

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA E
INFORMÁTICA INDUSTRIAL

EDEN RICARDO DOSCIATTI

**UM NOVO ESCALONADOR COM CONTROLE DE ADMISSÃO DE
CONEXÃO PARA O PADRÃO IEEE 802.16 COM GARANTIA DE
LIMITE DE ATRASO**

DISSERTAÇÃO

CURITIBA

2010

EDEN RICARDO DOSCIATTI

**UM NOVO ESCALONADOR COM CONTROLE DE ADMISSÃO DE
CONEXÃO PARA O PADRÃO IEEE 802.16 COM GARANTIA DE
LIMITE DE ATRASO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial da Universidade Tecnológica Federal do Paraná como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Ciências” – Área de Concentração: Telemática.

Orientador: Prof. Dr. Walter Godoy Júnior

Co-orientador: Prof. Dr. Augusto Foronda

CURITIBA

2010

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da UTFPR – Campus Curitiba

D722n Dosciatti, Eden Ricardo
Um novo escalonador com controle de admissão de conexão para o padrão IEEE 802.16 com garantia de limite de atraso / Eden Ricardo Dosciatti. – 2010.
76 f. : il. ; 30 cm

Orientador: Walter Godoy Júnior
Co-orientador: Augusto Foronda
Dissertação (Mestrado) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração: Telemática, Curitiba, 2010
Bibliografia: f. 73-6

1. IEEE 802.16 (Normas). 2. Algoritmos. 3. Sistemas de comunicação em banda larga. 4. Controle de admissão de conexão. 5. Telemática. I. Godoy Júnior, Walter, 1941-, orient. II. Foronda, Augusto, co-orient. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial. Área de Concentração em Telemática. IV. Título.

CDD 620.1

Título da Dissertação Nº 526:

**“Um novo escalonador com controle de admissão
de conexão para o padrão IEEE 802.16 com garantia
de limite de atraso”**

por

Eden Ricardo Dosciati

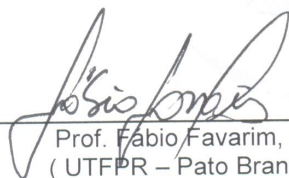
Esta dissertação foi apresentada, às 09h do dia 20 de abril de 2010, como requisito parcial à obtenção do grau de MESTRE EM CIÊNCIAS – Área de Concentração: Telemática, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial – CPGEI – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR – Campus Curitiba. O trabalho foi aprovado pela Banca Examinadora.



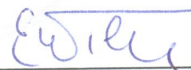
Prof. Walter Godoy Junior, Dr.
(Presidente – UTFPR)



Prof. Luiz Carlos Pessoa Albini, Dr.
(UFPR)



Prof. Fábio Favarim, Dr.
(UTFPR – Pato Branco)



Prof. Emilio Carlos Gomes Wille
(UTFPR)

Visto da coordenação:



Prof. Fábio Kurt Schneider, Dr.
(Coordenador do CPGEI)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, Jesus, Santa Rita de Cássia e Santa Paulina por guiarem o meu caminho e por colocarem pessoas especiais e do bem neste caminho.

Agradeço a todos que, direta ou indiretamente, tornaram este trabalho possível de ser realizado, em especial a minha querida e amada esposa Mariza, que sempre soube que um dia eu estaria escrevendo essa página de agradecimentos.

Aos meus pais, Protásio (sempre presente) e Deulinda, e toda minha família: Carlos, Gile, Laura, Marcelo, Rita e Julia. Agradeço por todos os ensinamentos de vida que cada um, de sua maneira, me propiciaram e fizeram chegar a esse momento.

Aos colegas de trabalho da COINF, que sempre entenderam e sempre me liberaram para terminar essa dissertação.

Ao NATEC, e todas as pessoas envolvidas, principalmente meu co-orientador Professor Doutor Augusto Foronda, que acreditou e trabalhou junto na realização desse trabalho.

Em especial, agradeço ao Professor Doutor Walter Godoy Júnior, meu orientador, que foi aquele que confiou na minha vontade e dedicação de tornar esse trabalho possível.

