

# Um módulo para simulação de redes WiMAX no simulador ns-2\*

Juliana Freitag Borin e Nelson L. S. da Fonseca

<sup>1</sup>Instituto de Computação – Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)  
Caixa Postal 6176 – 13084-971 – Campinas – SP – Brazil

{juliana,nfonseca}@ic.unicamp.br

**Abstract.** *The Network Simulator (ns-2) is a popular tool for the simulation of computer networks; it provides substantial support for simulation of Internet protocols over wired and wireless networks. Although some modules for the simulation of WiMAX networks have been proposed for the ns-2, none of them implements all MAC features specified by the IEEE 802.16 standard for bandwidth management and QoS support. This paper, however, does present the design and validation of a WiMAX module based on the IEEE 802.16 standard. The module implemented includes mechanisms for bandwidth request and allocation, as well as for QoS provision. Moreover, the implementation is standard-compliant.*

**Resumo.** *O simulador ns-2 (Network Simulator) é uma das ferramentas mais utilizadas para simulação de redes de computadores. A ferramenta permite a simulação de redes cabeadas e sem fio bem como de vários protocolos utilizados na Internet. Embora alguns módulos para simulação de redes WiMAX tenham sido propostos para o ns-2, nenhum deles implementa todas as funcionalidades da camada MAC definidas pelo padrão 802.16 para gerenciamento de banda e suporte de QoS. Este artigo apresenta a especificação e implementação de um módulo de simulação para redes WiMAX, baseado no padrão IEEE 802.16, para a ferramenta ns-2. O módulo implementado inclui funcionalidades tais como requisição e escalonamento de largura de banda e provisão de QoS. Resultados da validação do módulo evidenciam que a implementação está de acordo com as especificações do padrão IEEE 802.16.*

## 1. Introdução

O acesso sem fio em banda larga (*Broadband Wireless Access - BWA*) tem recebido grande destaque tanto no meio comercial como no meio acadêmico. A tecnologia BWA é capaz de prover altas taxas de transferência de dados, alto nível de escalabilidade e baixo custo de instalação e manutenção para o acesso residencial e comercial à Internet.

O padrão IEEE 802.16 [IEEE Std. 2004], frequentemente referenciado como WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access Forum*), vem sendo desenvolvido com a finalidade de padronizar a tecnologia BWA. O padrão define a interface aérea e o protocolo de acesso ao meio para redes metropolitanas sem fio fornecendo altas taxas de transmissão para o acesso em banda larga à Internet.

---

\*O presente trabalho foi realizado com o apoio do UOL ([www.uol.com.br](http://www.uol.com.br)), através do Programa UOL Bolsa Pesquisa, processo número 20060511022200a e do CNPq, processo número 305076/2003-5.

Por ser um padrão recente e por deixar, propositalmente, vários pontos em aberto para que os fabricantes possam diferenciar seus produtos, o padrão IEEE 802.16 tem despertado grande interesse na comunidade acadêmica. Em particular, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas envolvendo os mecanismos para provisão de Qualidade de Serviço (QoS) da camada de acesso ao meio [Chen 2005, Freitag e Fonseca 2007, Sun 2006, Wongthavarawat 2003].

A simulação é uma ferramenta essencial na pesquisa de redes de computadores, pois permite o desenvolvimento e a análise de novos protocolos e mecanismos em topologias complexas, sem a necessidade de implementá-las fisicamente. Dentre as ferramentas disponíveis para simulação de redes de computadores, o *Network Simulator* (ns-2) é a ferramenta de maior popularidade entre os pesquisadores [ns 2002]. Esta popularidade se deve ao fato do ns-2 ser de domínio público e permitir a simulação de grande parte dos protocolos utilizados na Internet em redes cabeadas e sem fio.

Dois módulos foram propostos para simulação de redes IEEE 802.16 usando o ns-2. Um deles, implementado pelo *National Institute of Standards and Technology* (NIST) [Rouil 2007], provê, entre outras funcionalidades, camada física OFDM com modulação configurável, duplexação por divisão de tempo (*Time Division Duplexing* - TDD), topologia ponto-multiponto (*Point-to-Multipoint* - PMP) e fragmentação de pacotes. Entretanto, este módulo não implementa os mecanismos para suporte de QoS na camada MAC, ou seja, os diferentes tipos de serviço e mecanismos de escalonamento com QoS. O segundo módulo, proposto em [Chen *et alli* 2006], também implementa o modo de duplexação TDD e a topologia PMP, mas utiliza a implementação do canal sem fio já fornecida pelo ns-2. Embora este módulo implemente os cinco tipos de serviço definidos pelo padrão IEEE 802.16, o mecanismo para requisição de largura de banda não contempla a especificação do padrão. Adicionalmente, o módulo não permite que o usuário configure os requisitos de QoS, tais como latência máxima e banda mínima, dos serviços de alta prioridade. A ferramenta de simulação OPNET [OPNET 2007], de domínio privado, inclui um módulo para simulação de redes WiMAX. No entanto, o acesso a esse módulo ainda é restrito aos membros do grupo responsável por seu desenvolvimento.

Este artigo apresenta a especificação e a implementação de um módulo para simulação de redes IEEE 802.16 no simulador ns-2. O desenvolvimento do módulo tem seu foco na camada de acesso ao meio e utiliza a camada física sem fio já disponível no ns-2. A implementação contempla os mecanismos de reserva e alocação de banda e de provisão de QoS especificados no padrão. O módulo implementado permite diversos estudos sobre a camada de acesso ao meio, como por exemplo, a investigação de mecanismos para provisão de QoS. Acredita-se que o módulo implementado é de extrema valia para pesquisadores da área e que deverá ter um impacto positivo em investigações de novos problemas em redes IEEE 802.16. Embora o código seja extenso, totalizando 17 classes e mais de 17.000 linhas de código, a modularização obtida com a implementação orientada a objetos facilita a inclusão de novas funcionalidades.

O restante do artigo está organizado da seguinte forma. A Seção 2 descreve as principais características do padrão IEEE 802.16. A Seção 3 apresenta a modelagem e a implementação do módulo para simulação de redes WiMAX. A Seção 4 apresenta os experimentos de simulação realizados para validar a implementação do módulo. Finalmente, a Seção 5 conclui o artigo.

## 2. Padrão IEEE 802.16

A arquitetura de uma rede que utiliza o padrão 802.16 possui dois elementos principais: *Base Station* (BS) e *Subscriber Station* (SS). A BS realiza a comunicação entre a rede sem fio e a rede núcleo e suporta interfaces IP, ATM, Ethernet e E1/T1. A SS fornece ao usuário acesso à rede núcleo através do estabelecimento de conexões com a BS em uma topologia Ponto-Multiponto (PMP). O padrão ainda permite a implementação de uma topologia *Mesh* (opcional). A principal diferença entre as topologias PMP e *Mesh* está no fato de que em uma rede PMP o tráfego flui apenas entre a BS e as SSs, enquanto que no modo *Mesh*, o tráfego pode ser roteado através das SSs e pode ocorrer diretamente entre duas SSs. Este trabalho enfoca redes com topologia PMP.

A camada física opera em um formato de *frames*, os quais são subdivididos em intervalos de tempo chamados *slots* físicos. Em cada *frame* há um *subframe downlink* e um *subframe uplink*. O *subframe downlink* é utilizado pela BS para a transmissão de dados e de informações de controle para as SSs. O *subframe uplink* é compartilhado entre todas as SSs para transmissões que têm como destino a BS.

O padrão IEEE 802.16 permite dois modos de acesso ao meio físico: duplexação por divisão de frequência (*Frequency Division Duplexing* - FDD) e duplexação por divisão de tempo (*Time Division Duplexing* - TDD). No modo FDD os canais *downlink* e *uplink* operam simultaneamente em frequências diferentes. No modo TDD os *subframes uplink* e *downlink* compartilham a mesma frequência, logo, não é possível realizar transmissões simultâneas nos dois sentidos. Cada *frame* TDD tem um *subframe downlink* seguido por um *subframe uplink*. Neste trabalho, utiliza-se o modo de acesso TDD.

