

# WiMAX Móvel, a tecnologia e suas aplicações

André N. Barreto, Vicente A. de S. Junior e André M. Cavalcante

**Resumo**—Neste trabalho apresentamos um tutorial sobre a tecnologia WiMAX móvel, baseado na norma IEEE802.16e. Será feita uma descrição técnica da interface de rádio da tecnologia e serão brevemente analisados alguns aspectos regulatórios, de padronização e de aplicação da mesma.

**Palavras-Chave**—WiMAX, IEEE802.16e, banda-larga sem fio.

**Abstract**—In this work a tutorial about mobile WiMAX technology is presented, based on IEEE802.16e standards. A technical description of the radio interface of this technology will be made, and some aspects related to standardisation, regulation and business applications will be briefly analysed.

**Keywords**—WiMAX, IEEE802.16e, wireless broadband.

## I. INTRODUÇÃO

Os últimos anos se caracterizaram por um crescimento acelerado de duas tecnologias chave, a internet e as comunicações móveis, que se tornaram parte integral da vida de grande parte da população. Podemos afirmar que estas tecnologias são atualmente condições essenciais para o desenvolvimento sócio-econômico do país. Nos próximos anos espera-se uma convergência destas duas tecnologias, mas para isso são necessárias estratégias que permitam a transmissão sem fio com mobilidade a uma alta taxa de dados, comparável à alcançável em sistemas banda larga com fio, como ADSL.

Dentre as diversas tecnologias emergentes de banda-larga sem fio, merece destaque o WiMAX móvel, baseado na norma IEEE 802.16e, finalizada em 2005. Sistemas WiMAX móvel já estão em planejamento e as primeiras redes devem entrar em operação ainda este ano. Trata-se entretanto de uma tecnologia nova e bastante complexa, na qual diversos aspectos e facilidades ainda estão inexplorados ou insuficientemente estudados. Devido ao pouco tempo de existência, há uma carência de informações técnicas mais detalhadas sobre o WiMAX na comunidade brasileira de pesquisa e desenvolvimento em telecomunicações. Com este tutorial pretende-se suprir em parte esta carência, divulgando a tecnologia WiMAX, e contribuindo para um melhor entendimento do funcionamento e do potencial do WiMAX móvel.

O tutorial tem inspiração no conhecimento adquirido pelos autores no desenvolvimento de um simulador sistemático do WiMAX, que possibilita um melhor entendimento das diversas características da interface de rádio. Este trabalho vem sido realizado em parceria com a Nokia, empresa que participa ativamente do desenvolvimento desta tecnologia.

Na Seção II fazemos um breve histórico da tecnologia WiMAX e descrevemos os diferentes papéis representados

André Barreto\*, Vicente Souza\*\* e André Cavalcante\*\*, Instituto Nokia de Tecnologia (INdT), Brasília-DF\*, Manaus-AM\*\*, E-mails: andre.barreto@indt.org.br, vicente.souza-de-junior@indt.org.br e andre.cavalcante@indt.org.br

pelo WiMAX Forum e pelo IEEE. Na Seção III são descritos os principais aspectos técnicos do WiMAX, e na Seção IV discorremos brevemente sobre as perspectivas de mercado desta tecnologia.

## II. CONTEXTO HISTÓRICO

É crescente o interesse em sistemas móveis capazes de prover serviços de banda larga, como mostra o sucesso alcançado pelos sistemas WLAN (família IEEE 802.11), originalmente projetados somente como uma extensão dos sistemas cabeados. O sistema WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*, família IEEE 802.16) surge também como um competidor importante, provendo serviços de dados em banda larga com alta mobilidade e com área de cobertura superior a de redes WLAN. O WiMAX surgiu da combinação de especificações de camadas física (PHY) e de acesso ao meio (MAC) providas pelo IEEE 802.16 [1], [2] bem como as recomendações de interoperabilidade e compatibilidade do WiMAX Forum [3], como descrito nas subseções a seguir.

### A. O IEEE 802.16

Cronologicamente, a primeira especificação da família IEEE 802.16 foi aprovada em dezembro de 2001 [4]. Tal norma especifica um sistema sem fio comutado por pacotes baseado em OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) para ambientes com linha de visada direta (LOS) operando com modulação em quadratura (QAM) à altas freqüências (10-66 GHz). Após algumas ratificações da especificação (IEEE 802.16a/b/c), que posteriormente foram retiradas, as especificações dos serviços de internet fixa sem fio (WiMAX fixo) foram lançadas em outubro de 2004 (IEEE 802.16d ou 802.16-2004) [1]. Esta norma especifica sistemas fixos e nômades em ambientes com ou sem linha de visada operando em freqüências abaixo de 11 GHz. Adicionalmente, a IEEE 802.16-2004 especifica um arcabouço completo de operação com múltiplas antenas (AAS - *Adaptive Antenna Systems*), incluindo STC (*Space-Time Coding*) e MIMO (*Multiple-Input-Multiple-Output*) com múltiplas antenas no terminal do usuário. Outras estratégias avançadas de gerência do recurso de rádio são especificadas, tais como AMC (*Adaptive Modulation and Coding*), ARQ (*Automatic Repeat reQuest*), HARQ (*Hybrid ARQ*) e escalonamento rápido.

