o controle de admissão, que possui como objetivo principal a preservação da QoS dos fluxos já existentes na rede, quando da chegada de uma nova solicitação. Um novo fluxo só é admitido se, por algum critério de decisão previamente estabelecido, não comprometer as garantias de qualidade já oferecidas aos demais fluxos. O controle de admissão tem ainda como objetivo secundário a maximização dos níveis de utilização da rede. Também é desejável que tenha baixo custo computacional, já que deve oferecer uma resposta em tempo real às solicitações de entrada dos novos fluxos [Coelho 2003].

Quando o controle de admissão aceita uma nova conexão, a qualidade de serviço será garantida se a fonte obedecer os descritores de tráfego que são especificados durante o estabelecimento desta conexão. Entretanto, se o fluxo de tráfego violar o “contrato” inicial ou mudanças ocorrerem no enlace, como modulação e controle de erros, a rede poderá não suportar um desempenho aceitável. Assim, para impedir a violação dos contratos estabelecidos, deve existir algum mecanismo de policiamento do tráfego na rede [Maciel 2005].

1.4.2.4. Controle do Enlace de Rádio

O avanço tecnológico da camada física no IEEE 802.16 requer igual avanço no controle do enlace de rádio (*Radio Link Control* - RLC), particularmente a capacidade da camada física em adaptar a transmissão de um perfil de rajada para outro. O RLC deve controlar esta capacidade, bem como, a tradicional funcionalidade do controle da potência necessária para realizar uma transmissão.

O RLC inicia com uma mensagem de difusão periódica para a escolha do perfil de rajada na transmissão *downlink* e *uplink*. A escolha do perfil de rajada usada para um canal específico é definido sobre diferentes fatores, como por exemplo, região chuvosa e capacidade do equipamento. Os perfis de rajadas são identificados com um código para o gerenciamento do RLC, no *downlink* é usado DIUC (*Downlink Interval Usage Code*) e no *uplink* usa-se o UIUC (*Uplink Interval Usage Code*) [Eklund et al. 2002].

Durante o acesso inicial, a estação cliente começa utilizando um baixo nível de potência para a sua transmissão e pode solicitar mudanças com a mensagem de pedido de variação (RNG-REQ). Esta mensagem também é utilizada para realizar a manutenção da janela de variação da potência de transmissão de um canal. A informação para adaptar os avanços de tempo de transmissão da estação cliente, bem como, o ajuste da potência são retornados para a SS utilizando a mensagem de resposta de variação (RNG-RSP). Para adaptar a potência necessária para a transmissão, a BS pode enviar uma mensagem não solicitada RNG-RSP, exigindo que a SS adapte a sua potência e seu tempo de transmissão.

A estação cliente pode pedir para a BS enviar os dados com um perfil de rajada específico, baseada na qualidade do sinal *downlink*, como por exemplo, perfil de rajada mais robusto pelas condições de ambientes adversas, devido a ocorrência de uma chuva, ou ainda perfis de rajadas mais eficientes devido ao bom tempo. A BS pode confirmar

ou rejeitar essa solicitação. Da mesma forma, a BS monitora a qualidade do sinal *uplink* transmitido pela SS. O RLC constantemente pode adaptar o perfil de rajada UL e DL, sempre equilibrando os fatores de robusteza e eficiência do enlace. Resumindo, em um sinal com pouca qualidade, o gerenciamento do RLC deve priorizar altos parâmetros de codificação e modulação, tornando o enlace mais robusto, por outro lado, em sinais com boa qualidade, o gerenciamento do RLC deve priorizar baixos parâmetros de codificação e modulação, tornando o enlace mais eficiente. Essas mudanças são relativamente simples, a BS somente precisa especificar o UIUC associado ao perfil que será alterado. Assim, diminuindo a possibilidade de uma má combinação entre a BS e a SS.

No *downlink*, a qualidade do sinal é intensamente monitorado e por isso, a BS sabe quando o perfil de rajada *downlink* deve ser alterado. Porém, existem dois métodos para avaliar um pedido de mudança no perfil de rajada *downlink* solicitado pela SS. Se a concessão for baseado em conexão (GPC), ou se a concessão for baseado em estação (GPSS). O primeiro método deve ser aplicado de acordo com a descrição do algoritmo de escalonamento da BS, utilizando a mensagem tradicional para mudança de variação de perfil de rajada (RNG-REQ), uma vez que são tratadas conexões independentes. No segundo método, para mudanças baseadas em uma estação cliente são utilizadas mensagens específicas (*Downlink Burst Profile Change Request/Response* - DBPC-REQ/DBPC-RSP). Isso ocorre, porque as mensagens para mudança de perfil de rajada para uma SS específica pode ser facilmente perdida, devido a erros de bits.