A camada de acesso ao meio (*Medium Access Control layer* - MAC) é orientada a conexão. Cada conexão é identificada por um identificador (*Connection Identifier* - CID) de 16 bits e cada SS tem um endereço MAC único que a identifica e é utilizado para registrá-la e autenticá-la na rede. Todo o tráfego, incluindo o tráfego não orientado a conexão, é mapeado para uma conexão. Além do gerenciamento das conexões, a camada MAC é responsável pelo controle de acesso ao meio e pela alocação de banda.

A alocação de recursos para as SSs é realizada sob demanda. Quando uma SS precisa de largura de banda para uma conexão, ela envia uma mensagem de requisição para a BS. Uma requisição de banda pode ser enviada como um pacote, cujo cabeçalho indica a presença de um pedido de banda, ou pode ser enviada juntamente com um pacote de dados (*Piggyback*). Todas as requisições devem indicar o número de *bytes* necessários para transmitir os dados (*payload*) e o cabeçalho MAC. A requisição de largura de banda pode ser incremental ou agregada. Uma requisição incremental indica a largura de banda adicional que a SS precisa, enquanto uma requisição agregada indica a largura de banda total necessária para a SS.

Para a SS, as requisições de banda sempre são referentes a uma determinada conexão, enquanto os *grants* alocados pela BS são destinados a uma SS e não a uma conexão em particular. Dessa forma, a SS pode utilizar o *grant* recebido para uma conexão diferente daquela para a qual a requisição foi feita.

A alocação de *grants* para o envio de requisições de banda pode ser para uma SS particular ou para um grupo de SSs e recebe o nome de *polling*. O padrão define dois mecanismos de *polling*:

- *unicast*: a SS recebe um *grant* cujo tamanho é suficiente para o envio de uma requisição de banda;
- baseado em contenção: nesse caso, a BS aloca um *grant* para um grupo de SSs, as quais devem competir pela oportunidade de enviar a mensagem de requisição. Para reduzir a probabilidade de colisão, apenas as SSs que necessitam de banda participam da contenção. Para resolução da contenção, as estações devem utilizar o algoritmo de *backoff* exponencial. O tamanho da janela mínima e da janela máxima de contenção é controlado pela BS.

A MAC também provê mecanismos para fornecer QoS aos tráfegos *uplink* e *downlink*. O principal mecanismo para a provisão de QoS consiste em associar os pacotes que passam pela camada MAC a um fluxo de serviço. O fluxo de serviço é um serviço da camada MAC que fornece transporte uni-direcional aos pacotes. Durante a fase de estabelecimento da conexão, esses fluxos de serviço são criados e ativados pela BS e pela SS. Cada fluxo de serviço ativo é associado a uma conexão. Várias seções das camadas superiores podem operar sobre o mesmo fluxo de serviço na camada MAC caso seus requisitos de QoS sejam os mesmos. Cada fluxo de serviço deve definir seu conjunto de parâmetros de QoS, dentre eles retardo máximo, largura de banda mínima e o tipo do serviço. Para dar suporte às várias aplicações multimídia disponíveis na Internet, o padrão IEEE 802.16 define cinco tipos de fluxo de serviço.

O serviço UGS (*Unsolicited Grant Service*) suporta fluxos de tempo real que geram pacotes de dados com tamanho fixo periodicamente, tal como voz sobre IP. Conexões UGS recebem *grants* periódicos de tamanho fixo.

O segundo tipo de serviço é o rtPS (*Real-Time Polling Service*), projetado para aplicações com requisito de tempo real que geram pacotes com tamanho variável periodicamente, como por exemplo aplicações de vídeo MPEG. Fluxos rtPS requisitam banda através de *polling unicast* periódico e a QoS é garantida satisfazendo-se os requisitos de latência máxima e de banda mínima.

O serviço ertPS (*Extended Real-Time Polling Service*) é projetado para tráfego de tempo real com taxa variável, como por exemplo aplicações de voz sobre IP com supressão de silêncio. Este serviço usa um mecanismo de *grant* similar àquele utilizado pelas conexões UGS. Entretanto, os *grants* alocados periodicamente podem ser usados para enviar requisições de banda para informar a BS sobre a necessidade de um novo tamanho de *grant*. A BS não muda o tamanho dos *grants* até que receba uma requisição de banda da SS.

O serviço nrtPS (*Non-real-time Polling Service*) suporta tráfego não sensível ao retardo que requer *grants* de tamanho variável regularmente, tal como tráfego FTP. O serviço é similar àquele oferecido pelo rtPS, porém, oferece *polling unicast* com menor frequência e permite que a SS utilize os *slots* de contenção reservados para requisição de banda.

O serviço BE (*Best Effort*) suporta tráfego de melhor esforço sem quaisquer garantias de QoS. A SS pode utilizar tanto *slots unicast* quanto *slots* de contenção para requisitar largura de banda.

### 3. Módulo para simulação de redes WiMAX

O módulo para simulação de redes WiMAX foi desenvolvido na versão 2.28 do simulador ns-2 e segue as especificações do padrão IEEE 802.16 para a topologia PMP e o modo de acesso TDD [IEEE Std. 2004]. A implementação foi realizada na linguagem C++ utilizando programação orientada a objetos.

O módulo WiMAX baseou-se em um módulo [DOCSIS 2005] desenvolvido para o ns-2 para simulação do padrão DOCSIS [Cable Labs 2004], utilizado para transmissão de vídeo em redes cabeadas. A reutilização desse código foi possível pois a especificação da camada MAC do padrão IEEE 802.16 é baseada no padrão DOCSIS [Eklund *et alli* 2002]. Assim como no padrão IEEE 802.16, no padrão DOCSIS existe uma entidade central que controla o acesso ao meio fazendo a alocação de banda para as estações cliente. A alocação da banda baseia-se nas requisições enviadas pelas estações clientes e nos requisitos de QoS das conexões.

Embora a camada MAC de ambos os padrões seja semelhante, foram necessárias várias modificações no código do módulo DOCSIS para adequá-lo ao padrão IEEE 802.16. Dentre essas modificações destacam-se: a implementação do serviço nrtPS para o tráfego *uplink*, a implementação dos cinco tipos de serviço para o tráfego *downlink*, a alteração da interface entre a camada MAC e a camada física para que o módulo WiMAX utilizasse o meio sem fio disponível no ns-2, a implementação da divisão do tempo em *frames* e dos *frames* em *subframe downlink* e *subframe uplink* e a inclusão dos parâmetros de QoS latência máxima, para o serviço rtPS, e largura de banda mínima, para os serviços rtPS e nrtPS.

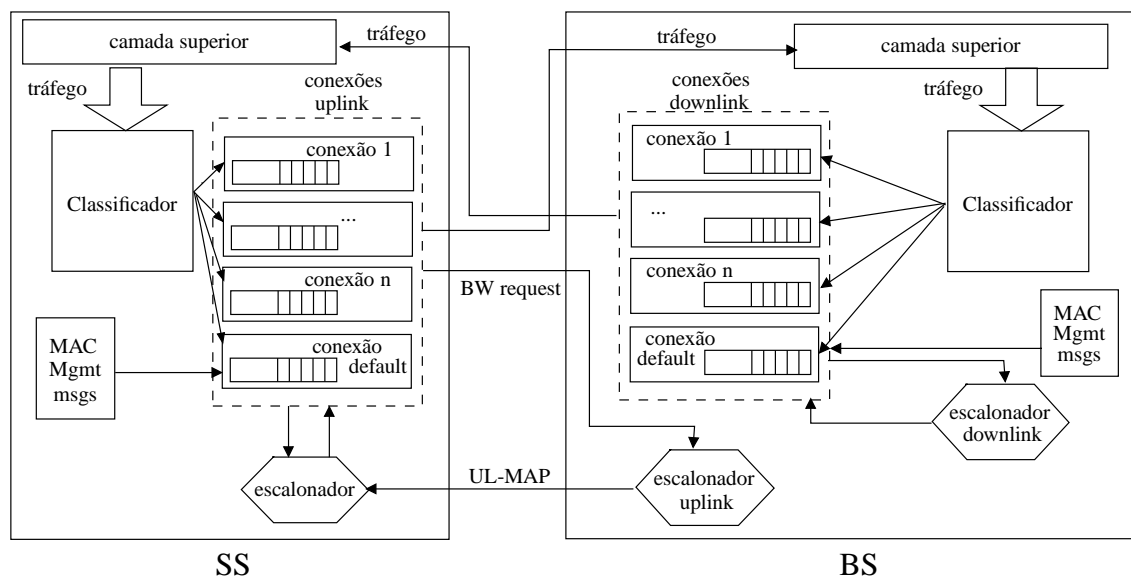


Figura 1. Estrutura do módulo para simulação do padrão IEEE 802.16

A Figura 1 apresenta a estrutura do módulo implementado. Tanto na BS quanto nas SSs o tráfego proveniente da camada superior é classificado para o fluxo de serviço apropriado (associado a uma conexão) a partir do tipo do tráfego e do par origem e destino. Os fluxos de serviço são configurados pelo usuário, que entre outras informações, determina os requisitos de QoS. Cada nó da rede deve ter uma conexão *default* para transmitir mensagens de gerenciamento e o tráfego que não puder ser mapeado para nenhuma

das outras conexões. No início da simulação todas as SSs se registram com a BS para o estabelecimento das conexões com seus respectivos parâmetros de QoS. A BS atribui um identificador único para cada conexão e armazena as informações em uma tabela, dentre elas: o tipo do serviço e seus parâmetros de QoS, se a conexão utiliza as funcionalidades de fragmentação, concatenação e *piggybacking*, e o identificador único.

