

Uma Proposta de Algoritmo de Escalonamento Baseado na Disciplina *Priority Queuing* (PQ) para Redes IEEE 802.16

Flávio Alves Ferreira, Paulo Roberto Guardieiro
Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica, Uberlândia – MG
flavio_eletronica@yahoo.com.br, prguardieiro@ufu.br

Resumo – Nos dias atuais, a rede de acesso banda larga sem fio (BWA – *Broadband Wireless Access*) definida pelo padrão IEEE 802.16, se tornou uma alternativa bastante atrativa pelo fato de oferecer serviços multimídia com qualidade de serviço (QoS – *Quality of Service*) com custo benefício adequado, dentro de uma região de abrangência metropolitana, e capaz de atingir altas taxas de transmissão de dados. O padrão expõe a necessidade estrutural de uma arquitetura de QoS composta por mecanismos como o escalonador, mas não define qual a política a ser utilizada. Neste trabalho é proposto um mecanismo de escalonamento baseado na disciplina de escalonamento PQ, a fim de fornecer um melhor desempenho dos parâmetros de QoS para os serviços da rede. O algoritmo de escalonamento proposto reserva os recursos restantes no *uplink* diretamente para a transmissão dos dados das aplicações, após o escalonador PQ servir todas as suas filas. Os resultados apresentados, obtidos a partir de modelagem e simulação, comprovam a eficiência do algoritmo proposto.

Palavras-Chave – Escalonamento, PQ, QoS, IEEE 802.16, BWA.

Abstract – Nowadays, the broadband wireless access network (BWA) defined by the IEEE 802.16 standard, has become a very attractive alternative because of offering multimedia services with Quality of Service (QoS) with appropriate cost-effective, within a metropolitan area of coverage, and capable of reaching high transmission data rates. The standard sets out the structural need for an architecture composed of QoS mechanisms such as the scheduler, but does not specify the policy to be used. This paper proposes a scheduling mechanism based on PQ scheduling discipline in order to provide better performance of the QoS parameters for network services. The proposed scheduling algorithm pre-allocates the remaining resources in the *uplink* directly to the data transmission of the applications, after the PQ scheduler serves all of your queues. The presented results obtained from modeling and simulation, demonstrated the efficacy of the algorithm.

Keywords – Scheduling, PQ, QoS, IEEE 802.16, BWA.

I. INTRODUÇÃO

O padrão IEEE 802.16, comercialmente conhecido por WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), define uma rede BWA para cobertura de regiões metropolitanas com oferta de taxas de transmissão de dados superiores àquelas oferecida por outras redes de acesso, como por exemplo, as redes ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) e *Cable Modem*. Além de ser uma alternativa de rede de

acesso, as redes WiMAX podem interligar redes locais remotamente localizadas (*backbone*).

O padrão IEEE 802.16 possui um atrativo fundamental para as redes multimídia atuais, a presença inerente de mecanismos de QoS capazes de oferecer tratamento diferenciado para os diversos tipos de tráfegos. O principal mecanismo de QoS de sua arquitetura é o escalonador, o qual não é definido pelo padrão e, portanto, seu algoritmo deve ser desenvolvido por pesquisadores e fabricantes de equipamentos.

Neste trabalho, propõe-se um mecanismo de escalonamento baseado na disciplina PQ, o qual foi avaliado por meio de modelagem e simulação. A análise de seu desempenho foi efetuada em relação aos parâmetros de QoS como, por exemplo, a vazão, o atraso e a utilização percentual de recursos.

Este trabalho apresenta a seguinte estrutura: na Seção II são apresentadas algumas características importantes definidas pelo padrão IEEE 802.16. Na Seção III são apresentadas as subcamadas da camada MAC do padrão IEEE 802.16. Na Seção IV são descritas algumas disciplinas de escalonamento cujos algoritmos podem ser empregados nos mecanismos de escalonamento das redes WiMAX. Na Seção V é apresentado o escalonador proposto. Na Seção VI é realizada a avaliação de desempenho do escalonador proposto. Finalmente, na Seção VII, são apresentadas as conclusões a respeito da proposta.

II. CARACTERÍSTICAS DO PADRÃO IEEE 802.16

A provisão do acesso à última milha depende da topologia de rede utilizada. Por exemplo, na topologia PMP (*Point to Multipoint*), as estações de assinantes (SS - *Subscriber Station*) não se comunicam diretamente, pois dependem do gerenciamento e controle efetuado pela estação base (BS - *Base Station*). Na topologia em malha (*mesh*) todas as SSs podem se comunicar entre si sem a intervenção de um elemento central de controle e gerenciamento.

O padrão IEEE 802.16 define duas camadas: a camada física (PHY) e a camada de controle de acesso ao meio (MAC) [1].

Para garantir a interoperabilidade, foram definidas diferentes interfaces aéreas para camada física: *WirelessMAN-SC*, *WirelessMAN-OFDM*, *WirelessMAN-OFDMA* e *WirelessHUMAN*; e as frequências de operação sem linha de visada (NLOS – *Non Line of Sight*) entre 2 e 11GHz e com linha de visada (LOS) entre 10 e 66GHz [1].

A operação da camada física é baseada em quadros (*frames*), que são divididos em *downlink subframe* e *uplink subframe*. Durante o primeiro, que é subdividido em *slots* físicos ou PS (*Physical Slots*), somente a BS transmite pacotes via *broadcast* para todas as SSs e, durante o segundo, as SSs compartilham o meio transmitindo pacotes para a BS nos chamados *mini-slots* (conjunto de PSs) concedidos.

Dois métodos de duplexação podem ser utilizados nas redes WiMAX: TDD (*Time Division Duplexing*) e FDD (*Frequency Division Duplexing*). No método TDD, ambos *subframes* compartilham a mesma frequência de portadora e dividem o quadro no tempo, no método FDD é possível executar transmissões simultâneas nos dois sentidos, da BS para as SSs (*downlink*) e das SSs para a BS (*uplink*), pois cada *subframe* utiliza uma frequência própria de portadora.

