

Análise do Escalonamento *Uplink* em Redes WiMAX Considerando a Camada Física OFDM

Antônio Neco de Oliveira
Instituto Federal Goiano – Campus Morrinhos
Morrinhos – GO
anecoo@gmail.com

Paulo Roberto Guardieiro
Universidade Federal de Uberlândia
Uberlândia – MG
prguardieiro@ufu.br

Resumo - O padrão IEEE 802.16 define as especificações para a camada MAC (*Medium Access Control*) e os parâmetros da camada física para, juntas, oferecerem QoS (*Quality of Service*) às aplicações dos usuários. Neste artigo apresenta-se uma análise do escalonamento *uplink* a partir da disciplina de escalonamento PQ (*Priority Queue*), utilizando os diferentes perfis de MCSs (*Modulation and Coding Schemes*) proporcionados pela camada física OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*). Os cenários analisados por meio de modelagem e simulação apresentam diferentes taxas de transmissão, as quais são definidas pela BS (*Base Station*) de acordo com as condições do canal indicadas pela SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) em cada SS (*Subscriber Station*). Os resultados obtidos utilizando a camada física OFDM mostram os parâmetros de QoS, vazão e atraso, variando em função da eficiência do perfil de MCS utilizado, proporcionando ao mecanismo de escalonamento *uplink* maior aproveitamento dos recursos compartilhados na rede.

Palavras-chave – escalonamento *uplink*, QoS, OFDM, IEEE 802.16.

Abstract - The IEEE 802.16 standard defines the specifications for the MAC (*Medium Access Control*) and physical layer parameters for, together, provide QoS (*Quality of Service*) to user applications. This paper presents an analysis of *uplink* scheduling from the PQ (*Priority Queue*) scheduling discipline using the different profiles of MCSs (*Modulation and Coding Schemes*) provided by the OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) physical layer. The scenarios analyzed by means of modeling and simulation have different transmission rates, which are defined by the BS (*Base Station*) according to channel conditions specified by the SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) in each SS (*Subscriber Station*). The obtained results using the OFDM physical layer shows the QoS parameters, throughput and delay, varying depending on the efficiency of MCS profile used, providing to the *uplink* scheduling mechanism for better use of shared resources on the network.

Keywords – *Uplink* scheduling, QoS, OFDM, IEEE 802.16.

I. INTRODUÇÃO

O padrão IEEE 802.16 [1], também conhecido por WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*), é baseado em um sistema aberto com o foco em QoS (*Quality of Service*) e interoperabilidade. É uma arquitetura com suporte a múltiplas faixas de frequências de operação que oferece segurança e mobilidade. Este padrão especifica a interface aérea, incluindo a camada MAC (*Medium Access Control*) e a

camada física (PHY), provendo múltiplos serviços de acesso à banda larga sem fio (BWA - *Broadband Wireless Access*) ponto-multiponto (PMP), combinando sistemas móveis e fixos. A camada MAC suporta múltiplas especificações da camada física, agrupando os mecanismos para provimento de QoS, como os escalonadores que são responsáveis pela alocação de largura banda para as SSs e pelo envio de pacotes nos sentidos *downlink* (DL) e *uplink* (UL).

Os escalonadores baseados em redes cabeadas consideram somente o tráfego e o *status* da fila [2]. No entanto, em redes sem fio, a capacidade do canal varia no tempo devido às interferências do meio físico, como os múltiplos caminhos e o efeito Doppler, fazendo com que o desempenho do canal seja afetado com o desvanecimento do sinal transmitido.

Neste artigo apresenta-se uma análise do escalonamento *uplink*, localizado na BS, responsável pela alocação de largura de banda para transmissão UL e/ou oportunidades para solicitação de largura de banda a cada SS subordinada, mantendo o uso eficiente do canal de comunicação, considerando os aspectos da camada física OFDM para permitir que diferentes perfis de MCSs (*Modulation and Coding Schemes*) possam ser aplicados, conforme as condições do canal, definidas pela SNR (*Signal-to-Noise Ratio*) em cada SS de acordo com o padrão IEEE 802.16-2004.

O restante deste artigo está organizado como segue: A Seção II apresenta o padrão IEEE 802.16. A Seção III descreve o cenário de rede WiMAX estudado. A Seção IV apresenta a simulação e análise dos resultados obtidos. A Seção V conclui o artigo com as considerações para trabalhos futuros.

II. O PADRÃO IEEE 802.16

O padrão IEEE 802.16 iniciou-se em 1999 com um grupo criado pelo IEEE com a missão de desenvolver os parâmetros globais para redes acesso à banda larga sem fio (BWA) para redes metropolitanas, denominadas WirelessMAN. Desde sua criação, o padrão IEEE 802.16 passou por várias atualizações de acordo com as novas funcionalidades adicionadas. Inicialmente, definia os princípios para sistemas fixos, operando com linha de visada na faixa de frequências de 10 a 66 GHz, evoluindo para os sistemas nômades e móveis na faixa de frequências abaixo de 11 GHz sem linha de visada. Para certificar os produtos WiMAX e manter a compatibilidade e interoperabilidade entre diferentes fabricantes, foi criado o *WiMAX Forum*, que é uma aliança

formada por operadores e fabricantes de componentes e equipamentos para sistemas de comunicação.

Em 2004, o IEEE 802.16-2004 foi apresentado englobando todos os trabalhos desenvolvidos (IEEE 802.16, IEEE Std 802.16a e IEEE Std 802.16c) com suas revisões. O suporte à mobilidade com velocidade veicular foi acrescentado em 2005 pela versão IEEE 802.16e-2005, combinando sistemas BWA fixo e móvel. Em 2009, foi disponibilizada uma nova revisão em substituição às especificações existentes e englobando todas as alterações do padrão até o IEEE 802.16j-2007.