O padrão WiMAX móvel (802.16e ou 802.16-2005) [2] foi lançado em 2005 como uma ratificação da norma 802.16-2004. Otimizado para mobilidade, tem suporte a *handovers* entre células e *roaming*. Utiliza OFDMA (*Orthogonal Frequency Division Multiple Access*) escalável (SOFDMA), uma técnica de modulação multiportadoras que usa sub-canalização, descrita em mais detalhes na Seção III-A.2.

### B. O WiMAX Forum

O WiMAX Forum é um consórcio formado em 2001 por mais de 400 operadoras e fornecedores de equipamentos e componentes. O seu objetivo principal é promover a adoção de equipamentos compatíveis com o padrão IEEE 802.16 por operadoras e fabricantes, definindo uma arquitetura de rede e interfaces para o WiMAX. Dessa forma, o nome WiMAX só é atribuído aos produtos que passam por testes de conformidade e interoperabilidade de acordo com os perfis definidos pelo WiMAX Forum. O objetivo é oferecer produtos “multimarcas” com interoperabilidade, tornando viável a produção em massa com custos baixos. Tal iniciativa pode ser comparada ao Wi-Fi Alliance, o qual certifica produtos da família IEEE 802.11.

O IEEE 802.16 é uma norma bastante complexa, com inúmeras possibilidades de combinação de parâmetros e de técnicas de transmissão. Para facilitar a implementação e a interoperabilidade, o WiMAX Forum definiu alguns perfis para a certificação, com apenas alguns conjuntos de parâmetros selecionados dentre as possibilidades da norma.

O primeiro laboratório oficial selecionado para certificação do WiMAX foi o Cetecom, em Málaga, na Espanha. Os primeiros produtos certificados foram em WiMAX fixo (802.16-2004) no final de 2005. Em fevereiro de 2006, em colaboração com o Governo Coreano e o Cetecom espanhol, o laboratório *Telecommunications Technology Association's* (TTA) foi escolhido como o segundo laboratório de testes e certificação da tecnologia WiMAX. Os primeiros produtos WiMAX Móvel certificados estão previstos para o final de 2007.

Já que a norma IEEE 802.16 padroniza apenas as camadas inferiores da interface de rádio, coube ao WiMAX Forum também a definição de uma arquitetura de sistema fim a fim, que se baseia integralmente em tecnologias e padrões já existentes. Esta arquitetura não é mandatória, mas deve ser adotada por operadoras para se facilitar o *roaming* entre diferentes redes. A arquitetura de rede do WiMAX está fora do escopo deste tutorial.

## III. DESCRIÇÃO TÉCNICA DO WiMAX IEEE 802.16E

### A. A camada física (PHY)

1) *Frequência e largura de banda:* Diferentemente de sistemas celulares tradicionais, como o GSM ou o WCDMA, no WiMAX não são pré-estabelecidas faixas de frequência de operação. A norma 802.16e permite o uso de qualquer frequência abaixo de 11 GHz, mas na prática diferentes faixas de frequência serão estabelecidas pelos órgãos reguladores dos diversos países, tipicamente em 2,5 GHz ou 3,5 GHz. Também é permitido o uso do WiMAX em bandas não licenciadas, como 2,4 ou 5 GHz.

A largura de banda de sistemas WiMAX é flexível, podendo variar entre 1,25 e 20 MHz, permitindo a adequação da tecnologia a diferentes alocações de espectro. Pelo WiMAX Forum entretanto, só foram definidos até agora perfis com largura de banda de 5 ou 10 MHz. As diferentes larguras de banda são obtidas por meio do SOFDMA, descrito brevemente na Subseção III-A.2.

2) *OFDMA Escalável (SOFDMA):* A norma IEEE 802.16 prevê diferentes esquemas para a camada física, porém para o WiMAX móvel o modo principal se baseia no esquema OFDMA de transmissão. OFDMA é uma variação da técnica de múltiplas portadoras OFDM [7], na qual diferentes subportadoras podem ser alocadas a diferentes usuários. Esquemas de múltiplas portadoras, como OFDMA, são adequados para a transmissão de sinais com alta taxa de símbolo em canais com múltiplos percursos, como o encontrado em sistemas de comunicações móveis. OFDMA pode ser eficientemente implementado por meio de uma IFFT no transmissor.