A BS possui um escalonador *uplink* e um escalonador *downlink*. O escalonador *downlink* determina quais pacotes enviados pela camada superior serão transmitidos em cada *subframe downlink*. Para tomar essa decisão, o escalonador baseia-se nos requisitos de QoS e na situação da fila de cada conexão. O escalonador *uplink* decide quais SSs terão direito de transmitir em cada *subframe uplink* e quantos *slots* cada uma dessas SSs poderá utilizar. A decisão desse escalonador leva em consideração os requisitos de QoS das conexões *uplink*, bem como as requisições de banda recebidas.

Nas SSs existe um escalonador que decide quais pacotes provenientes da camada superior serão enviados nos *slots* recebidos. Para tomar essa decisão, o escalonador baseia-se nas informações trazidas pelo UL-MAP, nos requisitos de QoS e na situação das filas das conexões.

No padrão IEEE 802.16, no início de cada *subframe downlink*, a BS envia um mapa *downlink* (DL-MAP) e um mapa *uplink* (UL-MAP) para informar quais SSs receberão pacotes no *subframe downlink*, quais poderão transmitir no *subframe uplink* e o número de *slots* reservados para cada transmissão. No módulo implementado, o DL-MAP não é enviado, dado que as informações que ele conteria não são necessárias em um sistema de simulação<sup>1</sup>. No início do *subframe downlink*, porém, são reservados alguns *slots* para simular a sobrecarga do envio dessa mensagem. O UL-MAP é enviado e contém a descrição dos *slots* alocados no *subframe uplink* subsequente.

No padrão IEEE 802.16, os *frames* têm uma duração pré-definida, enquanto os *subframes uplink* e *downlink* podem ter tamanho variáveis dependendo da necessidade de cada um. O módulo de simulação permite que o usuário defina a duração dos *frames*. Dado esse valor, o módulo atribui durações iguais para cada um dos *subframes*. O ajuste dinâmico da duração dos *subframes* será implementado em um trabalho futuro.

Em um sistema real, a BS e as SSs trocam em torno de 50 tipos de mensagens de gerenciamento, como por exemplo mensagens de *ranging*, mensagens com informações sobre o canal, mensagens para garantir a segurança na rede, entre outras. A maioria dessas mensagens, em especial aquelas que envolvem informações sobre o canal, autenticação e segurança na rede, não é implementada por estarem fora do foco deste trabalho. Entretanto, mensagens de gerenciamento são geradas periodicamente para representar a sobrecarga necessária.

### 3.1. Requisição e alocação de largura de banda

Quando um pacote chega na camada MAC a partir das camadas superiores, ele é classificado para um fluxo de serviço (associado a uma conexão) baseado no endereço IP de origem e destino e no tipo do pacote (HTTP, FTP, CBR, etc.). A seguir, o cabeçalho

<sup>1</sup>Uma das funções da mensagem DL-MAP é informar para a SS em que período ela deve “escutar” o canal para detectar os pacotes enviados pela BS. No ns-2 as estações sem fio escutam o canal o tempo inteiro, portanto, o não envio desta mensagem não prejudica o recebimento dos pacotes do tráfego *downlink*.

MAC de 6 bytes é incluído no pacote<sup>2</sup>. Cada fluxo de serviço possui uma fila onde os pacotes são inseridos caso não haja um *grant* disponível. Os pacotes que chegam pelo canal são classificados como uma mensagem de gerenciamento ou de dados através das informações disponíveis no cabeçalho e manipulados adequadamente.

Cada fluxo de serviço possui quatro componentes principais:

- Classificador: o classificador usa os endereços de origem e destino e o tipo do pacote para classificar um pacote para um fluxo de serviço.
- Fila: todos os pacotes classificados para um fluxo de serviço são inseridos na fila caso não possam ser imediatamente enviados.
- Tabela de Alocação: mantém as informações sobre os *grants* alocados para o fluxo de serviço. Esta tabela é atualizada sempre que um UL-MAP é recebido.
- Máquina de estados finita (FSM - *Finite State Machine*): determina as ações de um fluxo de serviço de acordo com os eventos que ocorrem na rede. Sempre que um evento ocorre, dependendo do estado em que a máquina se encontra, a função apropriada é chamada para tratar o evento de entrada e a variável de estado é atualizada.

A definição das máquinas de estado para os serviços UGS, rtPS e BE no sentido *uplink* foram baseadas nas máquinas de estado propostas em [Shrivastav 2003]. A máquina de estados para o serviço nrtPS utiliza o mesmo modelo da máquina de estados do serviço BE, dado que ambos os serviços utilizam *polling unicast* e de contenção. A diferença está no fato de que a BS aloca *grants unicast* frequentemente para o serviço nrtPS, enquanto o serviço BE recebe *grants unicast* apenas quando há sobra de recursos. A máquina de estado para o serviço ertPS foi definida de forma a permitir o envio tanto de dados como de requisições de banda nos *grants* alocados periodicamente pela BS.

Assim como o serviço UGS no sentido *uplink*, os fluxos de serviço no sentido *downlink* não precisam enviar requisições, sua tarefa consiste em enviar os dados nos *grants* alocados pela BS. Portanto, todos os serviços no sentido *downlink* usam a mesma máquina de estados modelada para o serviço UGS no sentido *uplink*.

Note que a QoS fornecida para os diferentes tipos de serviço não depende do modelo da máquina de estados, mas dos mecanismos de controle de admissão e de escalonamento implementados na BS e nas SSs. As máquinas de estado determinam o envio de um pacote de dados ou de requisição de banda de acordo com as informações armazenadas na Tabela de Alocação.

Os mecanismos de escalonamento implementados no escalonador das SSs e no escalonador *downlink* da BS seguem a política *Strict Priority*, ou seja, a fila de um serviço de maior prioridade é sempre servida antes da fila de um serviço de menor prioridade. Políticas de escalonamento mais eficientes para esses dois escalonadores serão parte de um estudo futuro.

O escalonador *uplink* da BS utiliza três filas de prioridade de forma que uma fila de baixa prioridade só é atendida quando as filas de maior prioridade estiverem vazias. A fila de baixa prioridade armazena as requisições de banda do serviço BE. Na fila intermediária estão as requisições de banda dos serviços rtPS e nrtPS enviadas pelas

<sup>2</sup>O tamanho do cabeçalho está de acordo com o tamanho definido pelo padrão IEEE 802.16 para o cabeçalho MAC genérico.

SSs. Essas requisições podem migrar para a fila de alta prioridade no momento em que precisarem ser atendidas para garantir a provisão de QoS. Além das requisições migradas da fila intermediária, a fila de alta prioridade armazena os *grants* periódicos (para os serviços UGS e ertPS, e para *polling unicast*) que devem ser atendidos no próximo frame [Freitag e Fonseca 2007].

As subseções seguintes apresentam as máquinas de estados para os serviços UGS, rtPS, ertPS e BE no sentido *uplink*.

### 3.1.1. Serviço UGS

Para a máquina de estados do serviço UGS foram definidos os seguintes estados:

- *Idle*: não há nenhum pacote para transmitir.
- *Decision*: estado temporário no qual verifica-se a existência de *grants* na Tabela de Alocação.
- *Wait-For-Map*: um mapa com novas alocações é aguardado.
- *To-Send*: há uma transmissão de pacote pendente.