A interface aérea das redes WirelessMAN está representada na Figura 1, através das camadas PHY e MAC definidas pelo padrão IEEE 802.16.

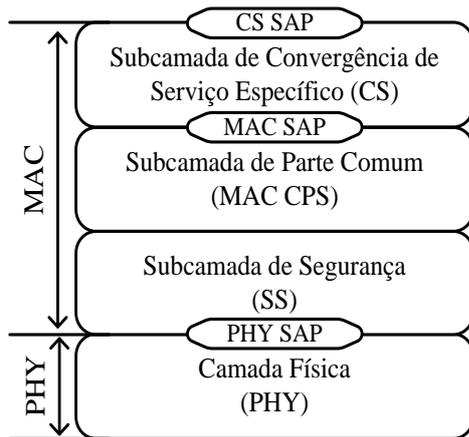


Fig. 1. Estrutura das camadas MAC e PHY para redes WirelessMAN [1]

A. A Camada MAC

A camada MAC controla o acesso ao meio físico e garante QoS através dos mecanismos de alocação dinâmica de recursos e atribuição de prioridades de tráfego, com o protocolo MAC designado para sistemas BWA PMP com altas taxas de bits. Está dividida em subcamadas (Figura 1) para facilitar o desempenho das funções de QoS, permitindo o compartilhamento do canal.

- **Subcamada de Convergência (CS):** prepara as PDUs (Unidades de Dados do Protocolos) vindas da camada superior, classifica e as entrega para o MAC SAP (*Service Access Point*) apropriado; Recebe os CS PDUs da outra entidade e os repassa para a camada superior.
- **Subcamada de Parte Comum (CPS):** suporta arquitetura de rede PMP, caracterizada pela presença de uma BS como elemento gerenciador da conexão direta entre a BS e a SS, e operações *Mesh*, onde são permitidas conexões diretas entre as SSs com o tráfego roteado através das mesmas.
- **Subcamada de Segurança (Privacy Sublayer - PS):** fornece autenticação, troca de chaves de segurança, criptografia e controle de integridade de todo o sistema BWA. As conexões entre as SSs e a BS são criptografadas em ambas as direções para proteger a integridade dos dados e manter a confidencialidade do tráfego, evitando ataques de negação de serviços ou roubo de dados.

B. Especificações da Camada Física

A camada física no padrão IEEE 802.16 é responsável pela transmissão das MAC PDUs no meio físico. Para tanto, são definidos espectros de frequência, técnicas de modulação e codificação adaptativas para a transmissão digital e técnicas de duplexação e correção de erros. Opera no formato de *frames* (quadros) em duas faixas de frequências, de 2-11 GHz e de 10-66 GHz, com três especificações para WirelessMAN (WMAN) e uma para WirelessHUMAN (*Wireless High-Speed Unlicensed Metropolitan Area Networks*), conforme Tabela I. Cada *frame* é dividido em *subframe* DL (*downlink*) e *subframe* UL (*uplink*). O *subframe* DL inicia com informações necessárias para sincronização e controle. No caso TDD (*Time Division Duplexing*), o *subframe* DL vem primeiro, seguido pelo *subframe* UL. No caso do FDD (*Frequency Division Duplexing*), transmissões UL ocorrem simultaneamente com transmissões DL, em frequências diferentes.

A modulação e a codificação podem ser associadas dinamicamente rajada a rajada (*burst-by-burst*) de acordo com a SNR que, dentre outros fatores, é dependente da distância entre a SS e a BS. Para SSs próximas e que apresentam um alto valor de SNR, utiliza-se a 64-QAM (*Quadrature Amplitude Modulation*) que transmite a uma taxa de seis bits/baud. Para SSs localizadas a uma média distância, usa-se a 16-QAM que transmite a uma taxa de quatro bits/baud. Para SSs distantes da BS, para as quais a SNR apresenta um baixo valor, a QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*) é utilizada com uma taxa de dois bits/baud.

TABELA I
ESPECIFICAÇÕES DAS CAMADAS FÍSICAS WiMAX

Descrição	Técnica de Duplexação	Banda de Operação
WirelessMAN-SC (<i>Single Carrier</i>)	TDD, FDD	10-66 GHz (LOS)
WirelessMAN OFDM	TDD, FDD	2-11 GHz (NLOS) Banda licenciada
WirelessMAN OFDMA	TDD, FDD	2-11 GHz (NLOS) Banda licenciada
WirelessHUMAN	TDD	2-11 GHz (NLOS) Banda não licenciada

LOS – *Line-Of-Sight*
NLOS – *Non-Line-Of-Sight*

C. QoS no Padrão IEEE 802.16

QoS refere-se à qualidade do serviço que a rede oferece para as aplicações ou usuários, incluindo os parâmetros atraso do pacote enviado através da rede, segurança do pacote transmitido e vazão do canal de comunicação. A provisão de QoS ocorre com a maximização da utilização dos recursos disponíveis na rede, atendendo os requisitos das aplicações através do gerenciamento dos recursos [3].

O padrão IEEE 802.16 suporta vários tipos de tráfegos (dados, voz, vídeo), com diferentes requisitos de QoS. Para tanto, a camada MAC define mecanismos de sinalização e funções para controle de transmissões de dados entre a BS e as SSs através de solicitação e concessão de banda. A concessão de banda para a SS pode ser realizada por conexão (*Grant Per Connection - GPC*) na qual a SS requisita largura de banda

para uma conexão básica, ou por SS (*Grant Per SS - GPSS*) onde a SS agrupa os pedidos de largura de banda para todas as conexões. Entre os mecanismos responsáveis pela provisão de QoS, destacam-se:

1) *Mecanismo de Controle de Admissão de Conexões (CAC)*: restringe o número de usuários na rede para evitar a saturação do canal, mantendo a qualidade do serviço para os usuários admitidos na rede [4]. O CAC precisa ser adicionado entre a borda e o núcleo da rede, para controlar o tráfego de entrada na rede. Um pedido de nova conexão só deverá ser aceito quando os recursos disponíveis na rede são suficientes para atender os requisitos de tráfego e QoS, com base na sua categoria de serviço, enquanto os requisitos de QoS de todas as conexões existentes são mantidos.