A camada MAC é orientada à conexão, o que significa que para uma SS poder transmitir seus dados, é preciso antes trocar mensagens de sinalização para estabelecer um fluxo de serviço com a BS. Então, o protocolo da camada MAC efetua a associação individual de um identificador de conexão (CID – *Connection IDentifier*) com um identificador de fluxo de serviço (SFID – *Service Flow IDentifier*) [1] [2] [3].

Os principais mecanismos que compõem a arquitetura de QoS das redes WiMAX são implementados na camada MAC. A QoS é oferecida de maneira diferenciada de acordo com o tipo de aplicação, cujos fluxos de serviço com parâmetros comuns são mapeados para uma determinada classe. O padrão IEEE 802.16d define quatro classes de serviços:

1) UGS (*Unsolicited Grant Service*): suporta aplicações em tempo real como a emulação de circuito E1/T1, que define um fluxo com pacotes de tamanho fixo gerados periodicamente. Nunca utiliza oportunidades periódicas de requisição de banda.

2) rTPS (*Real Time Polling Service*): suporta aplicações em tempo real para pacotes de tamanhos variáveis gerados periodicamente, como *streaming* de áudio e vídeo (MPEG). Solicita largura de banda respondendo às consultas *unicast* periodicamente efetuadas pela BS.

3) nrtPS (*Non Real Time Polling Service*): suporta aplicações para tráfego armazenado tolerante ao atraso, como aplicações de transferência de arquivos e *e-mail*, com pacotes de tamanhos variáveis, com requisição de banda periódica do tipo *unicast* e também baseada em contenção.

4) BE (*Best Effort*): Suporta o tráfego de melhor esforço, com taxa variável e com os requisitos mínimos de QoS, como por exemplo, o tráfego gerado por aplicações *web browsing*. Pode utilizar qualquer mecanismo de requisição de banda.

Para atender à demanda das SSs no *uplink*, o padrão IEEE 802.16 especifica um processo de requisição e concessão (*grants*) que consiste em definir e reservar a quantidade adequada de *slots* (*bytes*) para cada conexão transmitir seus dados. O processo de requisição de banda depende do tipo de consulta (*polling*) efetuada pela BS, que pode ser:

1) *Polling Unicast*: a BS consulta cada SS de maneira exclusiva, para que a SS possa enviar sua mensagem de requisição (*BW_Request*). Sua desvantagem é que caso uma SS não tenha dados para serem transmitidos (*backlog*), não responderá a consulta acarretando em desperdício de banda [4];

2) *Polling Baseado em Contenção*: quando a BS não dispõe de recursos suficientes para consultar todas as SSs individualmente, efetua uma consulta via conexão *multicast* ou *broadcast*, disponibilizando uma largura de banda onde várias SSs disputam a oportunidade de enviar a sua requisição. Para evitar colisões é utilizado o algoritmo *truncated binary exponential backoff*.

III. A CAMADA MAC DO PADRÃO IEEE 802.16

A camada MAC do padrão IEEE 802.16 é dividida em três subcamadas: CS, CPS e *Security Sublayer* [1], que são apresentadas na Fig. 1.

A *Security Sublayer* ou Subcamada de Segurança provê autenticação, a troca de chave de segurança, e criptografia.

A subcamada CS (*Service-Specific Convergence Sublayer*) ou Subcamada de Convergência Específica, pelo fato de fazer fronteira diretamente com a camada superior, efetua a transformação ou mapeamento de dados da rede externa para MAC PDUs (*MAC Protocol Data Units*). Os dados provenientes das camadas superiores podem ser baseados em tecnologias de células ATM ou de pacotes Ethernet, PPP, etc. Além disso, a CPS é responsável por executar a função PHS (*Payload Header Suppression*), que remove as partes repetidas do cabeçalho dos pacotes no emissor para transmiti-los, e depois recuperá-las no receptor, aumentando a eficiência de transmissão em função da redução do *overhead*.

A CPS (*Common Part Sublayer*) ou Subcamada de Parte Comum é responsável pelo acesso ao sistema, pelo estabelecimento e manutenção das conexões, pela construção da MAC PDU, pelo ajuste adaptativo das técnicas de transmissão, pela multiplexação dos fluxos de tráfego em conexões e pela provisão de QoS através de mecanismos como o controle de admissão (CAC), o escalonador, etc.

O escalonador é o principal mecanismo da arquitetura de QoS da camada MAC definida pelo padrão IEEE 802.16. Existem três escalonadores: o escalonador da BS de *downlink* (BS-DL), o escalonador da SS de *uplink* (SS-UL) e o escalonador da BS de *uplink* (BS-UL). A tarefa dos escalonadores BS-DL e SS-UL é mais simples do que a tarefa do escalonador BS-UL porque os primeiros tem acesso direto às filas de escalonamento, já o último depende das mensagens de requisição de largura de banda (*BW_Request*) para ter conhecimento da situação das filas nas SSs e efetuar a alocação de largura de banda solicitada pelas conexões.

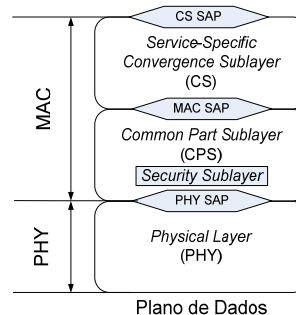


Fig. 1. Camadas definidas pelo padrão IEEE 802.16 [1].

A operação dos mecanismos de requisição e alocação de largura de banda (escalonador BS-UL) é executada basicamente de acordo com os seguintes passos (Fig. 2):

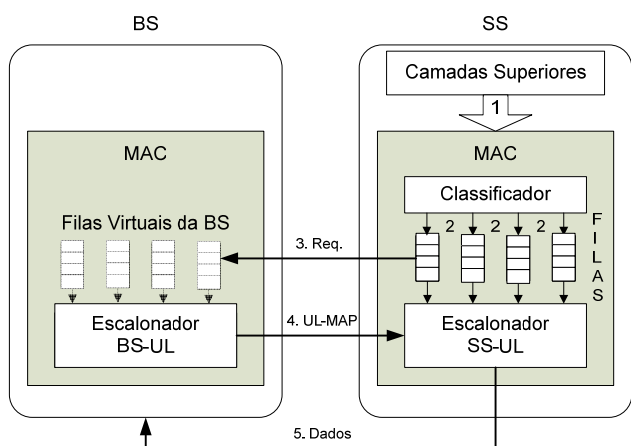


Fig. 2. Estratégia de escalonamento BS-UL.