E, finalmente, agradeço aos meus amigos, que são especiais em todos os momentos de minha vida, principalmente quando precisamos deles.

“Embora ninguém possa voltar atrás e fazer um novo começo, qualquer um pode começar agora e fazer um novo fim.”

Chico Xavier

“Nunca jamais desanimeis embora venham ventos contrários.”

Santa Paulina

RESUMO

DOSCIATTI, Eden Ricardo. Um novo escalonador com controle de admissão de conexão para o padrão IEEE 802.16 com garantia de limite de atraso. 77 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

O grupo de trabalho do IEEE 802.16 está desenvolvendo um padrão para redes de acesso banda larga sem fio em redes metropolitanas, também conhecido como *WiMAX*. Uma das características da camada MAC (*Media Access Control*) desse padrão, é que ela foi projetada para diferenciar o serviço entre as categorias de tráfego com diferentes requisitos de multimídia. Com base nessa premissa e considerando que a norma não especifica um algoritmo de escalonamento, um novo escalonador com controle de admissão de conexão foi proposto com base na teoria do servidor *Latency-Rate (LR)* e características do sistema especificadas pela norma para sistemas utilizando a interface aérea *WirelessMAN-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)*. O algoritmo de escalonamento proposto calcula o tempo do quadro (*TF - Time Frame*) com o objetivo de maximizar o número de estações alocadas no sistema e ao mesmo tempo garantir o atraso solicitado para cada usuário. Propriedades desta proposta foram investigadas teoricamente e através de simulações. Um conjunto de simulações é apresentado com fluxos de taxa de bits constante (*CBR - Constant Bit Rate*) e taxa de bits variável (*VBR - Variable Bit Rate*) e as comparações de desempenho com diferentes atrasos (*delay*) e diferentes TFs. Os resultados mostraram que o limite de atraso superior pode ser alcançado por uma grande variedade de cargas na rede, com otimização da largura de banda.

Palavras-chave: IEEE 802.16. Algoritmos de escalonamento. Limite de atraso. Otimização. Controle de Admissão de Conexão (CAC).

ABSTRACT

DOSCIATTI, Eden Ricardo. A new scheduler with call admission control (CAC) for IEEE 802.16 with delay bound guaranteed. 77 f. Dissertação – Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2010.

The IEEE 802.16 Working Group on Broadband Wireless Access is developing a standard for broadband wireless access networks in Metropolitan Area Network (MAN), also known as WiMAX. One of the features of the MAC (Media Access Control) layer is that it was designed to differentiate service among traffic categories with different multimedia requirements. Based on these assumptions and considering that the standard does not specify a scheduling algorithm, a new scheduler with admission control connection has been proposed based on Latency-Rate (LR) server theory and system characteristics specified by the standard for systems using the WirelessMAN-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) air interface. The proposed scheduling algorithm calculates the Time Frame (TF) in order to maximize the number of stations allocated in the system while guarantee the delay required for each user. Properties of this proposal have been investigated theoretically and through simulations. A set of simulations is presented with streams of Constant Bit Rate (CBR) and Variable Bit Rate (VBR) and performance comparisons with different delays and different TFs. The results showed that the upper limit of delay can be achieved by a variety of loads in the network, optimizing the bandwidth.

Keywords: IEEE 802.16. scheduling algorithm. delay bound. optimization. Call Admission Control (CAC).