1.4.2.5. Aquisição e Inicialização de um Canal

O protocolo de acesso de meio inclui o procedimento para inicialização de uma estação cliente em uma rede WirelessMAN, eliminando a necessidade de uma configuração manual. Primeiramente, como pode ser observado no lado direito da Figura 1.16, a SS varre o espectro de frequência *downlink*. Para diminuir o tempo desse processo, deve-se implementar uma lista das frequências pré-definidas para detectar o sinal de um canal de operação, esta característica é útil em ambientes densos. Após decidir sobre que canal (ou pares de canais) irá se configurar uma conexão, a SS tenta sincronizar a transmissão *downlink* com a BS para detectar o preâmbulo de quadro. Pelo preâmbulo a camada MAC procura por um DCD e UCD (*downlink* e *Uplink Channel Descriptor*). Assim que a camada física é sincronizada e a SS obtém os parâmetros sobre o meio físico, a estação cliente pode iniciar o processo de *ranging*. Este processo testa o canal para definir correções de tempo e potência da transmissão. A SS deverá enviar uma rajada usando uma potência mínima e deverá tentar incrementar essa potência de transmissão se não receber a variação de resposta. Para finalizar a primeira etapa é iniciada a negociação da capacidade do canal, onde a SS a partir do DCD e UCD da mensagem *Capabilities Request Message* obtém informações sobre os seguintes parâmetros UL e DL:

- tipos de modulação;
- esquemas de codificação;
- taxas suportadas;

- tipo de duplexagem.