Adicionalmente, foram definidos os seguintes eventos:

- *Packet*: um pacote chegou na fila para ser enviado.
- *Map*: um mapa foi recebido.
- *SendTimer*: o *timer* (referenciado como *send\_timer* na descrição da máquina de estados) para envio de um pacote expirou.
- *SendPacket*: um pacote deve ser enviado.

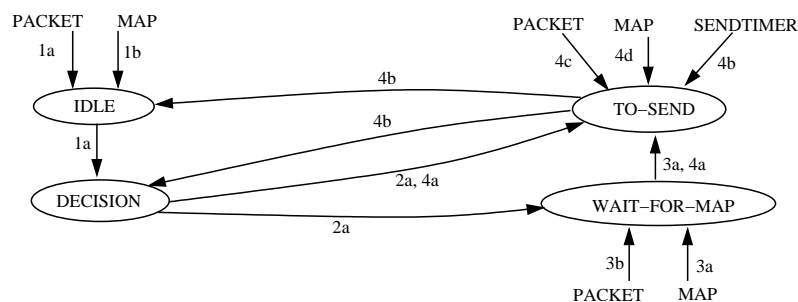


Figura 2. Máquina de estados para o serviço UGS [Shrivastav 2003].

A Figura 2 apresenta a máquina de estados finita para o serviço UGS. Quando o estado é *Idle* e um pacote chega (evento 1a), o cabeçalho MAC é adicionado ao pacote, o pacote é armazenado em uma variável chamada *current\_pkt* e a FSM entra no estado *Decision*. Quando um mapa chega (evento 1b), a Tabela de Alocação do fluxo é atualizada e o estado continua o mesmo.

No estado *Decision*, se não há *grant* para o fluxo de serviço na tabela de alocação, a FSM entra no estado *Wait-For-Map*; caso contrário, um evento *SendPacket* ocorre e há uma transição para o estado *To-Send*.

Quando um mapa chega com um *grant* para o fluxo no estado *Wait-For-Map*, a FSM entra no estado *To-Send* e um evento *SendPacket* ocorre. Se o mapa não contém

um *grant* para o fluxo, não há mudança de estado. Quando um pacote chega, o cabeçalho MAC é adicionado e o pacote é inserido na fila.

Quando o evento *SendPacket* ocorre no estado *To-Send*, o *send\_timer* é configurado para expirar no instante de início do *grant*. Quando o *timer* expira, o evento *SendTimer* é disparado e o pacote em *current\_packet* é transmitido. Se a fila está vazia, a FSM entra no estado *Idle*, caso contrário, um pacote é retirado da fila, armazenado na variável *current\_packet* e a FSM entra no estado *Decision* com o evento *Packet*.

Quando um pacote chega e a FSM está no estado *To-Send*, o cabeçalho MAC é adicionado e o pacote é inserido na fila. Quando um mapa chega, a Tabela de Alocação do fluxo é atualizada.

### 3.1.2. Serviço rtPS

Todos os estados e eventos definidos para a máquina de estados do serviço UGS têm o mesmo significado para a máquina de estados do serviço rtPS. Além disso, foram definidos o estado *To-Send-Request*, que indica que há um *grant unicast* para envio de requisição de banda na Tabela de Alocação, e os seguintes eventos:

- *ReqTimer*: o *timer* (referenciado como *req\_timer* na descrição da máquina de estados) para o envio da requisição expirou.
- *SendReq*: indica que uma requisição deve ser enviada.

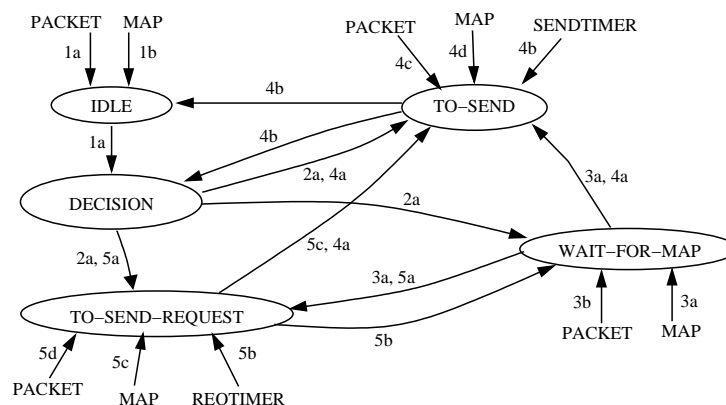


Figura 3. Máquina de estados para o serviço rtPS. [Shrivastav 2003]

A Figura 3 apresenta a máquina de estados finita para o serviço rtPS. Quando a FSM está no estado *Decision* e há um *grant unicast* para o fluxo na Tabela de Alocação, a FSM muda para o estado *To-Send-Request* e um evento *SendReq* ocorre.

Quando a FSM entra no estado *To-Send-Request* e um evento *SendReq* ocorre, o *req\_timer* é configurado para expirar no instante de início do *grant unicast*. Quando o *timer* expira, um evento *ReqTimer* é disparado, uma requisição de banda é enviada e a FSM entra no estado *Wait-For-Map*. Se, entretanto, um mapa chega trazendo um *grant* para envio de dados para o fluxo antes do *timer* expirar, o *timer* pára, a FSM faz uma transição para o estado *To-Send* e um evento *SendPacket* ocorre. Se um pacote chega antes do *timer* expirar, o cabeçalho MAC é adicionado e o pacote é inserido na fila.

Se a FSM está no estado *Wait-For-Map* e a SS recebe um mapa com um *grant* para envio de dados para o fluxo, então a FSM entra no estado *To-Send* e um evento *SendPacket* ocorre. Entretanto, se o *grant* for para envio de requisição de banda, a FSM entra no estado *Decision* e um evento *Packet* ocorre. Quando um pacote chega e a FSM está no estado *Wait-For-Map*, o cabeçalho MAC é inserido e o pacote é incluído na fila.

A máquina de estados proposta por Shrivastav [Shrivastav 2003] não permite fragmentação e concatenação de pacotes no serviço rtPS. No módulo WiMAX essa deficiência foi corrigida. Desse modo, no estado *To-Send* vários pacotes podem ser concatenados e transmitidos em um único *grant*, ou um pacote pode ser fragmentado de forma que possa ser transmitido em um *grant* de tamanho menor.

### 3.2. Serviço ertPS

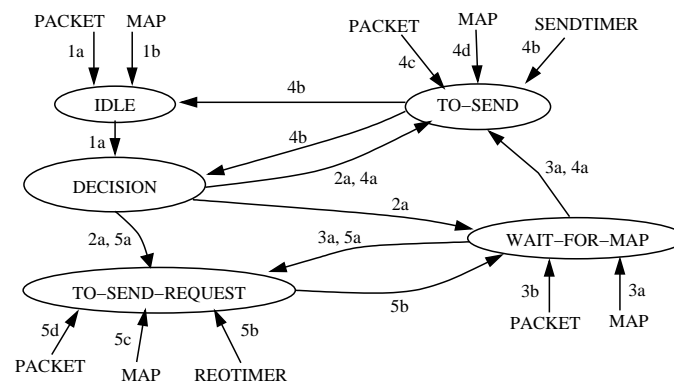


Figura 4. Máquina de estados para o serviço ertPS

A Figura 4 apresenta a máquina de estados finita definida para o serviço ertPS. Esta FSM tem os mesmos estados e eventos usados pela FSM do serviço rtPS, porém, as transições e as ações tomadas em alguns estados são diferentes.

Se a FSM está no estado *Decision* e a Tabela de Alocação do fluxo tem um *grant* com tamanho menor do que o tamanho do pacote em *current\_pkt*, a FSM entra no estado *To-Send-Request* e um evento *SendReq* ocorre. Entretanto, se o *grant* é maior ou igual ao tamanho do pacote, há uma transição para o estado *To-Send* e o evento *SendPacket* é disparado. A mesma ação é tomada quando um mapa chega e o estado é *Wait-For-Map*.

No estado *To-Send-Request*, o *grant* é utilizado para requisitar um novo tamanho de *grant* através do envio de uma requisição de banda para a BS. Depois de enviar a requisição de banda, a FSM entra no estado *Wait-For-Map*.