1) Os pacotes gerados na camada de aplicação da SS são movidos para a camada MAC, onde são classificados de acordo com o tipo de fluxo na subcamada CS.

2) Após serem classificados, os pacotes são direcionados para a sua respectiva fila na subcamada CPS, onde deverão aguardar uma oportunidade para transmissão.

3) A SS faz a requisição de largura de banda à BS através das mensagens *BW_Request*, que devem indicar, de acordo com o tamanho da fila de cada conexão, a quantidade de *bytes* a serem transmitidos no *uplink subframe*.

4) A alocação de largura de banda é baseada no tamanho das filas virtuais da BS. O mecanismo de alocação de banda processa a requisição de acordo com seu algoritmo de escalonamento, e monta a mensagem UL-MAP, indicando a disposição dos *mini-slots* que cada SS pode utilizar no *uplink*.

5) Assim que recebida a mensagem UL-MAP, que foi transmitida para todas as SSs via *broadcast* ao longo do *downlink subframe*, a SS deve decodificá-la, e então transmitir durante o *uplink subframe* a quantidade de *bytes* nos respectivos *mini-slots* que lhe foram alocados.

IV. DISCIPLINAS DE ESCALONAMENTO

A finalidade de um escalonador é administrar a ordem de envio dos pacotes presentes nas filas de armazenamento (*buffers*), em espera para transmissão, nos elementos da rede. Sua lógica de operação é definida através de algoritmos de disciplinas de escalonamento.

O algoritmo de uma disciplina de escalonamento eficiente deve atender vários requisitos, como baixa complexidade computacional, capacidade de distribuição justa dos recursos, flexibilidade, escalabilidade e, sobretudo, garantir o fornecimento da quantidade mínima de recursos da rede necessários para os seus usuários [5]. Existem diversas disciplinas, porém o emprego de uma única disciplina não atende a todos os requisitos necessários para a provisão de QoS

em redes WiMAX [6]. No entanto, a escolha de uma determinada disciplina pode ser satisfatória em relação a um ou mais parâmetros específicos (vazão, atraso, justiça) de acordo com o perfil de tráfego da rede onde será empregada.

Algumas disciplinas de escalonamento que podem ser utilizadas em redes do padrão IEEE 802.16 são:

1) PQ (*Priority Queuing*): Sua lógica determina que os pacotes das filas de maior prioridade, definida de acordo com algum critério, devem ser transmitidos primeiro e, caso existam pacotes com a mesma prioridade, é utilizado o método FIFO (*First In First Out*). Os pacotes das filas de menor prioridade só serão transmitidos quando as filas de maior prioridade estiverem vazias [7].

2) FQ (*Fair Queuing*): Classifica os pacotes em fluxos específicos e os separa em filas dedicadas. A banda é dividida igualmente em N filas, atribuindo a cada fluxo uma fração $1/N$ da banda do enlace [7]. Isolando cada fluxo em uma fila dedicada, previne-se que um fluxo mal comportado prejudique o desempenho dos outros fluxos. Porém, não dá suporte para fluxos com necessidades de largura de banda diferentes.

3) WRR (*Weighted Round Robin*): Foi inicialmente desenvolvida para tratar o tráfego de pacotes de tamanho fixo das redes ATM [8]. Essa disciplina serve rotativamente todas as filas não vazias. A vazão de cada fila depende do valor do peso que lhe é atribuído. O peso pode ser definido em função do comprimento das filas, do atraso dos pacotes, ou ainda pode ser associado com o parâmetro de QoS de classe de serviço MRTR (*Minimum Reserved Traffic Rate*).

4) EDF (*Earliest Deadline First*): Seu algoritmo define um tempo de vida (*deadline*) para cada pacote e aloca largura de banda para aquela fila cujo pacote apresente o menor valor [9]. Foi originalmente proposta para aplicações em tempo real, pois seu objetivo principal é garantir o atraso máximo limitado.

V. ESCALONADOR PROPOSTO

A capacidade de transmissão no *uplink* das redes WiMAX é limitada pela largura de banda disponível, que geralmente é escassa em relação à demanda de seus usuários. Além disso, as mensagens de gerenciamento e controle transmitidas através das conexões de gerenciamento são *inband*, isso significa que elas são transmitidas no mesmo canal onde também são transmitidos os dados, e assim, podem competir por largura de banda com as mensagens de dados transmitidas através das conexões de transporte. Na Fig. 3, é mostrada a distribuição dos campos ocupados pelas mensagens de gerenciamento e dos campos ocupados para o transporte de dados gerados pelas aplicações nas SSs, as rajadas de *uplink* (UL Bursts).

No caso de um ambiente com restrições acentuadas de recursos como o das redes sem fio, o ideal é utilizar uma quantidade mínima possível de recursos para as mensagens de sinalização ou *overhead*, e utilizar mais recursos para a transmissão de dados das aplicações. Pois, a distribuição da capacidade de transmissão disponível afeta a qualidade de serviço percebida pelo usuário de uma aplicação da rede.

Na prática, um esquema capaz de reduzir o *overhead* ou o número de mensagens como o preâmbulo de sincronização (*uplink burst preamble*), o SSTG (*Subscriber Station*

Transition Gap) que separa as rajadas de dados das SSs no *uplink subframe*, e a quantidade de *slots* disponibilizados para envio de requisições de banda, pode produzir um desempenho melhor em relação aos parâmetros de QoS, como a vazão.

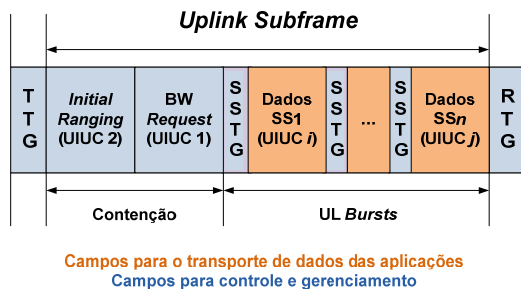


Fig. 3. Estrutura do *uplink subframe* (TDD).