No SOFDMA as diferentes larguras de banda são alcançadas com diferentes números de subportadoras (diferentes tamanhos da IFFT), mantendo-se fixo o intervalo entre elas,  $\Delta f = 10,397$  kHz, e, consequentemente, a duração do símbolo útil,  $T_S = 91,43 \mu s$ . Desta maneira o desempenho da transmissão em relação ao perfil de múltiplos percursos e ao desvio de freqüência é praticamente independente da largura de banda escolhida, além de se facilitar a implementação do transmissor e do receptor.

O uso de prefixo cíclico em um intervalo de guarda a cada símbolo OFDMA é essencial para minimizar os efeitos da interferência entre símbolos. Quanto maior o intervalo de guarda, maior é a robustez do sistema a múltiplos percursos, mas por outro lado maior é o desperdício de recursos, já que o prefixo cíclico não é aproveitado. A norma IEEE 802.16e especifica diferentes tamanhos de prefixo cíclico, mas somente um intervalo de guarda  $T_G = T_S/8$  é previsto nos primeiros perfis do WiMAX.

3) *Alocação dos recursos de rádio e esquemas de permutação:* As subportadoras podem ser subdivididas em três tipos:

- *piloto:* são utilizadas para estimação de canal e sincronização
- *dados:* carregam informações de usuário ou de sinalização
- *nulas:* reservadas para banda de guarda e para a portadora DC

As subportadoras em cada símbolo são divididas em vários subcanais lógicos, cujo tamanho depende do esquema de subcanalização escolhido. De uma maneira geral as subportadoras em um subcanal são não adjacentes, e espalhadas ao longo de todo o espectro de modo pseudo-aleatório, o que garante uma maior diversidade de freqüência. Opcionalmente, podem ser também utilizados subcanais com portadoras adjacentes.

Os principais esquema de subcanalização (também conhecidos como esquemas de permutação) são:

- *PUSC (Partial Use of Subchannels):* pode ser usado tanto no enlace direto (DL) como no reverso (UL). Neste esquema é feita inicialmente a divisão das subportadoras em diferentes *clusters* (no UL) ou *tiles* (no DL) de subportadoras adjacentes, que são divididos em 6 grupos de *clusters* ou *tiles* não adjacentes. Cada subcanal contém subportadoras permutadas de apenas um grupo, espalhadas ao longo do espectro. Os subcanais são

divididos em segmentos, que podem ser alocados a diferentes setores de uma mesma estação base (BS).

- **FUSC (Full Use of Subchannels)**: é bastante semelhante ao PUSC, com a diferença que as subportadoras não são divididas em *clusters* antes da permutação. O FUSC está disponível apenas no DL.
- **AMC (Adaptive Modulation and Coding)** : neste modo, subcanais são formados por subportadoras adjacentes. O esquema AMC permite uma modulação e codificação adaptativa por subcanal, segundo o princípio do *water-filling*, assim como uma implementação mais eficiente de esquemas de antenas inteligentes baseados em formação de feixes (*beamforming*).

Existem também outros esquemas de subcanalização, que entretanto não estão previstos nos perfis WiMAX.

No DL FUSC as subportadoras piloto são selecionadas no início do processo de permutação, e as subportadoras de dados restantes são então alocadas aos subcanais. No UL e no DL PUSC, os subcanais são escolhidos considerando todas as subportadoras não nulas, e dentro de cada subcanal algumas são reservadas como piloto.

O uso de esquemas de subcanalização com permutação, como o PUSC e o FUSC, permite um maior aproveitamento da diversidade de freqüência inerente a um canal banda larga, já que as subportadoras estão espalhadas em todo o espectro disponível. Entretanto, no modo AMC, caso estejam disponíveis informações confiáveis sobre a razão sinal-ruído (RSR) em todo o canal banda larga, podemos aumentar a capacidade de transmissão selecionando para transmissão em cada subcanal o usuário com a melhor RSR. O WiMAX prevê a existência de um canal de retorno para informações sobre a qualidade do canal, mas a disponibilidade de informações consistentes sobre o canal só é viável para usuários com baixa mobilidade. Além disso, a alocação de recursos com base na qualidade do canal deve também levar em conta a necessidade de uma transmissão justa para todos os usuários (*fairness*), assim como os requisitos de qualidade de serviço (QoS), em particular no que se refere ao retardo na transmissão, já que não podemos esperar indefinidamente até que um dado usuário tenha uma condição favorável de canal para iniciar a transmissão. Os ganhos de capacidade com AMC são promissores, mas as dificuldades associadas com a alocação ótima de recursos na freqüência e com a estimativa de canal tornam mais provável inicialmente o uso dos esquemas com permutação no WiMAX.