Os algoritmos de CAC propostos na literatura são classificados em duas categorias [3]: a primeira baseia-se na degradação do serviço e consiste em diminuir os recursos das conexões em curso (quando possível) para aceitar um novo fluxo de serviço. Na segunda categoria, uma nova conexão é aceita somente se receber garantias de QoS sem degradar a QoS das conexões existentes.

2) *Mecanismo de policiamento*: assegurará a utilização justa e eficiente dos recursos da rede, impedindo a saturação pelos tráfegos mal comportados.

3) *Mecanismo de escalonamento*: garantirá a provisão de QoS classificando os fluxos de acordo com o tipo de informação presente e os encaminhando para filas para serem transmitidos de acordo com suas prioridades.

Para facilitar o compartilhamento de largura de banda entre diferentes usuários, é especificado um conjunto de parâmetros para os fluxos de dados e os serviços são agrupados em quatro categorias de acordo com os requisitos de QoS de cada aplicação [1], mostrados na Tabela II.

- *Unsolicited Grant Service (UGS)*: destinado para aplicações em tempo real que geram pacotes de dados com tamanho fixo e periódico, como canais telefônicos clássicos T1/E1 PCM (*Pulse Coded Modulation*) e voz sobre IP (VoIP).
- *Real-Time Polling Service (rtPS)*: suporta aplicações em tempo real que geram pacotes de comprimento variável periodicamente, como *streaming* de áudio e vídeo MPEG.
- *Non-Real-Time Polling Service (nrtPS)*: destinado para aplicações que requer garantia de taxa de dados, mas são tolerantes a atraso. É desejável limitar a taxa de dados para alguma taxa máxima. Neste serviço, o *polling unicast* ocorre com menor frequência e o fluxo pode utilizar *slots* de contenção reservados para requisição de banda.

TABELA II
PARÂMETROS MANDATÓRIOS DE QoS

Parâmetros de QoS	Classes de Serviços
<i>Maximum Sustained Traffic Rate</i>	UGS, rtPS, nrtPS, BE
<i>Maximum Latency</i>	UGS, rtPS
<i>Tolerated Jitter</i>	UGS
<i>Request/Transmission Policy</i>	UGS, rtPS, nrtPS, BE
<i>Minimum Reserved Traffic Rate</i>	rtPS, nrtPS
<i>Traffic Priority</i>	nrtPS, BE

- *Serviço Best Effort (BE)*: especificado para aplicações sem requisitos de QoS. A SS pode utilizar *slots unicast* e *slots* de contenção para requisitar largura de banda. Este tipo de serviço é indicado para tráfego Web.

III. DESCRIÇÃO DO CENÁRIO ESTUDADO

Para uma análise mais realística de um sistema de comunicação WiMAX, faz-se necessária uma modelagem envolvendo os diversos tipos de tráfegos e as camadas que compõem o sistema, conforme mostrado na Figura 1. Na camada MAC, tem-se o escalonador *uplink* responsável pela alocação de largura de banda para transmissão UL e/ou oportunidades para solicitação de largura de banda para as SSs, assegurando uma alta vazão do sistema com eficiência e justiça para as aplicações. No entanto, em sistemas de comunicação sem fio o meio físico varia no tempo, tornando-se necessária uma estimação da qualidade do canal para cada SS, a fim de definir o MCS que propicie o melhor aproveitamento do canal. No padrão IEEE 802.16 são definidos os MCSs para permitir o uso eficiente da camada física OFDM e garantir QoS para tráfegos heterogêneos sobre o canal de comunicação sem fio.

A. O Simulador para Redes WiMAX

Para os experimentos de simulações realizados, foi utilizado o Simulador NS-2 (*Network Simulator, version 2*) na versão 2.28 com o Módulo para simulação de redes WiMAX [5], no qual se incluiu neste trabalho, a camada física OFDM desenvolvida pelo NIST (*National Institute of Standards and Technology*), atendendo as especificações do padrão IEEE 802.16 para a topologia PMP e o modo de acesso TDD, permitindo uma análise mais realística do mecanismo de escalonamento, o qual passou a considerar os diferentes MCSs utilizados pelas SSs, resultando em diferentes taxas de transmissão.

O escalonador utiliza a política de escalonamento PQ (*Priority Queue*), priorizando os fluxos de dados em tempo real, no qual os fluxos de dados são classificados e agrupados em três filas de acordo com os requisitos de QoS. A fila de baixa prioridade armazena as requisições de largura de banda do serviço BE. Na fila intermediária estão as requisições de largura de banda enviadas por conexões rtPS e nrtPS. Essas requisições podem migrar para a fila de alta prioridade no momento em que precisarem ser atendidas para garantir a provisão de QoS. A fila de alta prioridade armazena os *grants* periódicos para o envio de dados e os *grants* periódicos para o envio de requisição de largura de banda que devem ser atendidos no próximo frame [5].

O canal utilizado opera com uma largura de banda de 20 MHz e o *frame* tem duração de 5 ms, dividido nos *subframes downlink* e *uplink* na razão 1:1, sendo a taxa de transmissão de dados definida de acordo com as variações do canal através da estimação do valor da SNR em cada SS, permitindo a escolha do MCS que proporcione o melhor desempenho.