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – CENÁRIO DE APLICAÇÃO DO PADRÃO IEEE 802.16	18
FIGURA 2 – REDE IEEE 802.16 COM ESTAÇÕES BASE (BS) E ESTAÇÕES CLIENTE (SS)	24
FIGURA 3 – TOPOLOGIAS PERMITIDAS PELO PADRÃO IEEE 802.16	25
FIGURA 4 – MODELO DE REFERÊNCIA DO PADRÃO IEEE 802.16	26
FIGURA 5 – ESPECTRO DE UM SINAL QAM	29
FIGURA 6 – SUBPORTADORAS DE UM SINAL OFDM	30
FIGURA 7 – ESPECTROS FDM CONVENCIONAL E OFDM	30
FIGURA 8 – SUBPORTADORAS NO DOMÍNIO DO TEMPO	31
FIGURA 9 – QUADRO PARA CÁLCULO DO SÍMBOLO OFDM	33
FIGURA 10 – DESCRIÇÃO DAS PORTADORAS OFDM	35
FIGURA 11 – PREFIXO CÍCLICO	35
FIGURA 12 – TÉCNICAS DE DUPLEXAGEM PARA ALOCAÇÃO DE BANDA NO PADRÃO IEEE 802.16	37
FIGURA 13 – ESTRUTURA DO QUADRO TDD	38
FIGURA 14 – ESTRUTURA DO QUADRO MAC NO ESQUEMA DE DUPLEXAÇÃO TDD	39
FIGURA 15 – ESTRUTURA DE ALOCAÇÃO DE BANDA DO PADRÃO IEEE 802.16	39
FIGURA 16 – ARQUITETURA DE QOS DO PADRÃO IEEE 802.16	41
FIGURA 17 – REDE SEM FIO COM O NOVO ESCALONADOR COM CONTROLE DE ADMISSÃO DE CONEXÃO	49
FIGURA 18 – ATRASO MÁXIMO D_I	50
FIGURA 19 – TRÁFEGO DE ENTRADA COM O BALDE DE FICHAS	51
FIGURA 20 – ESTRUTURA DO QUADRO TDD COM ALOCAÇÃO DAS FÓRMULAS	53
FIGURA 21 – MODELO DE ESCALONAMENTO DO TF UTILIZANDO A DISCIPLINA RR	55
FIGURA 22 – VALOR DO TF ÓTIMO	57
FIGURA 23 – NÚMERO DE SSS ALOCADAS PARA O ATRASO REQUERIDO DE 5 MS	58
FIGURA 24 – NÚMERO DE SSS ALOCADAS PARA O ATRASO REQUERIDO DE 10 MS	59
FIGURA 25 – NÚMERO DE SSS ALOCADAS PARA O ATRASO REQUERIDO DE 15 MS	60
FIGURA 26 – NÚMERO DE SSS ALOCADAS PARA O ATRASO REQUERIDO DE 20 MS	60
FIGURA 27 – USUÁRIOS ALOCADOS COM VÁRIOS TFS E TF ÓTIMO PARA O TRÁFEGO DE ÁUDIO	61
FIGURA 28 – TOPOLOGIA DA REDE IEEE 802.16 UTILIZADA NA SIMULAÇÃO	62
FIGURA 29 – ATRASO MÁXIMO GARANTIDO PARA TF ÓTIMO DE 3 MS E ATRASO DE 5 MS	63
FIGURA 30 – ATRASO MÁXIMO GARANTIDO PARA TF ÓTIMO DE 6.5 MS E	

ATRASSO DE 10 <i>MS</i>	64
FIGURA 31 – ATRASO MÁXIMO GARANTIDO PARA TF ÓTIMO DE 10.5 <i>MS</i> E ATRASO DE 15 <i>MS</i>	64
FIGURA 32 – ATRASO MÁXIMO GARANTIDO PARA TF ÓTIMO DE 15 <i>MS</i> E ATRASO DE 20 <i>MS</i>	65
FIGURA 33 – ATRASO REQUERIDO, TF ÓTIMO E A MÉDIA DO ATRASO GARANTIDO NOS TRÊS TIPOS DE TRÁFEGO	66
FIGURA 34 – COMPARAÇÃO DE ALOCAÇÃO DE USUÁRIOS DE Dosciatti, Godoy-Júnior e Foronda (2010) COM Iyengar, Iyer e Sikdar (2005)	67
FIGURA 35 – COMPARAÇÃO DE ALOCAÇÃO DE USUÁRIOS DE Dosciatti, Godoy-Júnior e Foronda (2010) COM Iyengar, Iyer e Sikdar (2005)	68