No estado *To-Send*, antes de enviar um pacote, a FSM compara o tamanho do pacote (incluindo os cabeçalhos) com o tamanho do *grant*. Se os tamanhos são iguais, o pacote é enviado. Entretanto, se o tamanho do *grant* é maior do que o tamanho do pacote, uma requisição de banda *piggyback* é enviada com o pacote de dados para informar a BS sobre o novo tamanho de pacote.

#### 3.2.1. Serviço Best-Effort

Além dos estados e eventos usados para os serviços UGS, rtPS e ertPS, foi definido o estado *Contention*, que implementa o algoritmo de *backoff*, o estado *Req-Sent*, que indica

que uma requisição de banda foi enviada, e os seguintes eventos:

- *Unicast-Req*: um *grant unicast* para o envio de banda foi alocado para o fluxo de serviço.
- *Contention-Req*: um *grant* de contenção foi disponibilizado para o fluxo de serviço.
- *Contention-On*: a fase de contenção deve iniciar.
- *Contention-Slots*: a fase de contenção já foi iniciada.
- *Contention-Bkoff*: a fase de *backoff* é necessária pois a requisição enviada no *grant* de contenção não foi enviada com sucesso.

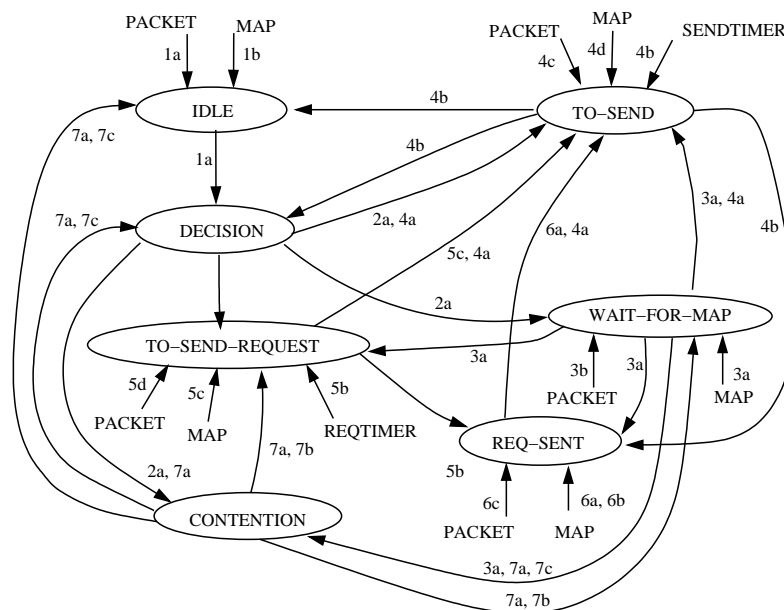


Figura 5. Máquina de estados para o serviço BE [Shrivastav 2003]

Quando a FSM entra no estado *Decision* com um evento *Packet*, a SS verifica se a Tabela de Alocação do fluxo tem algum *grant* disponível. Se há um *grant* para envio de dados, a FSM entra no estado *To-Send* e um evento *SendPacket* ocorre. Caso haja um *grant unicast* para envio de requisição de banda, há uma transição para o estado *To-Send-Request* e um evento *Unicast-Req* é disparado. Em ambas as situações, o processo de contenção é finalizado, caso esteja em andamento. Se há um *grant* de contenção para envio de requisição de banda e o processo de contenção não está em andamento, a FSM entra no estado *Contention* e um evento *Contention-On* ocorre. Se o processo de contenção já tiver iniciado, a FSM entra no estado *Contention* com o evento *Contention-Bkoff*.

Quando um mapa chega e a FSM está no estado *Wait-For-Map*, as ações tomadas são as mesmas descritas para o estado *Decision*, exceto quando o mapa traz um *grant* de contenção para o fluxo e o processo de contenção já tiver iniciado. Neste caso, a FSM entra no estado *Contention* e o evento *Contention-Slots* ocorre.

No estado *To-Send*, vários pacotes podem ser concatenados e transmitidos em um único *grant* ou um pacote pode ser fragmentado tal que possa ser enviado em um *grant* de tamanho menor. Se um *grant* de dados não é suficiente para enviar todos os pacotes armazenados na fila e não há mais *grants* de dados pendentes na Tabela de Alocação, o

fluxo de serviço envia uma requisição de banda *piggyback* e a FSM entra no estado *Req-Sent*. Se há pacotes na fila e a requisição *piggyback* não foi enviada, há uma transição para o estado *Decision* e um evento *Packet* ocorre. Se a fila está vazia, há uma transição para o estado *Idle*.

No estado *To-Send-Request*, o *req\_timer* está ativado. Quando o *timer* expira, uma requisição de banda *unicast* ou de contenção será enviada e a FSM entra no estado *Req-Sent*. Quando um mapa chega com um *grant* de dados para o fluxo de serviço no estado *Req-Sent*, o processo de contenção é finalizado, a FSM entra no estado *To-Send* e um evento *SendPacket* ocorre. Se o mapa não tem um *grant* de dados para o fluxo de serviço e o *timer* T16<sup>3</sup> expirou, a janela de contenção dobra de tamanho e a FSM entra no estado *Decision* com o evento *Packet*.

A transição para o estado *Contention* e a ocorrência do evento *Contention-On* acontece quando o serviço inicia o processo de contenção. Neste caso, um número aleatório  $r$  é selecionado dentro da janela de contenção. Se o número de *slots* alocados para contenção é maior do que  $r$ , o *req\_timer* é configurado para expirar no *slot* de contenção  $(r + 1)$  e a FSM entra no estado *To-Send-Request*. Caso contrário, uma variável chamada *skipped* recebe  $(r - \text{número de slots de contenção})$  e a FSM entra no estado *Wait-For-Map*.

A entrada no estado *Contention* e a ocorrência do evento *Contention-Slots* indica que o processo de contenção já foi iniciado e que um *grant* de contenção foi alocado para o fluxo de serviço. Se o número de *slots* alocados para contenção for maior do que o valor da variável *skipped*, o *req\_timer* é configurado para expirar no *slot* de contenção  $(\text{skipped} + 1)$  e a FSM entra no estado *To-Send-Request*. Caso contrário, *skipped* é atualizada para  $(\text{skipped} - \text{número de slots de contenção})$  e a FSM faz uma transição para o estado *Wait-For-Map*.

Se o evento *Contention-Bkoff* ocorre no estado *Contention* e o número máximo de reenvios da requisição de banda foi atingido, o pacote armazenado em *current\_packet* é descartado e o processo de contenção pára. Se a fila está vazia, a FSM entra no estado *Idle*; caso contrário, um pacote é retirado da fila e armazenado em *current\_packet*, a FSM faz uma transição para o estado *Decision* e um evento *Packet* ocorre. Se o número máximo de reenvios para requisição de banda não foi atingido, a FSM executa as mesmas ações definidas para o evento *Contention-On*.

#### 4. Validação

Os experimentos apresentados nesta seção têm como objetivo verificar se o modelo implementado está de acordo com as especificações do padrão IEEE 802.16 para topologias PMP que utilizam o modo de acesso TDD. Em particular, verifica-se se o módulo WiMAX implementa a divisão do tempo em *frames* e dos *frames* em *subframe downlink* e *subframe uplink* e se a alocação de *grants* para a transmissão de requisição de banda e de dados para os cinco tipos de serviço segue as regras do padrão. Os cinco tipos de serviço foram validados tanto no sentido *uplink* como no sentido *downlink*.

<sup>3</sup>T16 é um *timer* definido no padrão IEEE 802.16 [IEEE Std. 2004]. Quando uma SS envia uma requisição através de um *grant* de contenção e nenhum *grant* de dados é recebido dentro do intervalo T16, a SS considera que a transmissão foi perdida.