B. Características da Camada Física OFDM

O comportamento dos tráfegos heterogêneos, diante da variação do canal sem fio, será analisado considerando a

camada física OFDM utilizando os parâmetros de modulação e codificação adaptativas em conformidade com as características definidas para redes WiMAX.

A técnica OFDM divide um fluxo de dados de alta taxa de bits, em vários fluxos de dados de baixa taxa de bits em paralelo e modula cada fluxo de forma distinta, através das subportadoras [6], permitindo:

- Maximizar a taxa de dados, minimizando a largura de banda do canal utilizado;
- Maximizar a resistência à interferência intersimbólica (ISI) e minimizar a probabilidade de símbolos errados;
- Minimizar a potência do transmissor e a complexidade dos circuitos.

Para eliminar a interferência intersimbólica, as subportadoras são definidas de modo que todas elas sejam ortogonais, uma em relação à outra, durante o período do símbolo. A ortogonalidade é criada pelo espaçamento entre as subportadoras adjacentes, de forma a obter um número inteiro de ciclos durante o período do símbolo OFDM.

1) *Modulação e Codificação Adaptativas*: a modulação e a codificação adaptativas permitem alterar o perfil da rajada em conformidade com as condições do canal sem fio, rajada a rajada. Para tanto, a BS é informada das condições do canal pelas mensagens de gerenciamento. O escalonador da BS analisa a qualidade do canal com base no valor da SNR em cada SS e seleciona o MCS que proporciona o melhor aproveitamento do canal.

São suportados os esquemas de modulação QPSK, 16-QAM e 64-QAM, com uma codificação FEC (*Forward Error Correction*) que consiste na concatenação de um código *Reed-Solomon* exterior e uma taxa compatível com um código convolucional interno suportados em ambos DL e UL.

A Tabela III apresenta a eficiência da camada física OFDM de acordo com o valor da SNR e do MCS utilizados [1]. A Equação (1) permite calcular o número de bits por símbolo OFDM. Ao final de cada símbolo OFDM é adicionado um byte de zeros para inicializar o codificador.

$$bpsymbol = N_{user} * E - 8 \quad (1)$$

Onde:

- $bpsymbol$ - Número de bits por símbolo OFDM.
- N_{user} - Número de subportadoras de dados do usuário.
- E - Eficiência do MCS utilizado.

TABELA III
RELAÇÃO MCS E EFICIÊNCIA DE ACORDO COM A SNR

Modulação	Codificação	Eficiência (bps/Hz)	Bits/Símbolo OFDM	SNR
BPSK	1/2	0,5	88	6,4
	3/4	1,5	280	11,2
QPSK	1/2	1,0	184	9,4
	3/4	1,5	280	11,2
16-QAM	1/2	2,0	376	16,4
	3/4	3,0	568	18,2
64-QAM	2/3	4,0	760	22,7
	3/4	4,5	856	24,4

O valor da SNR pode ser determinado de acordo com a distância em que a SS encontra-se da BS, considerando a potência do sinal no receptor, a potência de ruído térmico e a perda no espaço livre.

A potência do ruído térmico (2) depende da largura de banda e da temperatura do receptor [7].

$$N[dBm] = 10 \log(\tau T F_{\Delta}) \quad (2)$$

Onde:

- F_{Δ} - largura de banda do canal (Hz).
- T - temperatura em Kelvin ($T=293^{\circ}K=20^{\circ}C$)
- τ - constante de Boltzmann ($1,38 \times 10^{-23}$ watt/K*Hz)

Assumindo transmissores perfeitos, a perda no espaço livre (3) depende da distância (4) e do comprimento de onda. A potência do sinal no receptor (5) e a SNR (6) podem ser obtidas a partir da potência do sinal transmitido [8].

$$L_F = 20 * \log\left(\frac{4\pi d}{\lambda}\right) [dB] \quad (3)$$

$$d = \frac{\lambda * 10^{\frac{P_r[dBm] - SNR[dB] - N[dBm]}{20}}}{4\pi} \quad (4)$$

$$P_r[dBm] = P_t[dBm] - L_F[dB] \quad (5)$$

$$SNR = P_r[dBm] - N[dBm] \quad (6)$$

Onde:

- L_F - perda no espaço livre.
- d - distância entre a BS e a SS.
- λ - comprimento de onda.
- P_r - potência no receptor.
- P_t - potência no transmissor.

A taxa de transmissão do canal de *uplink* será determinada pela equação (7), considerando os parâmetros definidos para cada simulação, conforme especificações das Tabelas III e IV.

$$T_{UL} = (1/T_S * bpsymbol) / 2 \quad (7)$$

Onde:

- T_{UL} - Taxa de transmissão *uplink*.
- T_S - Tempo do símbolo OFDM.
- $bpsymbol$ - Bits por símbolo OFDM.

Considerando a frequência de operação de 5 GHz e a largura de banda do canal de 20 MHz, tem-se, usando a equação (2), que a potência do ruído térmico é de 8×10^{-14} W, equivalendo a -100,9 dBm. A partir dos valores da SNR apresentados na Tabela III, determina-se a distância (4).

Tomando a potência do transmissor de 1 W (30 dBm), que é a máxima permitida para um sistema com potência de radiação isotrópica (EIRP), tem-se a relação da SNR versus a distância da SS em relação à BS conforme mostrada na Figura 2.