A unidade mínima para a alocação de recursos é o *slot*. O tamanho do *slot* também depende do esquema de permutação e da direção do enlace. Cada *slot* consiste em um bloco retangular de  $N$  subcanais por  $M$  símbolos OFDMA adjacentes. É bom lembrar que subcanais adjacentes não significam subportadoras físicas adjacentes.

4) *Duplexação e Formatação dos quadros*: Embora também seja previsto pela norma um modo FDD (*Frequency Division Multiplexing*), nos perfis do WiMAX o esquema de duplexação para o WiMAX móvel é apenas o TDD (*Time Division Multiplexing*), que permite uma maior flexibilidade na alocação dos recursos entre os enlaces direto e reverso, e é portanto mais apropriado para serviços de dados

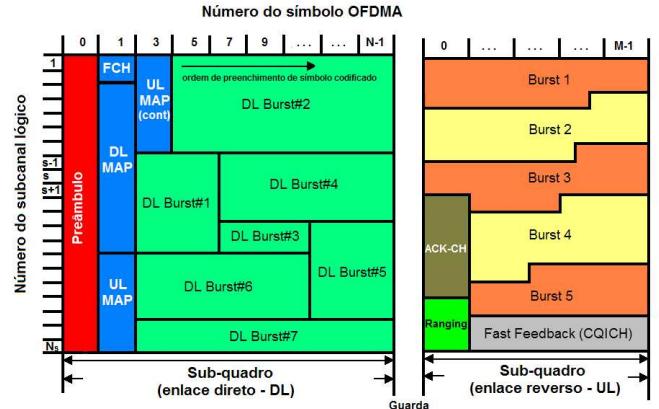


Fig. 1. Formato Geral do Quadro TDD do sistema WiMAX (Duplexação).

assimétricos, além de possibilitar uma melhor adequação a diferentes alocações de espectro, já que não são necessárias bandas separadas nos dois enlaces. Entretanto, para se evitar interferência entre as direções do enlace é necessária no modo TDD uma sincronização entre as diferentes estações base de um sistema WiMAX.

Um exemplo de um quadro TDD pode ser visto na Fig. 1, onde temos a dimensão do tempo, representada pelo número do símbolo OFDMA, e a dimensão da freqüência, representada pelos subcanais lógicos.

Aos diferentes usuários são alocados um ou mais *bursts*, correspondentes a blocos de *slots* contíguos. O primeiro símbolo transmitido no DL é sempre um préambulo, que permite ao terminal móvel a sincronização com o sinal transmitido pela BS. No segundo símbolo é transmitido nos primeiros subcanais o FCH (*Frame Control Header*), que descreve o *burst* do DL-MAP, cuja funcionalidade será detalhada na Seção III-B.2. Dentre outras coisas, o DL-MAP descreve a alocação dos *bursts* dos usuários em cada quadro. O equivalente para o UL é o UL-MAP, enviado imediatamente a seguir do DL-MAP.

No UL algumas subportadoras são escolhidas para o canal de *ranging*. Este é um canal com acesso por contenção, ou seja, o canal não é reservado para nenhum usuário. Ele é utilizado para a solicitação de banda por parte dos terminais, assim como para sinalização de *handover* e para a sincronização de tempo e freqüência dos transmissores no UL.

Cada quadro pode ser dividido em diferentes zonas de permutação. Cada zona consiste em um número de símbolos adjacentes, e diferentes esquemas de permutação podem ser utilizados em diferentes zonas. Entretanto, a primeira zona no DL sempre tem que usar o esquema PUSC, utilizado para envio das mensagens de sinalização contidas no FCH, assim como no DL- e UL-MAP. A Fig.2 ilustra o conceito de zonas de permutação do WiMAX.

Segundo o perfil WiMAX, a duração do quadro TDD deve ser de 5 ms, embora na norma IEEE 802.16 sejam previstos outros tamanhos de quadro.