O cenário de simulação consiste em uma BS com as SSs uniformemente distribuídas ao redor dela. A duração do frame é de 1 ms e a capacidade do canal é de 40 Mbps, assumindo uma divisão TDD 1:1 para *downlink* e *uplink*. O módulo usa o canal sem fio fornecido pelo simulador ns-2 que implementa a técnica de espalhamento espectral por sequência direta (DSSS - *Direct-Sequence Spread-Spectrum*). Os cenários não foram escolhidos com intenção de simular redes operacionais. O objetivo é analisar o funcionamento dos mecanismos de acesso ao meio e de requisição e alocação de *slots* em diferentes situações de carga na rede, ou seja, tanto em situações de pouca carga oferecida como em situações de sobrecarga na rede. Para tal, foram utilizadas fontes CBR para simular o tráfego dos quatro tipos de serviço. Modelos de tráfego determinísticos são importantes na etapa de verificação da implementação pois facilitam a análise dos resultados [Jain 1991]. Modelos de tráfego mais realistas devem ser considerados na análise dos mecanismos de provisão de QoS, tais como mecanismos de escalonamento e de controle de admissão, e são utilizados em outra parte deste estudo [Freitag e Fonseca 2007].

#### 4.1. Frames

Para validar a implementação da divisão do tempo em frames, simulou-se um cenário com três estações sem fio conectadas a uma estação base. A Figura 6 apresenta o envio das mensagens UL-MAP para as estações sem fio. Nota-se que a cada 1 ms um novo UL-MAP é enviado. Cada UL-MAP é enviado no início de um novo *frame* o que indica que os frames são gerados corretamente.

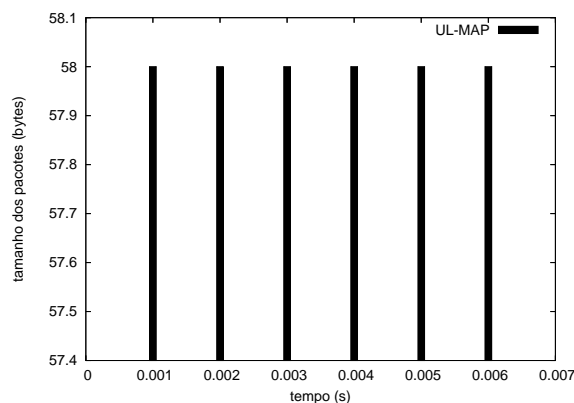


Figura 6. Divisão do tempo em frames

Para verificar a divisão dos frames em *subframe downlink* e *subframe uplink* simulou-se um cenário com uma estação base e duas estações sem fio. Dois fluxos CBR com taxa de 5 Mbps geram o tráfego na rede, um no sentido *downlink* e outro no sentido *uplink*. Ambos os fluxos pertencem ao serviço BE. O tamanho do *frame* foi configurado em 1 ms, portanto, cada subframe tem duração de 0,5 ms.

A Figura 7 mostra o tráfego enviado em um intervalo da simulação. O tráfego inclui os pacotes de dados, as mensagens UL-MAP e as mensagens de requisição de banda. Nota-se que a divisão dos *frames* se dá de maneira correta, dado que a primeira transmissão é sempre no sentido *downlink*, enquanto que a transmissão *uplink* inicia na segunda metade do *frame*.

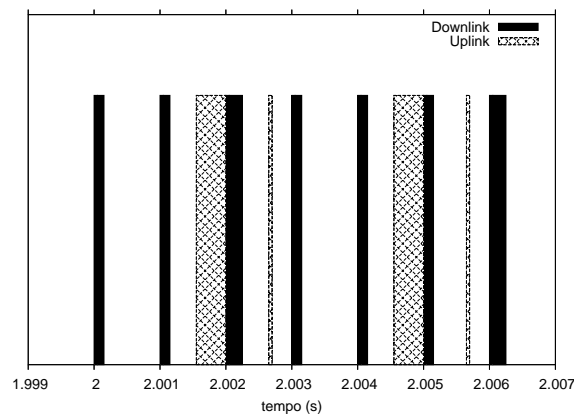


Figura 7. Divisão dos frames em subframe *downlink* e *uplink*

Estes resultados evidenciam que o controle de acesso ao meio implementado no módulo WiMAX está de acordo com as especificações do padrão IEEE 802.16 para o modo de acesso TDD. Nota-se que a BS é capaz de coordenar as transmissões nos sentidos *downlink* e *uplink*, para que elas aconteçam de maneira sucessiva respeitando os limites de duração dos *subframes* e do *frame*.

#### 4.2. Serviço UGS

Assim como no padrão IEEE 802.16, ao configurar uma conexão do tipo UGS no módulo WiMAX, deve-se informar o intervalo entre *grants* desejado. Para verificar se as conexões UGS no sentido *uplink* recebem *grants* periódicos para o envio de dados, fez-se um experimento de simulação com um cenário consistindo em uma estação base e duas estações sem fio. Uma das estações sem fio possui um fluxo UGS que inicia a transmissão dos pacotes no instante 0,5 s. O tráfego é gerado por uma fonte CBR com taxa de 500 Kbps e o intervalo entre os *grants* fornecidos pela estação base é de 15 ms. A segunda estação sem fio possui um fluxo BE que inicia a transmissão no instante 1 s. O tráfego é gerado por uma fonte CBR com taxa de 2 Mbps.

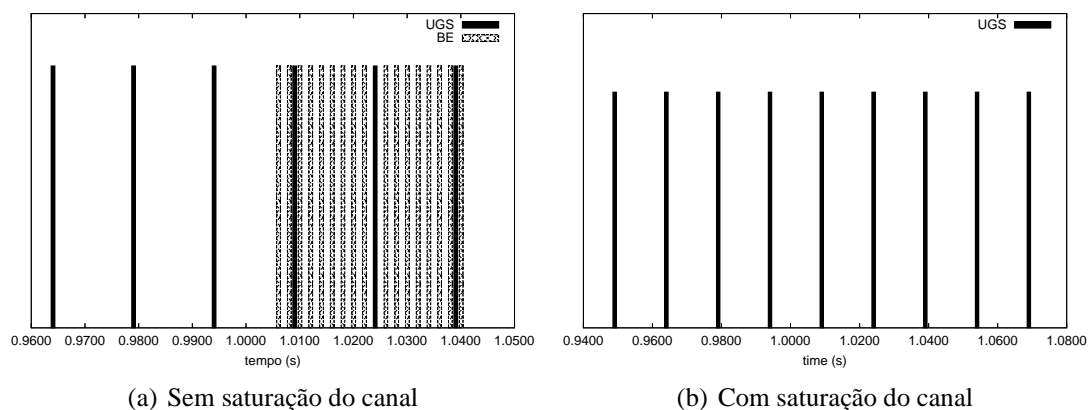


Figura 8. Validação do serviço UGS no sentido *uplink*

A Figura 8(a) mostra o envio de pacotes de dados em um intervalo do tempo de simulação. Nota-se que mesmo com a entrada de um tráfego de melhor esforço na rede, a estação com serviço UGS obteve os *grants* no intervalo esperado.

A alocação de *grants* para o serviço UGS também foi avaliada em um cenário onde o canal é saturado por 10 fluxos BE, cada um gerando um tráfego CBR com taxa de 2 Mbps. Para facilitar a visualização, a Figura 8(b) apresenta apenas os pacotes enviados pela conexão UGS em um intervalo de tempo de simulação. Pode-se notar, novamente, que a entrada de fluxos de melhor esforço não prejudica a alocação de recursos para o serviço UGS.

Para validar o serviço UGS no sentido *downlink* simulou-se uma rede com uma estação base e duas estações sem fio. A estação base possui dois fluxos *downlink*, um para cada uma das estações sem fio. Um dos fluxos é do tipo UGS e inicia a transmissão dos pacotes no instante 0,5 s. O tráfego é gerado por uma fonte CBR com taxa de 500Kbps e o intervalo entre os *grants* fornecidos pela estação base é de 15 ms. O segundo fluxo é do tipo BE e inicia a transmissão dos pacotes no instante 1 s. Os pacotes são gerados por uma fonte CBR com taxa de 2 Mbps.

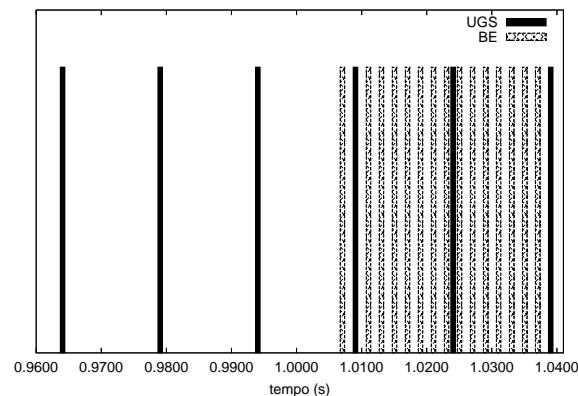


Figura 9. Validação do serviço UGS no sentido *downlink*

A Figura 9 mostra o envio de pacotes de dados em um intervalo do tempo de simulação. Nota-se que mesmo com a entrada de um fluxo de melhor esforço na rede, o fluxo UGS obteve os *grants* no intervalo esperado.