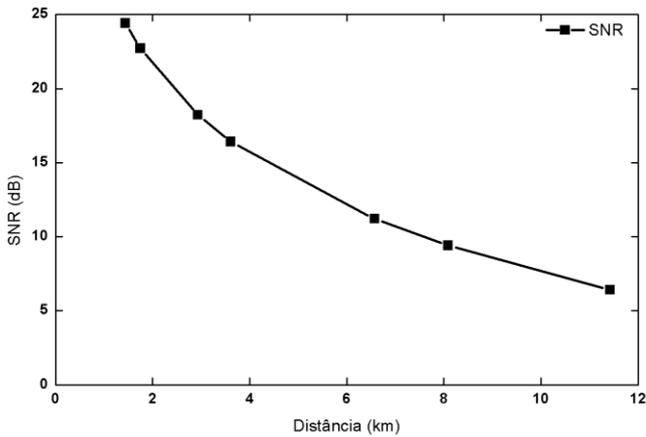


Fig. 2 – Relação SNR (dB) no receptor vs. Distância entre BS e SS (km)

2) *Relação entre as camadas MAC e PHY*: foi implementado o relacionamento entre as camadas MAC e PHY a fim de permitir a seleção dos MCSs em cada rajada de acordo com o valor da SNR definido quando a SS entra na rede, conforme os valores indicados na Tabela III. Os parâmetros OFDM são definidos a partir da largura de banda do canal e o valor do prefixo cíclico (CP), conforme apresentados na Tabela IV, através da relação MAC/PHY executada pelos algoritmos Define Parâmetros PHY_OFDM e Define Parâmetros da Modulação OFDM.

TABELA IV
PARÂMETROS DA CAMADA FÍSICA OFDM

Descrição	Valor Utilizado
Largura de banda do canal	20 MHz
Prefixo Cíclico (CP)	0,25
Modelo de Propagação	<i>Two Ray Ground</i>
Número de Subportadoras	256
Subportadoras de dados do usuário	192
Fator de Amostragem (144/125)	1,152
Frequência de amostragem (n*BW)	23,04 MHz
Espaçamento das subportadoras	90 KHz
Duração do <i>Frame</i>	5 ms
Duração do Símbolo	13,9 μs
Tamanho do <i>minislot</i>	55,6 μs

ALGORITMO DEFINE PARÂMETROS PHY_OFDM

entrada:

BW = largura de banda do canal
G = prefixo cíclico
FFT = número de subportadoras
n = fator de amostragem
snr_ss = valor da snr na ss

saída:

Ts = Tempo do símbolo OFDM
m_size = tamanho do *minislot*

1. **início**
2. $F_s = n * BW$
3. $\Delta F = F_s / N_{FFT}$
4. $T_s = (1 + G) (FFT / F_s)$
5. Define Parâmetros da Modulação OFDM (snr_ss)
6. $Data_rate = (1 / T_s * bpsymbol) / 8$
7. $m_size = Data_rate * T_s * 4$
8. **fim**

ALGORITMO DEFINE PARÂMETROS DA MODULAÇÃO OFDM

entrada:

snr_ss = valor da snr na ss

saída:

bpsymbol = bits por símbolo OFDM
mcs = esquema de modulação e codificação

1. **início**
2. mcs = BPSK_1/2 // default
3. bpsymbol = 88 // default
4. v_mod[6] = {QPSK_1/2, QPSK_3/4, 16QAM_1/2, 16QAM_3/4, 64QAM_2/3, 64QAM_3/4}
5. v_snr[6] = {9.4, 11.2, 16.4, 18.2, 22.7, 24.4}
6. v_bps[6] = {184, 280, 376, 568, 760, 856}
7. **para** (i = 1 até i = 6) **faça**
8. **se** (snr_ss >= snr[i])
9. mcs = v_mod[i]
10. bpsymbol = v_bps[i]
11. **fim.se**
12. **fim.para**
13. retorna (mcs, bpsymbol)
14. **fim**

No domínio da frequência, cada símbolo OFDM é criado através do mapeamento da sequência de símbolos nas múltiplas subportadoras. Todavia, elas são transparentes para a camada MAC porque o símbolo utiliza todas as subportadoras e mapeia diretamente para o *slot*, sendo vistas pelo escalonador como um canal lógico [9]. No *uplink*, a unidade de alocação padrão é o *minislot*, o qual tem o seu tamanho definido por um agrupamento de *slots*. O *frame* tem duração fixa e a sua divisão em *subframe downlink* e *subframe uplink* utiliza a razão 1:1.

IV. SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os cenários analisados são compostos por uma BS e um número variável de SSs distanciadas aleatoriamente da BS conforme ilustrado na Figura 3. Foram considerados os parâmetros WiMAX descritos nas Tabelas III e IV, e um tempo de 200s em cada intervalo de simulação. O modelo de propagação utilizado fornece bons resultados para distâncias envolvidas no ambiente modelado.

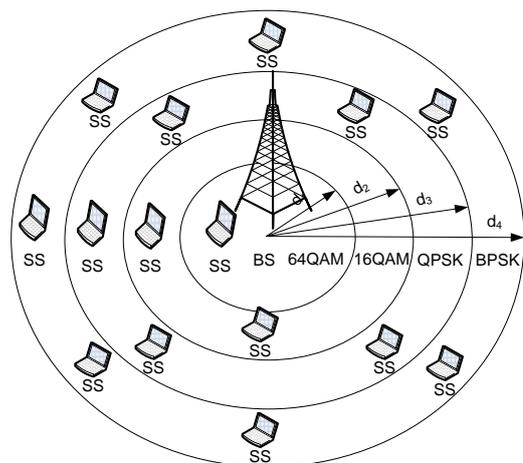


Fig. 3 – Posicionamento das SSs em relação à BS e ao MCS utilizado

São utilizadas fontes de tráfego para simular as aplicações de voz, vídeo, FTP e Web, as quais são mapeadas na camada MAC para as classes de serviço UGS, rtPS, nrtPS e BE, respectivamente. O tráfego de voz é modelado por uma fonte *on/off* com detecção de voz ativa (DVA). Durante os períodos *on* são gerados pacotes de 66 bytes a cada 20 ms, seguindo uma distribuição exponencial, com médias 1,2 e 1,8, respectivamente [10], com o atraso máximo definido para 20ms. Pacotes de tamanhos variando entre 200 e 1000 bytes a uma taxa de 600 kbps são gerados periodicamente simulando o tráfego de vídeo MPEG, com uma latência máxima definida de 100ms. O tráfego FTP é gerado utilizando uma distribuição exponencial com média de 512 Kbytes. O tráfego Web é gerado por uma distribuição híbrida Lognormal/Pareto [11].