5) *Codificação e Modulação*: O WiMAX tem suporte a diversas combinações de esquema de modulação, QPSK, 16-QAM e 64-QAM (opcional no UL); e codificação com

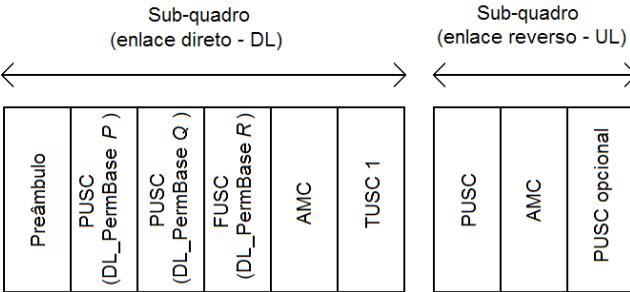


Fig. 2. Zonas de Permutação no WiMAX.

uma taxa  $R = 1/2$ . Taxas de codificação mais altas podem ser alcançadas por meio de perfuração (*puncturing*) e taxas mais baixas podem ser alcançadas por códigos de repetição de até 6 vezes. São padronizados códigos convolucionais (CC), códigos turbo (CTC) e LDPC (*Low Density Parity Codes*). Este último entretanto é opcional de acordo com o perfil WiMAX.

Adaptação de enlace é essencial para um bom desempenho do WiMAX, e o esquema de modulação e codificação mais apropriado para cada *burst* é escolhido com base nas informações de canal providenciadas por um canal de retorno.

#### B. A camada de acesso ao meio (MAC)

A camada MAC do sistema WiMAX é responsável pela alocação de recursos de rádio para tráfego de dados em alta taxa de transmissão demandado por múltiplos serviços banda larga (dados, vídeo e voz). Sensível a esse requerimento, a alocação de recurso para um terminal feita pela MAC pode variar de um simples *slot* até mesmo um quadro inteiro. As próximas seções descrevem as principais características da MAC do sistema WiMAX.

1) *Alocação de Recursos e Formatação dos Quadros:* No WiMAX, a BS é responsável por controlar a alocação de recursos para os canais no DL e UL. No DL, o escalonador transforma unidades de serviço MAC (MSDU) vindas das camadas superiores em unidades de pacotes de dados MAC (MPDU) e as manda para a camada física. No UL, o escalonador da BS oferece “oportunidades” (*grants*) de alocação de recurso às estações móveis (*Mobile Stations-MS*) ou estações de assinantes (*Subscriber Stations-SS*)<sup>1</sup>, as quais podem ser independentes para cada tipo de serviço demandado por um terminal.

A Qualidade de Serviço (QoS) é garantida por características como baixo tempo de acesso ao canal, assimetria entre DL e UL, granularidade fina dos recursos e mecanismos de alocação flexíveis. No WiMAX móvel, a QoS é provida através de fluxos de serviços, i.e., um fluxo unidirecional de pacotes com um conjunto particular de parâmetros de QoS. Para prover um certo tipo de serviço de dados, a MAC da BS e a MAC da MS estabelecem um enlace lógico unidirecional chamado de conexão. Os pacotes de um fluxo de serviço são endereçados as suas MACs correspondentes e suas interfaces através desta conexão. Esse

tipo de QoS orientado a conexão pode fornecer um controle preciso da interface aérea, podendo habilitar eficientemente o controle de QoS fim-a-fim. Cinco categorias de QoS (conjuntos de parâmetros de um fluxo) são definidas para o WiMAX [5]: **UGS** (*Unsolicited Grant Service*), projetado para serviço de Voz sobre IP (VoIP); **rTPS**, (*Real-time Polling Service*) para serviços áudio-visuais; **ErtPS** (*Extended real-time Polling Service*) para serviço de voz com detecção de silêncio; **nrtPS** (*Non-real-time Polling Service*), para serviço de FTP (*File Transfer Protocol*); e **BE** (*Best Effort*), projetado para atender serviços de navegação na internet. Deve ser mencionado que um mesmo usuário pode ter várias conexões simultâneas com requisitos de QoS diferentes.

Um MPDU é chamado de quadro MAC. A Fig.3 mostra seu formato. O quadro MAC começa com um cabeçalho de tamanho fixo, o qual pode ser seguido por um espaço para o *payload MAC* (PMAC). O PMAC pode conter um CRC (*Cyclic Redundancy Check*). Se presente, o PMAC pode conter um conjunto de MSDUs, fragmentos de uma SDU e mais sub-cabeçalhos. Esse formato permite a fragmentação (diminuindo o risco de perder MSDU grandes), empacotamento (evitando *overhead* excessivo) e concatenação de pacotes (permitindo múltiplos MPDUs em uma transmissão simples).

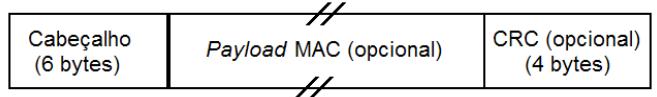


Fig. 3. Formato Geral do MPDU (Quadro MAC).