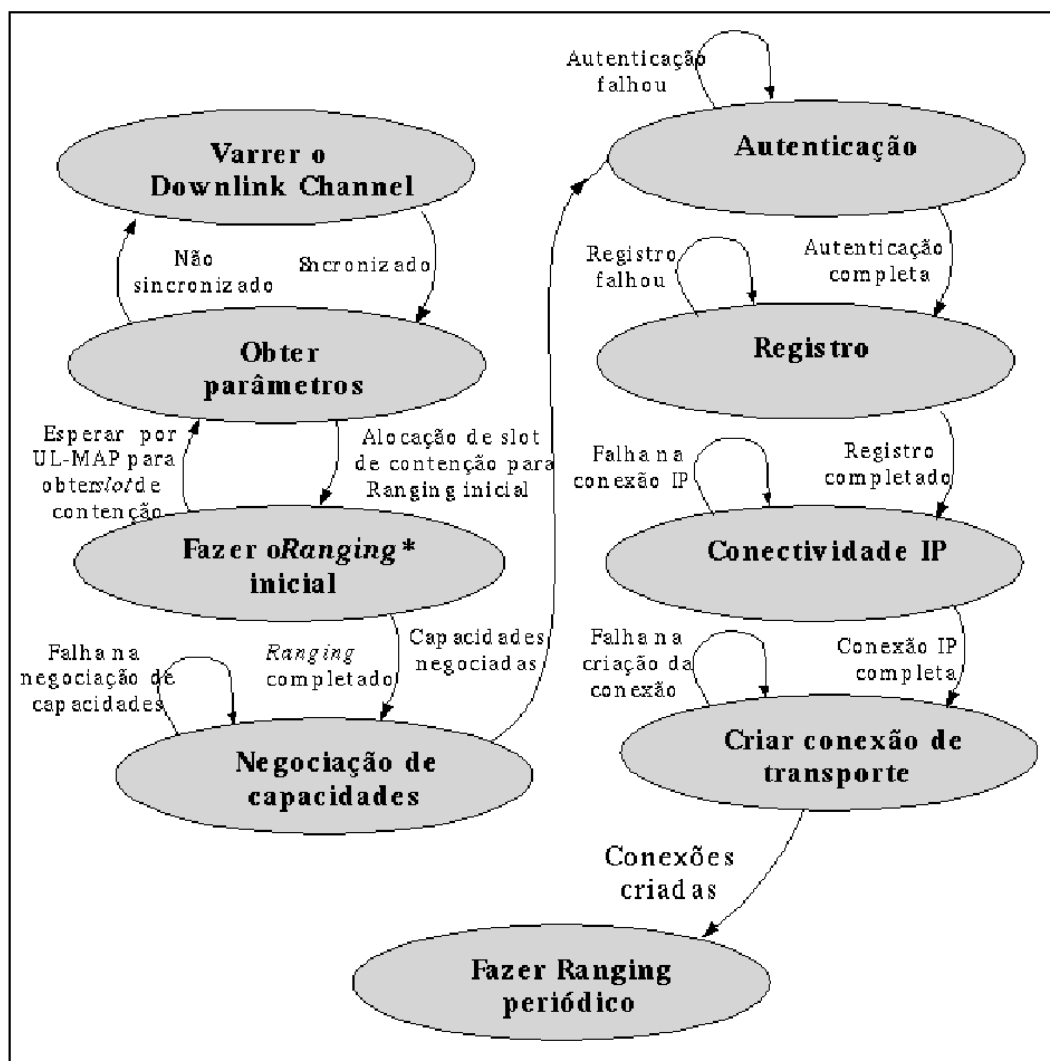


Figura 1.16. Diagrama da Aquisição e Inicialização de um Canal

Na segunda etapa, representado pelo lado esquerdo da Figura 1.16, ocorre a autenticação (informações sobre chave, certificação e suporte à criptografia), registro da conexão (suporte de gerenciamento da SS, com seu respectivo CID), conectividade IP (no caso de um serviço com encapsulamento de pacotes, normalmente configuração DHCP) e a criação de uma conexão de transporte. Esta segunda fase é tipicamente utilizada em qualquer tecnologia de transporte com conexão.

1.4.3. Subcamada de Segurança

Esta seção aborda os principais tópicos sobre a subcamada de segurança da rede IEEE 802.16. Tanto o padrão IEEE quanto o fórum WiMAX buscaram definir um am-

biente seguro e robusto - devido a identificação de fraquezas e vulnerabilidades de propostas anteriores (IEEE 802.11), tais como *Wired Equivalent Privacy* (WEP). A maior parte dos serviços de segurança é fornecida por primitivas criptográficas, na subcamada de acesso ao meio (MAC). Assim, a preocupação do padrão IEEE 802.16 foi definir uma suíte criptográfica - conjunto de funcionalidades desejáveis para atender aos serviços de segurança necessários. O conceito aqui envolvido é o de associações criptográficas, que contém informações sobre quais algoritmos devem ser aplicados, quais as chaves usar, entre outros. O padrão define ainda um processador dedicado à segurança, na estação base (BS). Há ainda alguns requisitos de funcionalidades criptográficas para o tráfego, bem como para a autenticação ponto-a-ponto. O tráfego em uma rede WiMAX deve ser cifrado empregando o *Counter Mode* com *Cipher Block Chaining Message Authentication Code Protocol* (CCMP) - o qual emprega o AES (*Advanced Encryption Standard*) -, tanto para a segurança da transmissão, quanto para o serviço de autenticação da integridade dos dados. Excetuando-se a primeira conexão, todas as conexões são mapeadas para uma associação de segurança - seja em tempo de configuração, seja em operação. Para autenticação ponto-a-ponto, emprega-se a metodologia do protocolo de autenticação extensível (ou PKM-EAP - *Extensible Authentication Protocol*), que se baseia no padrão TLS (*Transport Layer Security*) de criptografia de chave pública. Atualmente, o protocolo PKM emprega o certificado X.509 com criptografia de chave pública RSA para autenticação dos SS, e troca de chaves de autorização. O próprio protocolo de mensagens PKM é autenticado empregando o protocolo *Hashed Message Authentication Code* (HMAC). Já a autenticação de mensagens nas funções da camada de acesso ao meio é provida pelo PKM.

1.5. Equipamentos WiMAX

A tecnologia WirelessMAN está sendo implementada em muitos centros de pesquisas [Garg 2006, Falconer 2006, Bostian, Rappaport] que estão testando e validando essa nova tecnologia. No Brasil existe o projeto "Ouro Preto cidade digital" onde seu principal objetivo é definir um modelo de rede comunitária, replicável à pequenos e médios municípios [Cavalcanti 2006]. Até o início de 2006 todas essas redes utilizavam a tecnologia pré-WiMAX, devido aos seus equipamentos não serem certificados pelo consórcio WiMAX [WiMAX 2006], isto é, não tinham garantia de interoperabilidade entre diferentes fabricantes.

Em fevereiro de 2006, o consórcio WiMAX iniciou a certificação dos primeiros equipamentos. Os fabricantes e os equipamentos que são certificados pelo WiMAX podem ser encontrados na página do fórum "<http://www.wimaxforum.org>". Para as SSs encontra-se antenas tanto para uso interno como externo com diferentes potências de transmissão. Na Figura 1.17, pode-se observar dois modelos de estações clientes.