A. Cenário 1 - Vazão em ambientes com diferentes MCSs

Neste cenário analisa-se a vazão da rede versus a carga de tráfego na rede, considerando MCSs selecionados de acordo com o valor da SNR na SS. Para este cenário, a fonte gera tráfego CBR com pacotes de 1000 bytes e com a taxa ajustada para saturar capacidade do canal. A Figura 4 mostra a vazão na camada MAC levando em conta os diferentes perfis de MCSs na camada física OFDM. Nota-se que enquanto a carga de tráfego aplicada na rede não ultrapassa a capacidade de transmissão proporcionada pelo MCS utilizado, a vazão apresenta um desempenho linear de acordo com a eficiência do MCS, com a curva superior correspondendo à vazão para o MCS 64-QAM 3/4 e a curva inferior representando a vazão para o MCS BPSK 1/2. Após atingir o ponto de saturação da camada MAC, a vazão permanece constante independente do aumento da carga de tráfego aplicada na rede, conforme desempenho apresentado em [8].

A Figura 5 apresenta a vazão calculada na camada física utilizando a equação (7) e a vazão na camada MAC obtida por simulação. Nota-se o mesmo comportamento entre a vazão obtida por simulação e a vazão calculada. O valor inferior apresentado pela vazão simulada é devido ao *overhead* da camada MAC e pelo fato da alocação no *subframe uplink* ser realizada em *minislot*, o qual tem sua capacidade variando de 44 a 107 bytes, conforme o perfil de MCS utilizado, não sendo totalmente preenchidos em todos os frames transmitidos.

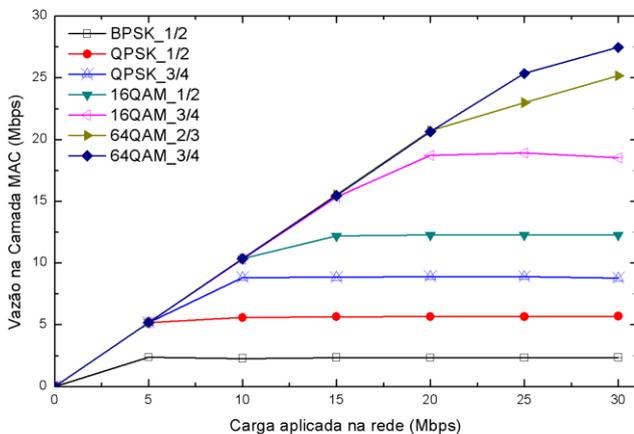


Fig. 4 – Vazão por MCS vs. carga de tráfego na rede

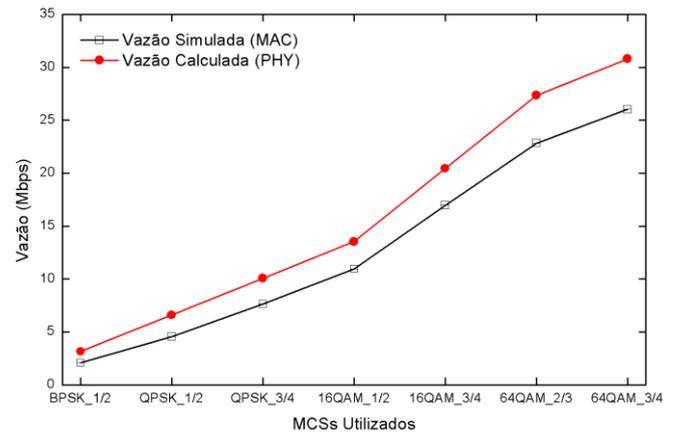


Fig. 5 – Vazão por MCS (Calculada vs. Simulada)

B. Cenário 2 - Ambiente com tráfego homogêneo

O objetivo deste experimento é analisar o percentual de utilização do canal de comunicação operando com a camada física OFDM e a vazão média proporcionada por cada perfil de MCS utilizado. Para tanto, o cenário foi composto por uma BS e o número de SSs variando de 10 a 30 e cada SS com uma conexão nrtPS fornecendo uma taxa média de 600 kbps.

Na Figura 6, tem-se a taxa de utilização do canal aumentando linearmente com a carga de tráfego na rede, com a camada física OFDM permitindo uma vazão na camada MAC acima de 70% de sua capacidade máxima. Esse valor é superior à vazão na camada MAC sem considerar as variações das características do meio físico. No entanto, reflete uma perda na utilização dos minislots alocados no *subframe uplink*. Na Figura 7, a vazão média na camada MAC apresenta um comportamento de acordo com a eficiência espectral proporcionada pela camada física OFDM e o MCS utilizado, conforme a Tabela III. Para o mesmo perfil de MCS, a vazão média diminui com o aumento da carga de tráfego na rede. Contudo, um perfil de MCS mais robusto permite ao sinal de radiofrequência alcançar uma maior distância entre BS e SS.