Assim, nesta seção, propõe-se um mecanismo de escalonamento baseado na disciplina de escalonamento PQ. Para isso realiza-se uma extensão do mecanismo proposto em [10], a fim de aumentar o seu desempenho em relação a determinados parâmetros de QoS, bem como maximizar a sua eficiência de utilização de recursos do enlace *uplink*.

A estrutura do mecanismo de escalonamento PQ proposto em [10] é composta por três filas. A fila de maior prioridade é composta por *grants* da classe UGS. A fila intermediária armazena as requisições das classes de tempo real (RT – Real Time) rtPS e não tempo real (nRT – non Real Time) nrtPS. As requisições são ordenadas de acordo com o tempo de vida (*deadline*) e com a diferença entre a taxa fornecida e a taxa mínima requisitada para o fluxo. Os pacotes de maior prioridade podem migrar para a fila de alta prioridade, para atender seus requisitos de QoS. A fila de menor prioridade, composta por requisições BE, será atendida caso sobrem recursos após o escalonador atender as filas de maior prioridade.

Aqueles recursos que não foram utilizados são alocados para o período de contenção no início do *uplink subframe*, quando novas SSs tentam entrar na rede (*Initial Ranging*) ou aquelas SSs já registradas disputam a oportunidade de encaminhar sua requisição de largura de banda (*BW Request Contention*).

A nova estrutura proposta, representada na Fig. 4, apresenta quatro filas com uma separação lógica entre cada característica de tráfego, RT e nRT.

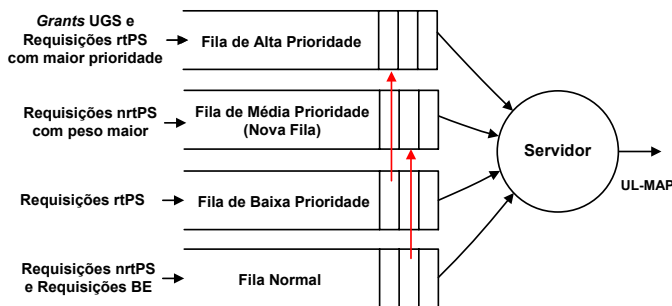


Fig. 4. Estrutura do mecanismo de escalonamento proposto.

A disciplina de escalonamento PQ utilizada é do tipo *strict priority*, que é adequada para oferecer tratamento diferenciado com priorização para o tráfego diversificado das redes WiMAX que apresenta requisitos de QoS específicos.

O objetivo da criação da nova fila foi separar as requisições das classes rtPS e nrtPS, para isolar e proteger o tráfego da classe rtPS. Assim, as requisições rtPS são armazenadas na fila de baixa prioridade, que corresponde à fila intermediária, de onde podem migrar para a fila de alta prioridade, e portanto são atendidas primeiro em relação às requisições da classe nrtPS, que não apresenta o requisito de QoS atraso máximo limitado.

A nova fila armazena exclusivamente as requisições da classe nrtPS. As requisições nrtPS a serem atendidas em primeiro lugar correspondem àquelas com maior peso, o qual é proporcional ao parâmetro MRTR. Portanto, independentemente da ordem em que as requisições chegam à fila normal, que corresponde à fila de baixa prioridade do mecanismo proposto em [10], aquelas pertencentes às conexões dos fluxos nrtPS são reordenadas em ordem decrescente de peso e, se existirem recursos, encaminhadas para a nova fila.

A preocupação de como efetuar o aproveitamento dos *slots* não utilizados no *uplink subframe* é uma das premissas para a melhoria de desempenho dos mecanismos de escalonamento defendida em [11] e, portanto, sua implementação é considerada relevante para alcançar o objetivo da proposta deste artigo. Assim, após o escalonador definir a alocação de banda para os *grants* UGS e requisições das classes rtPS, nrtPS e BE armazenados nas suas quatro filas, aqueles *slots* que ainda não foram definidos dentro da mensagem de gerenciamento UL-MAP, são pré alocados para o fluxo nrtPS associado ao pacote que ocupa a primeira posição da ordem de transmissão definida para o mapa de *uplink*.

O esquema de pré-alocação pode atender a um fluxo cuja aplicação acabara de gerar seus pacotes e foram movidos para a camada MAC, sem a necessidade de esperar o tempo total de operação do mecanismo de requisição e alocação de largura de banda: no *frame n* a SS encaminha a requisição de banda, que é processada pelo mecanismo de alocação de banda no *frame n+1*, e então no *frame n+2* transmite seus pacotes de acordo com o UL-MAP recebido. Portanto, o esquema de pré-alocação pode reduzir o atraso de acesso da rede, que é resultante do processo descrito anteriormente.

Outra vantagem da pré-alocação é que os *slots* que sobraram podem ser aproveitados diretamente para a transmissão de dados, ao invés de serem aproveitados para o envio de mensagens de gerenciamento e controle como a requisição de largura de banda no *uplink*, e assim, aumentar a eficiência da taxa de transferência dos dados. Assim, o tráfego da classe nrtPS não tem seu desempenho prejudicado pelo fato de suas requisições não migrarem para a fila de alta prioridade porque é compensado pelo esquema de pré-alocação.

Em trabalhos como [12], o escalonador BS-UL é baseado na disciplina PQ do tipo *strict priority* com quatro filas, como na proposta deste artigo. No entanto, não apresenta nenhuma função ou política para aproveitar aqueles *slots* que restam no *uplink* após o escalonador atender todas as suas filas, e os resultados analisados consideram apenas as classes rtPS e BE.

Diversas propostas baseadas em PQ empregam disciplinas como EDF, WRR, dentre outras, para atender as diferentes classes armazenadas em filas distintas [12] [13] [14], porém nenhum desses trabalhos apresenta uma política efetiva para aproveitar os *slots* restantes no *uplink*, como é apresentada neste trabalho.

A seguir é apresentado o pseudocódigo da proposta de extensão para o mecanismo de escalonamento BS-UL.