Cada *burst* da camada física pode transmitir um ou mais MPDUs. Cada usuário pode ter vários bursts alocados em um mesmo quadro. A alocação do *burst* no DL se dá por meio de blocos retangulares de *slots*. No UL é definido o número de *slots* em cada *burst*, e sua posição inicial no quadro. Os *slots* são alocados então sequencialmente, inicialmente ocupando todos os intervalos de símbolo para um mesmo subcanal antes de ocupar um novo subcanal, como pode ser visto na Fig. 1. Desta maneira podemos aumentar o alcance da transmissão no UL, já que são sempre alocadas o mínimo de subportadoras necessárias para uma certa quantidade de dados, e, dada uma certa potência de transmissão máxima na MS, é maximizada a potência de transmissão em cada subportadora. Este é o chamado ganho de subcanalização.

2) *Sinalização:* A camada MAC define um conjunto de mensagens necessárias para várias funções, tais como: estabelecimento de conexão, *ranging*, alocação de banda e configuração. Entretanto, para o entendimento das operações de redes 802.16, quatro mensagens MAC chaves necessitam ser discutidas, são elas: DL-MAP, UL-MAP, DCD (*DL Channel Descriptor*) e UCD (*UL Channel Descriptor*). Estas mensagens executam funções de alocação de banda e configuração, sendo brevemente descritas a seguir:

- **DL-MAP e UL-MAP:** são mensagens que carregam a informação de alocação de banda para todos os MSs no quadro atual no DL e UL, respectivamente. Elas definem banda em termos de número de sub-canais e números de símbolos OFDMA alocados para cada *burst*, conforme

<sup>1</sup>Na IEEE 802.16 são denominados SS os terminais fixos e MS os móveis, compatíveis com a norma IEEE 802.16e. Neste artigo usaremos apenas o termo MS

mostrado na Fig. 1. Também é definido no MAP a posição de cada *burst* no quadro. Tais mensagens podem também alocar banda para funções especiais tais como canais de retorno para HARQ e MIMO.

- DCD e UCO: são mensagens de *broadcast* que carregam informações de configuração para todos os MSs. As informações de configuração incluem:

- Parâmetros da camada física: por exemplo, os intervalos de guarda (TTG - *Transmission Time Gap*, RTG - *Receive Transmission Gap*) e o BS ID.
- *Burst Profiles*: um sistema WiMAX pode definir um conjunto de *burst profiles*. Cada *burst profile* é uma combinação de um tipo de codificação de canal com um tipo de modulação.

Mensagens DCD e UCD não necessitam ser enviadas em cada quadro. Entretanto, elas devem ser enviadas periodicamente para possibilitar aos MSs, que sincronizam com o sistema, identificarem os parâmetros da camada física e *burst profiles*.

3) ARQ: ARQ é um mecanismo de controle da camada MAC onde o receptor solicita que o transmissor reenvie um bloco de dados quando erros são detectados [6]. O mecanismo ARQ é baseado em mensagens de *acknowledgement* (ACK) ou *nonacknowledgement* (NACK), transmitidas pelo receptor para o transmissor para indicar uma recepção correta (ACK) ou uma recepção incorreta (NACK) dos quadros anteriores. O ARQ pode ser ativado por conexão, sendo especificado e negociado durante a criação da mesma. Uma conexão não pode combinar tráfego ARQ com tráfego não-ARQ.

### C. Gerência da Mobilidade

Um dos maiores objetivos da ratificação IEEE 802.16e foi introduzir mobilidade ao WiMAX. Esse valor agregado foi definido junto com alguns modos de economia de energia (*Power-Save Modes*), objetivando melhorar sua eficiência.

O *handover* é um mecanismo que permite uma MS comutar de uma BS para outra mantendo a continuidade da sessão de comunicação. No padrão 802.16e, dois tipos genéricos de *handover* são especificados: *Hard Handover* (HHO) e *Soft Handover* (SHO). No HHO, a MS interrompe seu enlace de rádio com a BS atual antes do estabelecimento do enlace com a nova BS. Já no SHO, a MS estabelece seu enlace de rádio com a nova BS antes de interromper o enlace com a BS atual, podendo o mesmo ter dois ou mais enlaces com duas ou mais BSs. Dois tipos de SHO são definidos no padrão 802.16e:

- FBSS (*Fast BS Switching*): a MS pode comutar rapidamente de uma BS para outra, devido ao fato do mesmo não ter a necessidade de executar o procedimento completo de autenticação na nova BS.
- MDHO (*Macro Diversity Handover*): transmissões simultâneas entre a MS e mais que uma BS, podem explorar o conceito de diversidade macroscópica.

Apenas o HHO é mandatório no padrão 802.16e, sendo este, um procedimento mais simples.