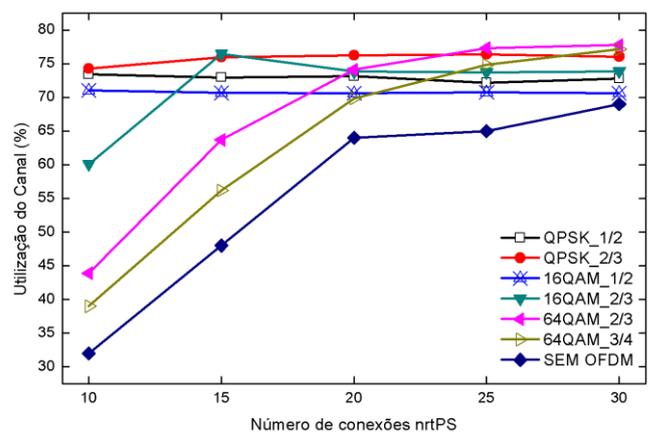


Fig. 6 – Percentual de Utilização do Canal

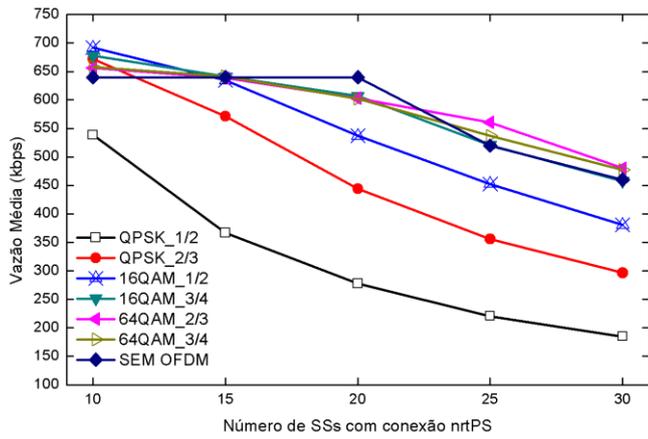


Fig. 7 – Vazão média das conexões nrtPS em relação à carga de tráfego aplicada

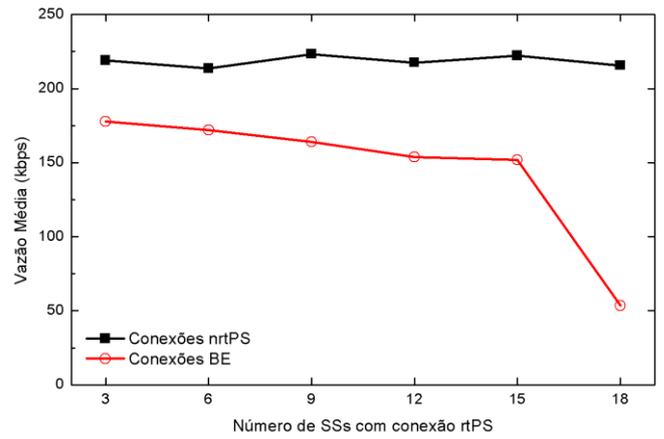


Fig. 9 – Vazão média das conexões nrtPS e BE

C. Cenário 3 - Ambiente com diferentes tráfegos

Para esta análise, foram utilizadas uma BS, 15 SSs com tráfego UGS, 20 SSs com tráfego nrtPS, 20 SSs com tráfego BE, e o número de SSs com tráfego rtPS variando de 3 a 18. Neste cenário, todas as SSs utilizaram o MCS 64-QAM 3/4 e o objetivo é analisar o comportamento do canal quanto à garantia de QoS, quando interage com tráfegos heterogêneos.

A Figura 8 mostra o atraso médio para os tráfegos UGS e rtPS, os quais foram definidos para os valores máximos de 20 e 100 ms, respectivamente. Nota-se que o atraso para o tráfego UGS na simulação é de 10 ms, enquanto o serviço rtPS permanece com um atraso inferior a 60 ms, abaixo dos valores máximos definidos para esses serviços.

A Figura 9 apresenta a vazão média para os tráfegos nrtPS e BE em função do aumento da carga de tráfego rtPS. O serviço nrtPS tem um requisito de banda mínima de 200 kbps, enquanto o serviço BE não tem nenhum requisito de QoS. Nota-se que o tráfego nrtPS é pouco afetado pelo aumento da carga rtPS, mantendo-se acima do requisito de banda mínima estipulado. O serviço BE tem uma queda acentuada em sua vazão, ocasionada pela demanda de largura de banda pelo serviço rtPS que tem maior requisito de QoS.

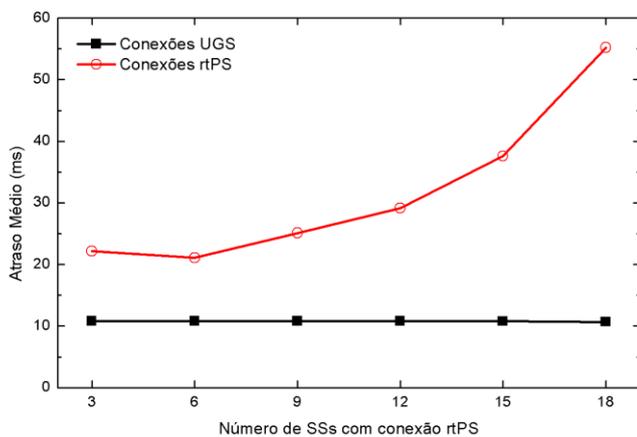


Fig. 8 – Atraso médio das conexões UGS e rtPS

D. Cenário 4 – SSs com MCSs diferentes e serviços de tempo real

Este cenário busca analisar o atraso médio das conexões de serviços de tempo real em função do MCS utilizado. Foram utilizadas uma BS, quatro SSs com conexões rtPS e oito SSs com conexões UGS.

A Figura 10 mostra que o serviço UGS não é afetado pela variação do MCS, pois o mesmo tem sua banda reservada em todas as situações. Todavia, o atraso para o serviço rtPS apresenta uma relação direta com a variação da SNR mostrada na Figura 2. Este comportamento se deve ao fato de o tempo do símbolo OFDM ser constante durante toda a simulação e o *minislot* ter a sua capacidade definida pelo número de bits por símbolo OFDM, definido para cada MCS, conforme mostrado na Tabela III.