Lista de Parâmetros

N = Número de *slots* disponíveis no *uplink*;
 Nfn = Número de fluxos nrtPS;
MRTR = Taxa mínima requisitada por um fluxo nrtPS;
Smtr = Soma das taxas mínimas requisitadas diferentes;
 Pfi = Peso atribuído ao fluxo nrtPS;
Req_nrtPS = Estrutura de uma requisição do fluxo nrtPS;
Req_nrtPS.NumSlots = Número de *slots* requisitados;
Req_nrtPS.Peso = Peso do fluxo da requisição nrtPS (Pfi);
Req_nrtPS.SFID = Identificador de fluxo da requisição nrtPS;
Req.Tipo = Classe de serviço da requisição;
Req.Flag = *Flag* da requisição na fila normal (0:manter,1:excluir);
Req.Apontador = Indica a posição da requisição na fila normal;
SlotsAlocados = Número de *slots* alocados;
fluxo_PreAlocado = SFID do fluxo pré alocado;
Fila Normal = Lista encadeada com alocação dinâmica de memória;
Fila Média = Lista encadeada com alocação dinâmica de memória;

Algoritmo Escalonamento_nrtPS(N)

entrada: N .

```

1. início
2. Smtr = 0;
3. para (i = 0 até  $Nfn-1$ ) faça
4.   Smtr = Smtr + MRTRi(≠s)
5. fim para
6. para (i = 0 até  $Nfn-1$ ) faça
7.    $Pfi = MRTRi/Smtr$ ;
8. fim para
9. se (MRTRi(≠s)) faça
10.  Ordena_Requisições_nrtPS_deAcordo_Peso(Req_nrtPS);
11. fim se
12. se ((Existe Req) e (Req.Tipo = Req_nrtPS)) faça
13.  fluxo_PreAlocado = Req_nrtPS.SFID; //1º elemento da lista
14. fim se
15. enquanto ((Existe Req) e ( $N > 0$ )) faça
16.  se (Req.Tipo = Req_nrtPS) faça
17.    Req.Flag = 1;
18.    SlotsAlocados = Req_nrtPS.NumSlots;
19.  se (Req_nrtPS.NumSlots >  $N$ ) faça
20.    SlotsAlocados =  $N$ ;
21.    Req_nrtPS.NumSlots -= (SlotsAlocados - 1);
22.    Req.Flag = 0;
23.  fim se
24.  Insere_Fila_Média_Prioridade(SlotsAlocados*);
25. fim se
26.   $N = N - SlotsAlocados$ ;
27.  Req.Apontador = Req->próximo;
28. fim enquanto
29. fim

```

Método Pré_Alocação_nrtPS(N)

entrada: N .

```

//Após todas filas serem atendidas define os últimos slots do UL-MAP
1. início
2. se ( $N > 0$ ) faça
3.   SlotsAlocados =  $N$ ; //slots pré alocados para fluxo_PreAlocado
4.    $N = 0$ ;
5. fim se
6. fim

```

*Insere Req.nrtPS com Req_nrtPS. NumSlots = SlotsAlocados.

VI. AVALIAÇÃO DO MECANISMO DE ESCALONAMENTO PROPOSTO

O mecanismo de escalonamento proposto é avaliado através de modelagem e simulação, utilizando o *software* de simulação de redes de computadores ns-2 (*network simulator-2*) [15], com o módulo WiMAX proposto em [16].

Para verificar o desempenho do mecanismo proposto foram modelados dois cenários, para basicamente comparar a eficiência da proposta de extensão apresentada neste trabalho em relação à proposta apresentada em [10].

Particularmente, o objetivo da modelagem do primeiro cenário foi analisar a justiça na distribuição dos recursos da rede entre usuários de aplicações que geram o mesmo tipo de tráfego, da classe nrtPS. Na modelagem do segundo cenário, o objetivo foi particularmente analisar a capacidade do mecanismo de escalonamento oferecer tratamento diferenciado, de acordo com a prioridade e os requerimentos de QoS de cada tipo de tráfego, para as classes UGS, rPS, nrtPS e BE.

Em ambos os cenários, foram utilizados modelos de redes com as mesmas características apresentadas na Tabela I, diferenciando-se apenas em relação à quantidade de SSS, todas elas uniformemente distribuídas em relação à BS, e aos tipos de tráfego de serviço utilizados pelos usuários dessa rede BWA. Na modelagem realizada, o canal de comunicações foi considerado ideal, desprezando-se as características do meio físico, pois o foco desse trabalho é a camada MAC, e os *buffers* das filas das conexões são superdimensionados, o que significa que as perdas de pacotes podem ser desconsideradas.

TABELA I
PARÂMETROS DE CONFIGURAÇÃO DA REDE

Parâmetros	Valor
Arquitetura da Rede	PMP
Duplexação	TDD (1:1)
Tamanho do <i>Frame</i>	5ms
Capacidade de Transmissão do Canal	40 Mbps
Nº de <i>Slots</i> de Contenção por Mapa	3
<i>Backoff Start</i>	3
<i>Backoff End</i>	8
Tempo de Simulação	1000s

A avaliação de desempenho é efetuada através da comparação dos resultados apresentados nas figuras 5, 6, 7, 8, 9, e 10; entre o mecanismo base proposto em [10], cuja legenda é definida por PQ-3F, pois se trata de um mecanismo de escalonamento PQ com três filas, e a sua extensão proposta

nesse trabalho, que é definido pela legenda PQ-4F, pois é composto por quatro filas em sua estrutura.

Funções especiais como, por exemplo, a fragmentação e a concatenação foram habilitadas, de acordo com as recomendações do padrão IEEE 802.16 para cada classe.

A. Cenário I

O primeiro cenário de rede WiMAX modelado, consiste de uma BS associada a um número inicial de dez SSs, variando até um número igual a trinta SSs. Cada SS possui um único fluxo de serviço nrtPS associado a uma aplicação modelada por um agente gerador de tráfego (AGT) estocástico de distribuição exponencial, que fornece uma taxa em torno de 600 (Kbps). Exceto os fluxos das estações SS5 e SS10 que apresentam uma MRTR igual a 500 (Kbps), todos os fluxos das demais SSs apresentam uma MRTR igual a 200 (Kbps). Isto foi feito para verificar se o compartilhamento da largura de banda entre esses fluxos é proporcional ao seu peso, que é diretamente proporcional ao parâmetro MRTR.