#### 4.3. Serviço rtPS

O cenário de simulação utilizado para verificar a alocação de recursos para o serviço rtPS no sentido *uplink* consiste em uma estação base e uma estação sem fio. A estação sem fio possui um fluxo *uplink* do tipo rtPS com pacotes gerados por uma fonte CBR com taxa de 1 Mbps. A estação base fornece *grants* periódicos para o envio de requisição de banda a cada 15 ms. O valor deste intervalo deve ser definido pelo usuário no *script* de configuração da rede.

A Figura 10 ilustra o envio de pacotes de requisição de largura de banda e de pacotes de dados em um intervalo da simulação. Nota-se que os *grants* para envio de requisição são recebidos no intervalo esperado e, após cada requisição, a estação recebe *grants* para o envio dos dados.

Dado que para conexões *downlink* que pertencem ao serviço rtPS não é necessário fornecer *grants* periódicos para o envio de requisição de banda, o teste para este tipo de serviço no sentido *downlink* verifica se um fluxo rtPS recebe *grants* para o envio de dados e se consegue ter prioridade sobre um fluxo BE.

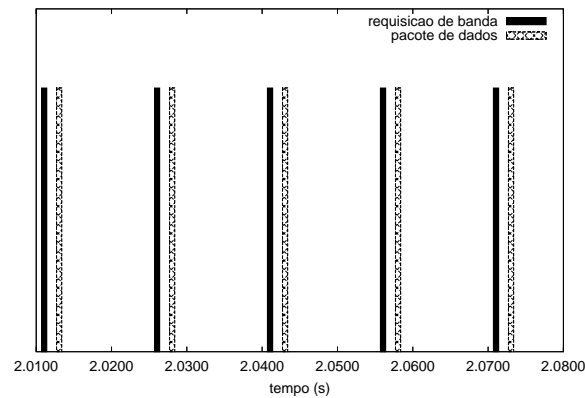


Figura 10. Validação do serviço rtPS no sentido *uplink*.

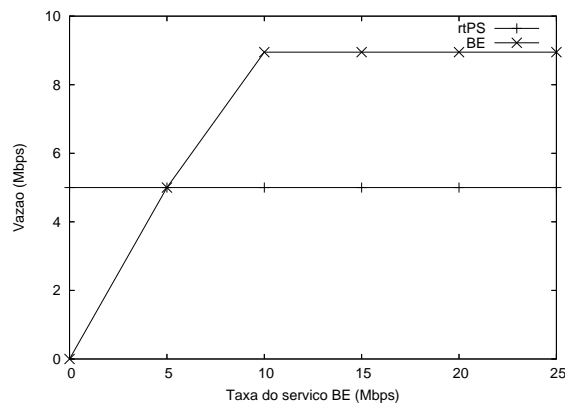


Figura 11. Validação do serviço rtPS no sentido *downlink*.

O cenário de simulação consiste em uma estação base e duas estações sem fio. A estação base possui dois fluxos *downlink*, um para cada estação sem fio. Um dos fluxos é do tipo rtPS com pacotes gerados por uma fonte CBR com taxa de 5 Mbps. O segundo fluxo é da classe BE com pacotes gerados por uma fonte CBR. Para verificar a influência do tráfego de melhor esforço sobre o tráfego de tempo real, a taxa da fonte varia de 0 a 25 Mbps.

A Figura 11 ilustra a vazão de ambos os fluxos. Nota-se que o aumento na carga oferecida pelo fluxo de melhor esforço não interfere no serviço oferecido ao fluxo rtPS, que obteve vazão igual a taxa de dados gerada pela fonte em todas as situações.

#### 4.4. Serviço ertPS

O cenário de simulação para testar o serviço ertPS consiste em uma estação base e uma estação sem fio. A estação sem fio tem uma conexão ertPS no sentido *uplink* que gera os pacotes em intervalos constantes de 20 ms. Para avaliar o mecanismo de alocação de banda variou-se o tamanho dos pacotes. No início os pacotes têm tamanho de 200 bytes. No instante 5 s, o tamanho dos pacotes muda para 500 bytes e no instante 5,2 s ele é reduzido para o valor inicial. O intervalo entre *grants* foi configurado em 20 ms.

A Figura 12 apresenta o tamanho dos *grants* alocados para a conexão ertPS durante um período da simulação. No início da simulação, quando o tamanho do pacote

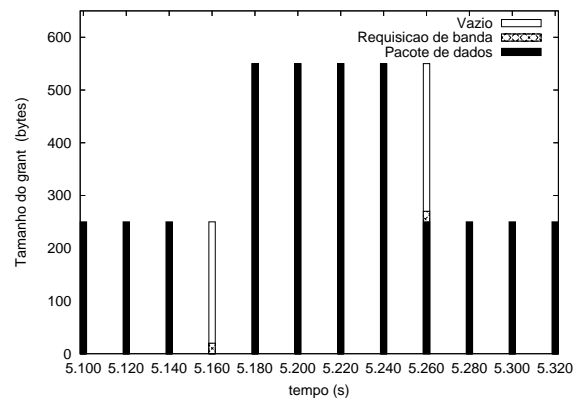


Figura 12. Validação do serviço ertPS no sentido *uplink*.

é 200 bytes, a BS aloca um *grant* de 270 bytes para a transmissão dos dados e dos cabeçalhos. Quando o tamanho do pacote aumenta para 500 bytes, a conexão ertPS envia uma requisição de banda no instante 5.16 e a BS aloca um *grant* de 570 bytes. No intervalo [5,18, 5,24], a conexão envia pacotes com tamanho de 500 bytes. No instante 5,26, a conexão envia um pacote de 200 bytes com uma requisição de banda *piggyback* para solicitar a redução do tamanho do *grant*. Embora os *grants* tenham sido alocados periodicamente em intervalos de 20 ms, há um retardo na transmissão do primeiro pacote de 500 bytes. Isso acontece porque a aplicação CBR na SS e o escalonador na BS não estão sincronizados.

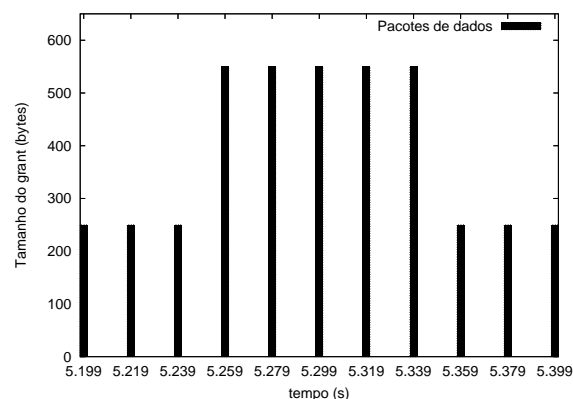


Figura 13. Validação do serviço ertPS no sentido *downlink*.

O mesmo cenário foi utilizado para validar o serviço ertPS no sentido *downlink*. A Figura 13 apresenta o mesmo comportamento verificado na Figura 12, exceto pelo fato de que as requisições de banda não são necessárias neste caso. Esses resultados mostram que o serviço ertPS foi implementado de acordo com as especificações do padrão IEEE 802.16.

#### 4.5. Serviço nrtPS

O experimento realizado para verificar a alocação de recursos para o serviço nrtPS no sentido *uplink* utiliza um cenário que consiste em uma BS e 11 SSs. Uma das SSs possui um fluxo de serviço do tipo nrtPS com pacotes gerados por uma aplicação CBR a uma

taxa de 1 Mbps. O fluxo recebe *grants unicast* para envio de requisição a cada 15 ms. Este intervalo deve ser definido pelo usuário no *script* de configuração da rede. As outras 10 SSs têm um fluxo de serviço do tipo BE com pacotes gerados por uma aplicação CBR com taxa de 2 Mbps.