Atualmente, existe uma variedade bastante grande de equipamentos comercializados, todos certificados pelo selo WiMAX. Para uma BS, pode-se encontrar equipamentos com suporte a conexões para a Internet com fibra óptica, Ethernet e até mesmo usando o meio aéreo. Na Figura 1.18, pode-se observar dois modelos com diferentes suportes a conexões externas.

A maior limitação desses equipamentos é em relação ao desempenho. A última



Figura 1.17. Estações Clientes Certificadas WiMAX

norma IEEE 802.16e [IEEE-802.16 2005] que já prevê mobilidade, descreve que a tecnologia pode alcançar taxas de até 130 Mbits com distâncias de até 50 Km. Porém, o que encontra-se nesses equipamentos são taxas de até 20 Mbits a distâncias de 17 Km, com linha de visada (LOS). Entretanto, devido a grandes investimentos dos fabricantes em pesquisas nesta tecnologia, acredita-se que esses limites atuais irão ser superados, aproximando-se dos valores que o grupo IEEE projetou.

1.6. Considerações Finais

Este capítulo apresentou a tecnologia IEEE 802.16 para prover acesso a banda larga utilizando interface aérea para cobrir redes metropolitanas. Este padrão pode se tornar uma nova alternativa de acesso a Internet competindo com sistemas tradicionais, como por exemplo, DSL e *cable modem*. Entretanto, cobrindo áreas geográficas inviáveis, com qualidade de serviço para transmissões de dados, voz e video, altas taxas de transmissão e com baixo custo de implementação e infra-estrutura.

A topologia tradicionalmente utilizada é ponto-a-multiponto, podendo transmitir dados da estação base (BS) para as estações clientes (SSs), (transmissão *downlink*) ou das estações clientes para a estação base, (transmissão *uplink*). Utilizando para isso, linha de visada (LOS) ou não (NLOS).

O padrão IEEE 802.16 suporta duas possibilidades quanto à técnica de duplexação: TDD e FDD, possibilitando a BS operar em modo *half-duplex* ou *full-duplex*. A transmissão através do meio físico é utilizando perfis de rajadas, podendo adaptar a modulação e a codificação de acordo com a qualidade da interface aérea.

Uma das principais características da tecnologia IEEE 802.16 é o controle de acesso ao meio (MAC) ser orientado a conexão. Todos os serviços são mapeados para a sua apropriada conexão. Isto fornece um mecanismo para pedido de largura de banda, associação de QoS e parâmetros de tráfego para transportar e mapear as informações para os serviços de convergência apropriados.



Figura 1.18. Estações Bases Certificadas WiMAX

Com este curso, pode-se destacar algumas pesquisas nesta área:

- técnicas de codificação e modulação para adaptar o perfil de rajada em diferentes interferências do meio aéreo;
- sistemas de antenas adaptativas para prover diversidade espacial, diminuindo a possibilidade de ocorrência de erros;
- impacto da aplicação dos algoritmos de criptografia na capacidade de transmissão da rede, visto que, os dados são criptografados na camada de enlace;
- algoritmos de escalonamento para oferecer garantias de qualidade de serviço nas quatro classes de serviço, definidas pelo padrão;
- algoritmos de controle de admissão para novas conexões, observando as mudanças que estão ocorrendo na interface aérea, uma vez que, a tecnologia visa acesso a banda larga;
- técnicas de gerenciamento, utilizando o protocolo SNMP em uma interface aérea, para grandes distâncias geográficas.

Atualmente, muitas cidades dos Estados Unidos já disponibilizam serviços com a tecnologia IEEE 802.16 [Garg 2006], através de equipamentos WiMAX. No instituto de telecomunicação do Canadá, pesquisas estão sendo realizadas [Falconer 2006]. Na China as cidades de Dalian e Chengdu possuem redes pré-WiMAX, que foram certificadas este ano [WiMAX 2006]. Em Minas Gerais, nas cidades de Belo Horizonte e Ouro Preto [Cavalcanti 2006], e no Rio de Janeiro, em Mangaratiba, a Intel instalou a infraestrutura e realizou testes sobre a tecnologia [Paper 2004]. Por isso, acredita-se que em pouco tempo, esta tecnologia se tornará uma forte concorrente para a conexão a *cable modem* e DSL .