Os resultados apresentados na Fig. 5 revelam que, entre uma quantidade de 20 SSs até 30 SSs presentes na rede, o desempenho de vazão média apresentado pelo mecanismo de escalonamento PQ-4F foi sempre superior ao desempenho apresentado pelo mecanismo PQ-3F.

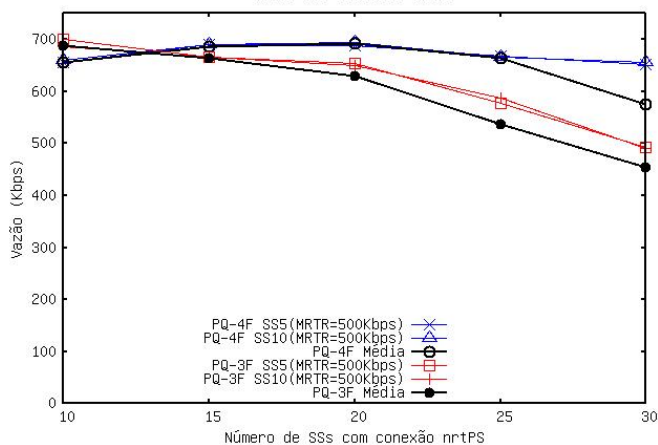


Fig. 5. Vazão das SSs nrtPS (PQ-4F vs. PQ-3F).

A Fig. 6 apresenta a vazão de dez conexões concorrentes nrtPS, a fim de verificar se o mecanismo PQ-4F distribui a largura de banda de maneira justa entre as conexões nrtPS. Os valores obtidos para a maioria das SSs apresentam pouca diferença uns em relação aos outros, com uma diferença mais acentuada para aquelas SSs cujo valor do parâmetro MRTR é igual a 500 (Kbps) em relação às demais SSs que apresentam um valor igual a 200 (Kbps), a partir de 25 SSs. Isso ocorre porque a política de atendimento do mecanismo PQ-4F prioriza as requisições dos fluxos com maior peso.

Todos os resultados obtidos foram gerados utilizando o método de replicação, executando cada simulação dez vezes com sementes diferentes. Na Tabela II foi mostrado o intervalo de confiança ao nível de 95% para os valores de vazão

apresentados na Fig. 5, e na Tabela III para os valores apresentados na Fig. 6.

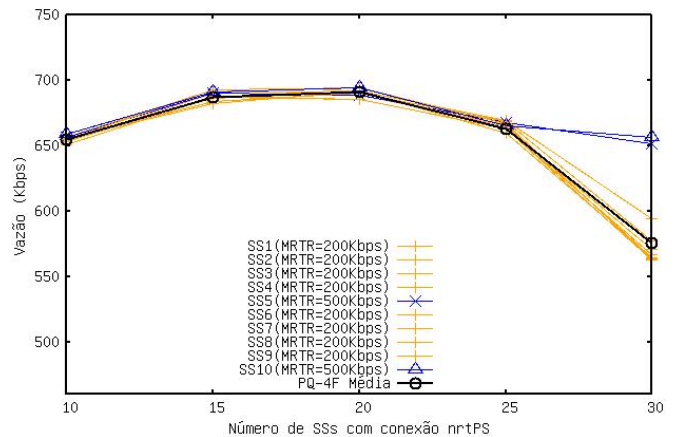


Fig. 6. Vazão de dez conexões concorrentes nrtPS (PQ-4F).

TABELA II
INTERVALO DE CONFIANÇA DE VAZÃO (FIG. 5)

SS	IC(95%)
PQ-4F SS5(MRTR=500Kbps)	671,059±22,445
PQ-4F SS10(MRTR=500Kbps)	673,258±22,451
PQ-4F Média (Todas as SSs)	654,495±57,943
PQ-3F SS5(MRTR=500Kbps)	617,979±103,540
PQ-3F SS10(MRTR=500Kbps)	615,717±98,757
PQ-3F Média (Todas as SSs)	595,041±120,271

TABELA III
INTERVALO DE CONFIANÇA DE VAZÃO (FIG. 6)

SS	IC(95%)
SS1(MRTR=200Kbps)	649,935±63,556
SS2(MRTR=200Kbps)	650,836±62,837
SS3(MRTR=200Kbps)	659,928±50,003
SS4(MRTR=200Kbps)	654,104±64,797
SS6(MRTR=200Kbps)	655,393±56,528
SS7(MRTR=200Kbps)	653,715±60,405
SS8(MRTR=200Kbps)	651,329±61,332
SS9(MRTR=200Kbps)	654,649±66,344

A Fig. 7 apresenta os resultados referentes ao percentual de utilização da capacidade máxima do canal de *uplink*, pelos mecanismos de escalonamento PQ-3F e PQ-4F, com a variação da carga na rede. O percentual de utilização foi determinado através de (1), que depende da razão entre a quantidade total de dados transmitidos com sucesso pelo mecanismo de escalonamento ao longo de seu tempo de operação, pela taxa de transmissão do canal para o *uplink subframe* (20 Mbps).

$$Utilização = \frac{D_{UL} / \Delta t}{R_{UL}} \cdot 100\% \quad (1).$$

Onde: *Utilização* representa o percentual de utilização, D_{UL} é total de dados transmitidos no *uplink* (bits), Δt é o tempo total (segundos) e R_{UL} é a taxa de transmissão do *uplink* (bps).

Na Fig. 7, verifica-se que, com a variação do número de SSs presentes na rede, a partir de um número equivalente a 20 SSs,

o desempenho do mecanismo PQ-4F foi muito superior ao desempenho do mecanismo PQ-3F.

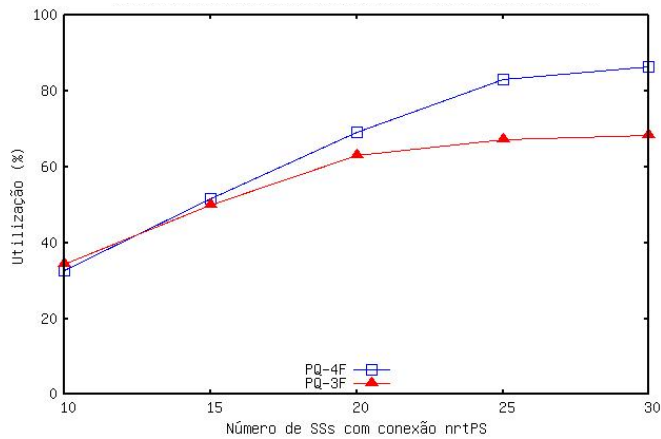


Fig. 7. Percentual de utilização (PQ-4F vs. PQ-3F).