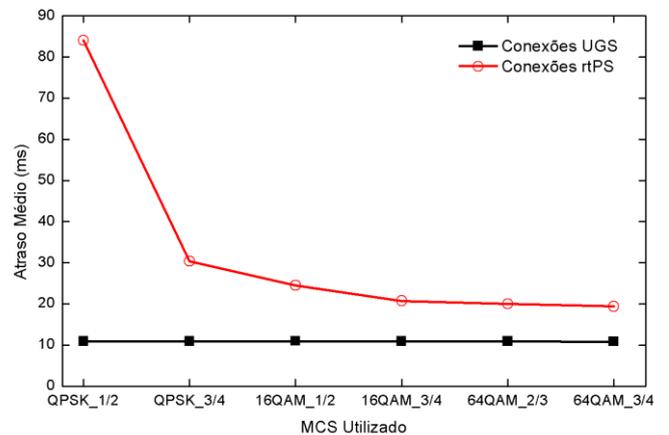


Fig. 10 – Atraso médio das conexões UGS e rtPS vs. MCS utilizado

V. CONCLUSÃO

O padrão IEEE 802.16 especifica a interface aérea para WirelessMAN, definindo os requisitos de QoS para cada classe de serviço da camada MAC e os parâmetros da camada física. Neste artigo propõe-se uma análise mais realística do escalonamento *uplink*, a partir da disciplina PQ, o qual foi estendido para utilizar a camada física OFDM definida pelo

padrão IEEE 802.16, permitindo a utilização de diferentes perfis de MCSs para as SSs. Todavia, canais de comunicação sem fio têm as taxas de transmissão afetadas por fatores, tais como: perda no espaço livre, perda ocasionada pelo ruído térmico, distância entre a BS e a SS e a largura de banda utilizada.

Os resultados obtidos por meio de modelagem e simulação mostraram que a inclusão da camada física OFDM permitiu à BS ajustar a taxa de transmissão UL, selecionando o MCS pelo valor da SNR indicado em cada estação. Isso permitiu ao canal de comunicação atingir um percentual de utilização acima de 70% da capacidade máxima proporcionada pela eficiência do perfil de MCS utilizado, valor superior ao percentual de utilização sem considerar as variações das características do meio físico, comuns nos canais de comunicação sem fio.

Com o adequado dimensionamento da rede para evitar a saturação do canal pela carga de tráfego aplicada, o atraso médio do tráfego UGS não foi afetado pela variação do MCS utilizado e o atraso no tráfego rtPS manteve-se abaixo do limiar máximo definido para essa classe. Em ambientes com tráfegos heterogêneos e utilizando o MCS 64QAM_3/4 para todos os fluxos, o aumento na carga do tráfego rtPS não afetou o atraso das conexões UGS e as conexões rtPS mantiveram um atraso inferior aos 100ms, limiar máximo estipulado para essa classe; as conexões nrtPS apresentaram uma vazão acima da taxa mínima reservada, enquanto a vazão das conexões BE sofreu uma acentuada queda devido ao fato desse tráfego não apresentar garantias de QoS. Trabalhos futuros analisarão o ajuste dos perfis das SSs de forma dinâmica durante a comunicação de acordo com as condições do canal.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Std 802.16-2004, "IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks – Part. 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems", tech. rep., IEEE Computer Society and the IEEE Microwave Theory and Techniques Society, New York, USA, Outubro 2004.
- [2] Q. Liu and X. Wang, "A cross-layer scheduling algorithm with QoS support in wireless networks", *IEEE Transactions on vehicular Technology*, pp. 839-847, Maio 2006.
- [3] M. Ma and et al., *Current Technology Developments of WiMAX Systems*. Singapore: Springer, 2009.
- [4] J. Lu and M. Ma, "A cross-layer elastic CAC and holistic opportunistic scheduling for QoS support in WiMAX", *Computer Networks*, Elsevier, pp. 1-14, Outubro 2009.
- [5] J. F. Borin and N. L. S. da Fonseca, "Um módulo para simulação de redes WiMAX no simulador ns-2", *SBC Workshop em Desempenho de Sistemas Computacionais e de Comunicação, Wperformance*, pp. 180-199, Julho 2008.
- [6] J. G. Andrews, A. Ghosh and R. Muhamed, *Fundamentals of WiMAX: Understanding Broadband Wireless Networking*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007.
- [7] C. Tarhini, T. Chahed. "On capacity of OFDMA-based IEEE 802.16 WiMAX including Adaptive Modulation and Coding (AMC) and inter-cell interference", *15th IEEE Workshop on Local and Metropolitan Area Networks*, pp. 139 - 144, 2007.
- [8] C. Hoymann, "Analysis and performance evaluation of the OFDM-based metropolitan area network IEEE 802.16", *Computer Networks*, Elsevier, pp. 341-363, Junho 2005.
- [9] A. Sayenko, O. Alanen, J. Karhula and T. Hamalainen, "Ensuring the QoS Requirements in 802.16 Scheduling", *International Workshop on Modeling Analysis and Simulation of Wireless and Mobile Systems archive Proceedings of the 9th ACM international symposium on Modeling analysis and simulation of wireless and mobile systems*, pp. 108-117, Outubro 2006.
- [10] P. T. Brady. "A model for generating on-off speech patterns in two-way conversation", *Bell System Technical Journal*, 48 :2445–2472, Setembro 1969.
- [11] J. F. Borin and N. L. S. da Fonseca, "Escalonamento com Qualidade de Serviço em redes IEEE 802.16", *Redes IEEE 802.16 e em Malha, SBRC 2007*, pp. 723-736, 2007.