O IEEE 802.16e define dois modos de economia de energia. O *Sleep Mode*, no qual a MS negocia períodos de ausência na BS servidora, almeja a minimização do uso de potência e

dos recursos de rádio da BS. Nesses períodos de ausência, a MS pode realizar outras tarefas (medidas, por exemplo) que não necessitem da comunicação com a BS. O segundo modo, chamado de *Idle Mode*, permite que a MS se torne periodicamente disponível para o tráfego de *broadcast* no DL, sem a necessidade de registro na BS. Esse modo facilita o processo de decisão de *handover* e sua sinalização, além de permitir que a BS alerte a MS sobre tráfego pendente no DL.

### D. Técnicas Avançadas

1) *Múltiplas Antenas*: Técnicas de múltiplas antenas podem ser usadas em sistemas WiMAX para se obter aumento de *throughput* (vazão útil) e maior desempenho quanto à taxa de erros, tirando-se proveito do efeito de multipercorso. Diversos benefícios podem ser citados com o uso de tais técnicas, como: ganho de diversidade, ganho de arranjo, redução de interferência e multiplexação espacial. De um modo geral, técnicas de múltiplas antenas podem ser divididas em três grupos:

- Sistemas de Diversidade: tiram proveito do uso de múltiplas antenas e de técnicas de processamento de sinal para prover ganhos ao sistema. Podem existir sistemas de diversidade com mais de uma antena na BS e na MS, mas devido ao custo associado com transmissores, é de se esperar que, pelo menos numa primeira fase, as MSs utilizem múltiplas antenas apenas para recepção. Neste contexto, serão abordadas quatro técnicas:
  - STC: o padrão 802.16 propõe o uso de esquemas baseados no de Alamouti [8] para implementação da STC no WiMAX. Tal esquema é um código espaço-temporal (*Space-Time Code*) no qual a informação é enviada em duas antenas (contexto espacial) sobre duas transmissões consecutivas no tempo. Assim, a informação é dita transmitida em um contexto espaço-tempo. O esquema de Alamouti permite codificação com taxa  $R = 1$ , pois são transmitidos dois símbolos em dois intervalos de tempo. Também está previsto na norma o uso de quatro antenas de transmissão, o que só é entretanto possível com redução na taxa de codificação. O propósito deste esquema é favorecer o aumento de capacidade do sistema e melhorar o desempenho do mesmo quanto ao requisito de taxa de erro, através da transmissão codificada da informação.
  - Seleção de Antena: é um abordagem simples para aumento de ganho de diversidade. A idéia principal desta técnica é simplesmente selecionar a antena com o melhor ganho de canal em um dado tempo ao invés de combinar os sinais das múltiplas antenas disponíveis. Pode se aplicável para transmissões tanto no DL quanto para o UL.
  - MRC (*Maximum Ratio Combining*): é uma técnica de processamento de sinal que estima as características do canal para múltiplas antenas e então aplica pesos a cada uma para maximizar a relação sinal ruído mais interferência (RSRI) do sinal somado. MRC pode prover ganho de diversidade e de arranjo mas

não envolve cancelamento de interferência ativa ou multiplexação espacial (SM).

- IRC (*Interference Rejection Combining*): o MRC maximiza a RSRI apenas quando o ruído nas diversas antenas é descorrelatado. Em cenários dominados por interferência em geral existe uma correlação entre a interferência nas duas antenas. Se esta correlação puder ser estimada o receptor ideal é o IRC [9]. Entretanto nem sempre é viável uma estimação confiável da covariância entre as amostras de ruído mais interferência, em particular no UL, onde há menos pilotos disponíveis.

- Sistemas de Antenas Adaptativas: utiliza técnicas sofisticadas de processamento de sinais para construção de um modelo de canal. O conhecimento do canal pode ser usado em conjunto com técnicas de formação de feixe (*beamforming*) no sentido do usuário desejado, ao mesmo tempo que anula a energia irradiada (*null steering*) no sentido dos interferentes.
- Sistemas MIMO com multiplexação espacial: são definidos como sendo sistemas onde tanto a BS e a MS têm no mínimo dois transceptores por canal, com antenas associadas. Dependendo das características do canal, podem então ser criados fluxos de transmissão simultâneos transmitidos de antenas diferentes, como por exemplo em [10]. Desta forma podemos multiplicar a taxa de transmissão em um dado canal pelo número mínimo de antenas disponíveis em qualquer um dos lados do enlace. No UL diferentes usuários podem ser considerados como transceptores diferentes, e podemos alocar o mesmo recurso tempo-freqüência para mais de um usuário, o que é conhecido como MIMO colaborativo.