O mecanismo PQ-4F é capaz de reduzir o atraso de acesso da rede, que foi descrito na Seção V, e definir necessariamente menos recursos para as operações de gerenciamento como é mostrado na Fig. 8, que representa o percentual de pacotes de gerenciamento (MAC) em relação ao total de pacotes no *uplink*. Assim, o PQ-4F oferece uma utilização de recursos mais eficiente para a transmissão de dados do que o PQ-3F.

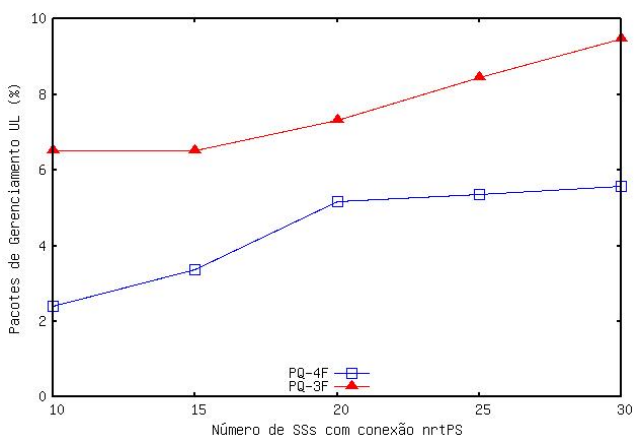


Fig. 8. Percentual de pacotes de gerenciamento no *uplink* (UL).

B. Cenário II

O segundo cenário modelado, apresenta inicialmente 20 conexões BE, 20 conexões nrtPS, 6 conexões rtPS, e 15 a 35 conexões UGS. A taxa média produzida pelos AGTs dos fluxos BE e nrtPS é de 200 (Kbps) para cada SS. O valor do parâmetro MRTR para todas as SSs com o fluxo nrtPS é igual a 200 (Kbps) e para as seis SSs com o fluxo rtPS foram definidos outros valores de MRTR: 900, 900, 500, 200, 200 e 550 (Kbps). Mais detalhes sobre as características dos AGTs de todas as SSs utilizadas neste cenário são apresentados em [10].

Na Fig. 9, verifica-se que a vazão média obtida pelas SSs da classe nrtPS, através do mecanismo PQ-4F, apresenta um

desempenho levemente superior à vazão média obtida através do PQ-3F, mas em relação às SSs da classe BE a melhoria de desempenho foi mais significativa. Como o PQ-4F atende a toda largura de banda solicitada pelo fluxo nrtPS através de um esquema de utilização mais eficiente, restam mais recursos para serem aproveitados pelo fluxo BE no *uplink*.

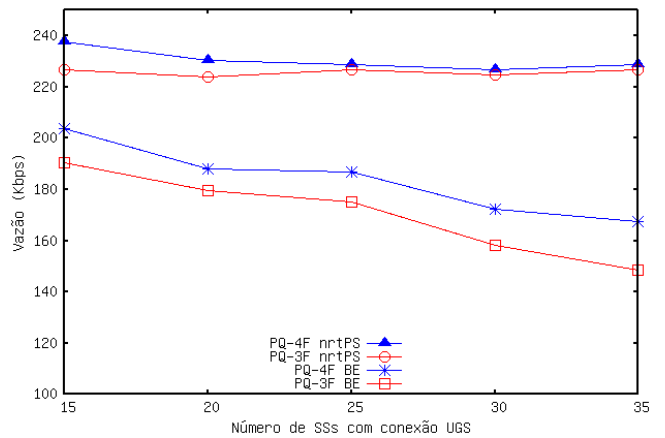


Fig. 9. Vazão média das conexões nrtPS e BE (PQ-4F vs. PQ-3F).

A melhoria de desempenho em relação à vazão alcançada para as classes nRT, a partir do mecanismo de escalonamento PQ-4F, foi efetiva e não prejudicou os outros tráfegos RT. Pelo contrário, o fluxo rtPS apresentou uma melhoria de desempenho em relação ao atraso médio (Fig. 10).

A fila de alta prioridade, que é a primeira a ser atendida, além dos *grants* UGS em ambos os mecanismos, no caso do mecanismo PQ-3F, armazena as requisições rtPS e nrtPS, mas no mecanismo PQ-4F, armazena apenas as requisições rtPS, e por isso é capaz de oferecer um atraso médio menor do que o PQ-3F. No PQ-4F, as requisições nrtPS são armazenados na fila de média prioridade e não migram para a fila de alta prioridade como no PQ-3F, fato que não compromete o desempenho de vazão da classe nrtPS, como apresentado na Fig. 9, porque o PQ-4F oferece para essa classe a alternativa de pré-alocação.

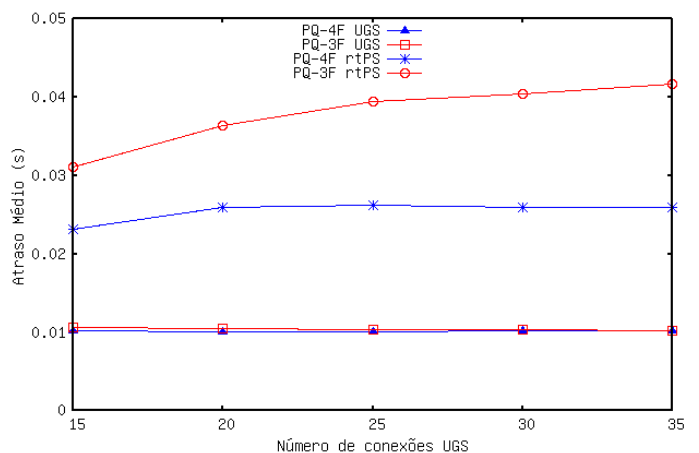


Fig. 10. Atraso médio das SSs UGS e rtPS (PQ-4F vs. PQ-3F).