Referências

- [Akyildiz and Wang 2005] Akyildiz, I. and Wang, X. (2005). A survey on wireless mesh networks. *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, no. 9, pp. 523-530.
- [Bostian] Bostian, C. Academic OPNET research and education projects. Center for Wireless Telecommunications, Virginia Tech.
- [Bruno et al. 2005] Bruno, R., Conti, M., and Gregori, E. (2005). Mesh networks: Commodity multihop ad hoc networks. *IEEE Communications Magazine*, vol. 43, issue: 3, pp. 123-131.
- [Cavalcanti 2006] Cavalcanti, C. (2006). Projeto: Ouro preto cidade digital. Universidade Federal de Ouro Preto.
- [Chen et al. 2005] Chen, J., Jiao, W., and Guo, Q. (2005). An integrated QoS control architecture for IEEE 802.16 broadband wireless access systems. Lucent Technologies), Bell Labs Research China.
- [Cho et al. 2005] Cho, D., Song, J., Kim, M., and Han, K. (2005). Performance analysis of the IEEE 802.16 wireless metropolitan area network. *Proceedings of the First International Conference on Distributed Frameworks for Multimedia Applications (DFMA '05)*, pp.130 - 137.
- [Choi and Shin 2001] Choi, A. and Shin, K. G. (2001). A class of adaptive hybrid ARQ schemes for wireless links. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, pp. 777-790.
- [CHOI and CHOI 2005] CHOI, Y. and CHOI, S. (2005). LLC-level FEC scheme in IEEE 802.11 WLAN. *IEEE APWCS'2005*, Hokkaido.
- [Chu et al. 2002] Chu, G., Wang, D., and Mei, S. (2002). A QoS architecture for the MAC protocol of IEEE 802.16 BWA system. *Proceedings of IEEE International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions*, vol.1, pp. 435 - 439.
- [Coelho 2003] Coelho, J. (2003). Mecanismo de controle de qualidade de serviço em redes IEEE 802.11. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COOPPE/PESC.
- [Eklund et al. 2002] Eklund, C., Markes, R., Stanwood, K., and Wang, S. (2002). IEEE standard 802.16: A technical overview of the WirelessMAN air interface for broadband wireless access. *IEEE Communications Magazine*, pp. 98-107.
- [Falconer 2006] Falconer, D. (2006). CITR broadband wireless major project. Canadian Institute for Telecommunications Research.
- [Garg 2006] Garg, M. (2006). Multiple radio unit wireless network pilot project. Portland State University and the Science University - Oregon Health.
- [Ghosh et al. 2005] Ghosh, A., Wolter, D., Andrews, J., and Chen, R. (2005). Broadband wireless access with WiMAX/802.16: Current performance benchmarks and future potential. *IEEE Communications Magazine*, pp. 129-136.

- [IEEE-802.16 2004] IEEE-802.16 (2004). IEEE standard for local and metropolitan area networks - part 16: Air interface for fixed broadband wireless access systems. IEEE Std. 802.16-2004.
- [IEEE-802.16 2005] IEEE-802.16 (2005). IEEE standard for local and metropolitan area networks - part 16: Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems. IEEE Std. 802.16-2005.
- [Karrer et al. 2004] Karrer, R., Sabharwal, A., and Knightly, E. (2004). Enabling large-scale wireless broadband: The case for TAPs. *ACM SIGCOMM Computer Communications Review*, vol. 34, no. 1, pp. 27-34.
- [Kurose and Ross 2001] Kurose, J. and Ross, K. (2001). *Computer Networking - A Top-down Approach Featuring the Internet*. Addison-Wesley, Massachusetts, second edition.
- [Maciel 2005] Maciel, P. (2005). Modelagem e análise de um protocolo de acesso alternativo para o padrão IEEE 802.16 de redes metropolitanas sem fio. Universidade Federal do Rio de Janeiro - COOPPE/PESC.
- [Maheshwari 2005] Maheshwari, S. (2005). An efficient QoS scheduling architecture for IEEE 802.16 wireless MANs. MTech Dissertation, Kanwal Rekhi School of Information Technology, Indian Institute of Technology Bombay.
- [Paper 2004] Paper, I. T. W. (2004). Understanding WiMAX and 3G for portable/mobile broadband wireless. *Intel Technology Journal*, pp. 14.
- [Ramachandran 2004] Ramachandran, S. (2004). Link adaptation algorithm and metric for IEEE standard 802.16. MTech Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University. Blacksburg, Virginia.
- [Ramachandran et al. 2002] Ramachandran, S., Bostian, C., and Midkiff, S. (2002). Performance evaluation of IEEE 802.16 for broadband wireless access. Center for Wireless Telecommunications, Virginia Tech.
- [Rappaport] Rappaport, S. Wireless networking and communications group. Department of Electrical and Computer Engineering at The University of Texas at Austin.
- [WiMAX 2006] WiMAX (2006). WiMAX forum. <http://wimaxforum.org>, Maio, 2006.