2) *HARQ*: ARQ Híbrido (HARQ) [11] é uma combinação da repetição de pacotes realizada no ARQ com códigos corretores de erros. Embora o 802.16e especifique dois tipos de HARQ, redundância incremental e combinação Chase, apenas este último é obrigatório pelo perfil WiMAX. Neste esquema, em caso de erro na detecção, o pacote não é descartado, e os valores do sinal recebido para cada símbolo são armazenados. O transmissor, ao ser informado do erro, retransmite então exatamente o mesmo pacote utilizando o mesmo esquema de modulação e codificação. O receptor pode então combinar o sinal recebido com aquele previamente armazenado, aumentando substancialmente a probabilidade de detecção correta do pacote. HARQ permite a transmissão confiável de dados mesmo em situações com razão sinal-interferência muito desfavoráveis.

#### E. Desafios Tecnológicos

Os desafios tecnológicos estão relacionados à grande flexibilidade de alocação de recursos (tempo x freqüência x espaço) e as várias estratégias de gerência dos mesmos. Não é uma tarefa fácil lidar com tantos graus de liberdade, vários cenários de aplicações e demandas, otimizando o sistema de maneira a permitir o uso eficiente de todo seu potencial. Outro vilão é o canal rádio-móvel. Estudos comprovam as

dificuldades de propagação em freqüências altas bem como quando terminais se movimentam com velocidade alta.

Embora apresente um ótimo desempenho, o WiMAX ainda não é suficiente para satisfazer as necessidades de sistemas 4G. Para isso está sendo desenvolvida o IEEE 802.16m, que será uma evolução do WiMAX para taxas de dados da ordem de 1 GBps. As dificuldades tecnológicas para se alcançar este objetivo ambicioso ainda são muitas, e para isso será necessária uma aplicação ainda mais eficiente dos recursos já utilizados no 802.16e.

#### IV. APLICAÇÕES E MERCADO

A tecnologia WiMAX fixa (IEEE 802.16-2004) surgiu como uma alternativa sem fio para acesso fixo a redes de dados banda larga, competindo com tecnologias cabeadas como ADSL e TV a cabo. O desenvolvimento do WiMAX móvel (IEEE 802.16e) veio a atacar, além deste, um outro nicho de mercado, o de banda larga móvel. O WiMAX móvel pode servir então de complemento a tecnologias celulares já estabelecidas, como o GSM e o CDMA, para usuários com necessidades de taxas de dados mais altas. Dentro deste contexto existem diversos concorrentes, merecendo destaque a evolução da família GSM/WCDMA, iniciando pelo HSPA e terminando no LTE. Pode-se dizer que, tanto em termos de desempenho quanto em termos cronológicos, o WiMAX se encontra entre estes dois sistemas.

Mesmo diante do anúncio de investimentos significantes [12], a incerteza mercadológica do sistema WiMAX é grande. Existe a expectativa de sucesso, mas, por outro lado, a competição natural com os sistemas 3G pode criar um clima de disputa, resultando em perdas de investimento. Algumas incertezas ainda continuam em estudo, entre elas estão dúvidas relacionadas ao custo de implantação e operação do sistema WiMAX, o retorno do investimento nos sistemas legados (um grande problema para operadoras) e a própria usabilidade dos serviços de banda larga em terminais móveis.

No final das contas, esse conflito mercadológico pode gerar um terreno fértil para novas descobertas na esfera tecnológica.

#### REFERÊNCIAS

- [1] IEEE, "Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems," *IEEE STD 802.16 - 2004*, Outubro, 2004.
- [2] IEEE, "Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems," *IEEE P802.16e/D12*, Fevereiro, 2005.
- [3] WiMAX Forum, <http://www.wimaxforum.org/>.
- [4] IEEE 802.16, <http://grouper.ieee.org/groups/802/16/>.
- [5] WIMAX Forum, "Mobile WiMAX - Part I: A Technical Overview and Performance Evaluation," Agosto, 2006.
- [6] L. Nuaymi, *WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access*. John Wiley & Sons, Ltd., 2007.
- [7] R. D. J. Van Nee e R. Prasad, *OFDM Wireless Multimedia Communication*. Artech House, 2000
- [8] Alamouti, S., "A simple transmit diversity technique for wireless communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 16(8), outubro, 1998.
- [9] J. Karlsson e J. Heinengard, "Interference Rejection Combining for GSM," in *Proc. of ICUPC*, 1996
- [10] G. Foschini, "Layered Space-Time Architecture for Wireless Communication in a Fading Environment When Using Multi-Element Antennas," *Bell Laboratories Technical Journal*, outubro, 1996
- [11] J.-F. Cheng, "Coding Performance of Hybrid ARQ Schemes", *IEEE Trans. Commun.*, Vol. 54, No. 6, pp. 1017–1029, June 2006
- [12] Sprint Nextel, "Sprint Nextel and Nokia in WiMAX Pact," <http://www2.sprint.com>, Janeiro, 2007.