A quantidade máxima de SSs presentes no cenário 2 é igual a 81, enquanto que no cenário 1 essa quantidade é igual a 30, mas a carga máxima gerada na rede pelas SSs no cenário 1 foi superior à carga máxima gerada na rede pelas SSs no cenário 2. À medida que mais usuários entram na rede, inevitavelmente a competição pela largura de banda aumenta e, conseqüentemente a quantidade de mensagens de gerenciamento também tende a aumentar, propiciando que restem menos recursos para a pré-alocação de dados para as conexões nrtPS.

No cenário 2, além do número de SSs presentes na rede ser superior em relação ao número do cenário 1, novos tipos de tráfego foram gerados, e classes de maior prioridade de atendimento como UGS e rtPS passaram a competir pela largura de banda disponível. Mesmo assim, a vazão média da classe nrtPS foi adequada, pois a taxa de dados gerada pelos AGTs foi definida em torno de 200 (Kbps) para cada conexão, que é o valor exato definido para o parâmetro MRTR de cada uma das 20 SSs que produziram esse tipo de tráfego.

VII. CONCLUSÕES

Neste artigo propõe-se um mecanismo de escalonamento da BS para o tráfego *uplink* (BS-UL) baseado na disciplina de escalonamento *Priority Queuing* (PQ), extensão da proposta apresentada em [10]. O mecanismo proposto possui uma estrutura com quatro filas, por isso chamado de PQ-4F, com uma separação lógica para os tipos de tráfego de tempo real (RT) e não tempo real (nRT), para o atendimento com diferenciação e priorização de tráfego. Assim, as requisições da classe rtPS, que apresentam o requisito de atraso máximo limitado, são atendidas primeiro do que as requisições da classe nrtPS, que não apresentam esse requisito crítico de QoS. Dentro de cada fila, as requisições são atendidas de acordo com políticas específicas, a fim de garantir os requisitos de QoS necessários para as quatro classes de serviço definidas pelo padrão IEEE 802.16d. Após atender as quatro filas, o mecanismo de escalonamento pré aloca os *slots* restantes no *uplink* diretamente para a transmissão de dados entre os fluxos nrtPS.

A partir dos resultados apresentados, conclui-se que, o mecanismo PQ-4F, aumentou a eficiência de acesso aos escassos recursos do enlace *uplink*, distribuindo-os de maneira justa entre os fluxos da mesma classe, ao mesmo tempo, que foi capaz de oferecer tratamento diferenciado para o tráfego multimídia. Portanto, a grande contribuição desse trabalho foi aumentar a utilização da rede sem degradar os níveis de QoS

oferecidos aos usuários. Trabalhos futuros serão direcionados para a melhoria de desempenho dos requerimentos de QoS, utilizando funções que definem a ordem de atendimento das requisições de acordo com parâmetros dinâmicos, e uma lógica de pré alocação preditiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE 802.16 Working Group, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part. 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems", Outubro 2004.
- [2] M. Ma, *Current Technology Developments of WiMax Systems*, Springer Science + Business Media B.V., 2009.
- [3] Y. A. Şekercioglu, M. Ivanovich and A. Yeğın, "A Survey of MAC Based QoS Implementations for WiMAX Networks", *Elsevier, Computer Networks*, vol. 53, no. 14, pg. 2517-2536, 2009.
- [4] C. Cicconetti, L. Lenzini e E. Mingozzi, "Quality of Service Support in IEEE 802.16 Networks", *IEEE Network*, vol. 20, no. 2, pg. 50-55, Abril 2006.
- [5] C. So-in, R. Jain e A. Tamimi, "Scheduling in IEEE 802.16e Mobile WiMAX Networks: Key Issues and a Survey", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Vol. 27, no. 2, pg. 156-171, Fevereiro 2009.
- [6] N. A. Ali, P. Dhrona e H. Hassanein, "A Performance Study of Uplink Scheduling Algorithms in Point-to-Multipoint WiMAX Networks", *Elsevier, Computer Communications*, vol. 32, no. 3, pg. 511-521, 2009.
- [7] C. Semeria, "Supporting Differentiated Service Classes: Queue Scheduling Disciplines", *Juniper Networks Inc.*, Part Number:: 200020-001 12/01, 2001.
- [8] M. Katevenis, S. Sidiropoulos e C. Courcoubetis, "Weighted Round-Robin Cell Multiplexing in a General-Purpose ATM Switch Chip", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 9, pg. 1265-1279, Outubro 1991.
- [9] P. Dhrona, "A Performance Study of Uplink Scheduling Algorithms in Point to Multipoint WiMAX Networks", Thesis (Master, Computing) -- Queen's University, 2007-12-29 18:21:21.521, Dezembro 2007.
- [10] J. Freitag e N. da Fonseca, "Escalação com Qualidade de Serviço em redes IEEE 802.16", Anais do 25º Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores e Sistemas Distribuídos (SBRC 2007), pg. 723-736, 2007.
- [11] A. Sayenko, O. Alanen, J. Karhula e T. Hämäläinen, "Ensuring the QoS Requirements in 802.16 Scheduling", Proceedings of the 9th ACM International Symposium on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems, pg. 108-117, Outubro 2006.
- [12] K. Wongthavarawat e A. Ganz, "Packet Scheduling for QoS Support in IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Systems", *International Journal of Communications Systems*, vol. 16, no. 1, pg. 81-96, 2003.
- [13] J. Chen, W. Jiao e H. Wang, "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, 2005.
- [14] D. Tarchi, R. Fantacci e M. Bardazzi, "Quality of Service Management in IEEE 802.16 Wireless Metropolitan Area Networks", Proceedings of the IEEE International Conference on Communications, pg. 1789-1794, 2006.
- [15] The Network Simulator - ns-2, <http://www.isi.edu/nsnam/ns>.
- [16] J. Freitag e N. da Fonseca, "Um Módulo para Simulação de Redes WiMAX no Simulador ns-2", Anais do XXVIII Congresso da SBC, pg. 180-199, 2008.