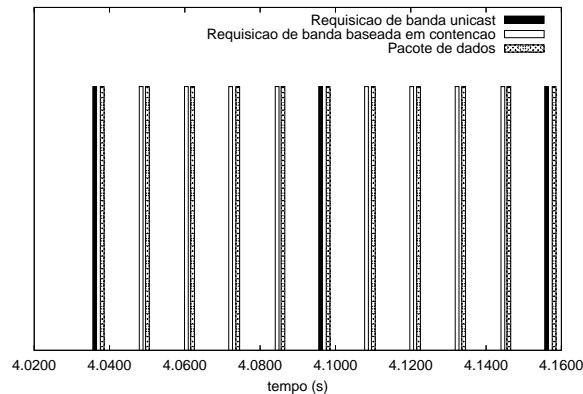


Figura 14. Validação do serviço nrtPS no sentido *uplink*.

A Figura 14 mostra os pacotes de requisição e de dados enviados pelo fluxo nrtPS em um intervalo da simulação. Nota-se que mesmo com uma alta carga na rede, o fluxo nrtPS consegue enviar requisições através de *grants unicast* e de contenção, bem como pacotes de dados. Alguns *grants unicast* não foram utilizados dado que no instante em que foram alocados a fila do fluxo de serviço estava vazia.

Para validar o serviço nrtPS no sentido *downlink* utilizou-se um cenário com 1 BS e 2 SSs. Uma das SSs possui uma conexão nrtPS no sentido *downlink* com tráfego CBR sendo gerado a uma taxa de 5 Mbps. A outra SS possui uma conexão BE no sentido *downlink* com tráfego CBR cuja taxa varia de 0 a 25 Mbps.

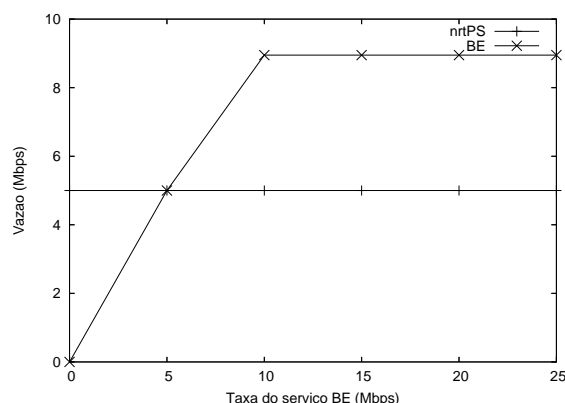


Figura 15. Validação do serviço ertPS no sentido *downlink*.

A Figura 15 ilustra a vazão de ambos os tipos de serviço. Pode-se observar que a alocação de recursos para o serviço nrtPS no sentido *downlink* satisfaz as necessidades do fluxo mesmo quando a rede é sobrecarregada por um fluxo de melhor esforço.

#### 4.6. Serviço BE

O experimento realizado para validar o serviço BE no sentido *uplink* verifica se um fluxo BE consegue enviar pacotes de requisição de banda e pacotes de dados na presença de fluxos de maior prioridade. O cenário consiste em cinco estações sem fio conectadas a uma estação base. Duas estações sem fio possuem serviço UGS, duas possuem serviço rtPS e uma possui serviço BE. O tráfego é gerado por aplicações CBR com taxa de 2 Mbps para os serviços UGS e rtPS e taxa de 1 Mbps para o serviço BE.

A Figura 16 apresenta os pacotes de requisição de largura de banda e os pacotes de dados enviados pela estação com serviço BE em um intervalo da simulação. Nota-se que mesmo na presença de tráfego de maior prioridade o serviço BE recebe *grants* para o envio de requisição de banda e para o envio de dados.

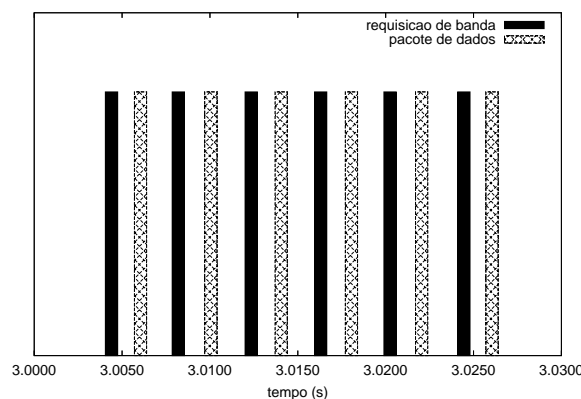


Figura 16. Validação do serviço BE

A partir dos testes realizados com os outros tipos de serviço no sentido *downlink* é possível notar que o serviço de melhor esforço no sentido *downlink* obtém oportunidades de transmissão mesmo na presença de tráfego de maior prioridade.

#### 5. Conclusões

Este artigo apresenta a implementação e validação de um módulo para simulação de redes WiMAX. O módulo é implementado na ferramenta ns-2 e atende as especificações do padrão IEEE 802.16 para redes com topologia PMP e modo de acesso ao meio TDD. O módulo WiMAX inclui as funcionalidades de requisição e alocação de banda e provisão de QoS. Adicionalmente, permite que os usuários configurem requisitos de QoS para aplicações com diferentes demandas.

Experimentos foram projetados para avaliar a implementação das principais funcionalidades da camada de acesso ao meio do padrão IEEE 802.16. Os resultados indicam que a BS é capaz de gerenciar o acesso ao meio nos sentidos *downlink* e *uplink*, bem como fazer a alocação de *grants* para envio de requisição de banda e de dados conforme as regras estabelecidas para cada um dos quatro níveis de serviço. Além disso, é possível concluir que as SSs são capazes de enviar requisição de banda e pacotes de dados de acordo com a alocação de *grants* informada pela BS através da mensagem UL-MAP.

O módulo implementado pode ser empregado em diversos estudos sobre redes IEEE 802.16, em especial estudos sobre alocação de banda e provisão de QoS, inclusive

facilitando a inclusão de novas funcionalidades e mecanismos, dada a estrutura modularizada do código.

Trabalhos futuros irão focar a implementação da camada física OFDM especificada no padrão IEEE 802.16, de um mecanismo de controle de admissão e de escalonadores mais eficientes para as SSs e para o tráfego *downlink* na BS. Será ainda investigada a influência das variações do canal na provisão de QoS o que poderá resultar em modificações no escalonador *uplink* implementado na BS.

## Referências

- IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems* (2004). IEEE Std., Rev. IEEE Std802.16-2004.
- DOCSIS Research Project*. (2005) <http://www.cs.clemson.edu/~jmarty/docsis.html>.
- Cable Television Labs Inc. (2004). *Data Over Cable Service Interface Specifications - Radio Frequency Interface Specification*. SP-RFv2.0.
- Chen, J., Jiao, W., Wang, H. (2005). *A Service Flow Management Strategy for IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Systems in TDD Mode*. In Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, pg. 3422-3426.
- Chen, J. et alli (2006). *Design and Implementation of WiMAX Module for ns-2 Simulator*. Proceeding from the 2006 workshop on ns-2: the IP network, artigo nº 5.
- Eklund, C. et alli (2002). *IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the Wireless-MAN Air Interface for Broadband Wireless Access*. IEEE Communications Magazine, vol. 40, no. 6, pg. 98-107.
- Freitag, J. e Fonseca, N. L. S. (2007). *Escalonamento com Qualidade de Serviço em redes IEEE 802.16*. Anais do 25º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos.
- Shrivastav, N. (2003). *A network simulator model of the DOCSIS protocol and a solution to the bandwidth-hog problem in the cable networks*. Dissertação de Mestrado. North Carolina State University, EUA.
- OPNET*. <http://www.opnet.com>.
- The Network Simulator - ns-2* (2002). <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- Jain, R. (1991). *The Art of Computer Systems Performance Analysis*. John Wiley & Sons.
- Rouil, R. (2007) *The Network Simulator ns-2 NIST add-on - IEEE 802.16 model (MAC+PHY)*. Disponível em <http://www.antd.nist.gov/seamlessandsecure>.
- Sun, J., Yau, Y. e Zhu, H. (2006). *Quality of Service Scheduling for 802.16 Broadband Wireless Access Systems*. In Proceedings of the IEEE 63rd Vehicular Technology Conference, pg. 1221-1225.
- Wongthavarawat, K. e Ganz, A. (2003). *IEEE 802.16 based last mile broadband wireless military networks with Quality of Service support*. In Proceedings of the IEEE MILCOM'03, pg. 779-784.