LISTA DE TABELAS

TABELA 1	–	COMPARAÇÃO DOS PADRÕES IEEE 802.16, IEEE 802.16A/D, IEEE 802.16E	24
TABELA 2	–	COMPOSIÇÃO DO SÍMBOLO OFDM	34
TABELA 3	–	TERMOS UTILIZADOS NA COMPOSIÇÃO DE UM SÍMBOLO OFDM	36
TABELA 4	–	COMPARAÇÃO ENTRE OS TRABALHOS RELACIONADOS E O NOVO ESCALONADOR	45
TABELA 5	–	RESUMO DOS ESCALONADORES DOS TRABALHOS RELACIONADOS	45
TABELA 6	–	PARÂMETROS DAS CAMADAS PHY E MAC	56
TABELA 7	–	PARÂMETROS DO BALDE DE FICHAS	57
TABELA 8	–	DESCRIÇÃO DE DIFERENTES TRÁFEGOS	63
TABELA 9	–	TRÁFEGO DE ÁUDIO	65
TABELA 10	–	TRÁFEGO DE VÍDEO VBR	66
TABELA 11	–	TRÁFEGO DE VÍDEO MPEG4	66
TABELA 12	–	PARÂMETROS UTILIZADOS PARA AS COMPARAÇÕES	67

LISTA DE SIGLAS

ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
ARQ	<i>Automatic Repeat Request</i>
Band AMC	<i>Band Amplitude Modulation and Coding</i>
BE	<i>Best Effort</i>
BS	<i>Base Station</i>
BWA	<i>Broadband Wireless Access</i>
CAC	<i>Controle de Admissão de Conexão</i>
CBR	<i>Constant Bit Rate</i>
CID	<i>Connection Identifier</i>
CPS	<i>Common Part Sublayer</i>
CS	<i>Convergence Sublayer</i>
CS SAP	<i>Convergence Sublayer Service Access Point</i>
DCD	<i>Downlink Channel Descriptor</i>
DL	<i>Downlink</i>
DL-FUSC	<i>Downlink Full Usage of Subcarriers</i>
DL-MAP	<i>Downlink Map</i>
DL-PUSC	<i>Downlink Partial Usage of Subcarriers</i>
FCH	<i>Frame Control Header</i>
FDD	<i>Frequency Division Duplexing</i>
FDM	<i>Frequency Division Multiplexing</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FTP	<i>File Transfer Protocol</i>
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
ICI	<i>Intercarrier Interference</i>
IE	<i>Information Element</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
IFFT	<i>Inverse Fast Fourier Transform</i>
IP	<i>Internet Protocol</i>
ISI	<i>Intersymbol Interference</i>
LOS	<i>Line of Sight</i>

LMDS	<i>Local Multipoint Distribution System</i>
LR	<i>Latency Rate</i>
MAC	<i>Medium Access Control</i>
MIMO	<i>Multiple-Input Multiple-Output</i>
nrtPS	<i>non-real-time Polling Service</i>
NLOS	<i>Non Line Of Sight</i>
OFDM	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PHY	<i>Physical Layer</i>
PMP	<i>Point-to-MultiPoint</i>
POP	<i>Ponto de Presença</i>
PSK	<i>Phase Shift Keying</i>
QAM	<i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RTG	<i>Receiver-transmitter Turnaround Gap</i>
rtPS	<i>real-time Polling Service</i>
S-OFDMA	<i>Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
SCa	<i>Single Carrier Adaptative</i>
SC	<i>Single Carrier</i>
SDU	<i>Service Data Units</i>
SS	<i>Subscriber Station</i>
TDD	<i>Time Division Duplexing</i>
TDMA	<i>Time Division Multiple Access</i>
TF	<i>Time Frame</i>
TTG	<i>Transmitter-receiver Turnaround Gap</i>
UCD	<i>Uplink Channel Descriptor</i>
UGS	<i>Unsolicited Grant Service</i>
UL	<i>Uplink</i>
UL-MAP	<i>Uplink Map</i>
UL-PUSC	<i>Uplink Partial Usage of Subcarriers</i>
VBR	<i>Variable Bit Rate</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
WAN	<i>World Area Network</i>
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>

WMAN	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WMAN-HUMAN	<i>WirelessMAN High-speed Unlicensed MAN</i>
WMAN-OFDM	<i>WirelessMAN Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
WMAN-OFDMA	<i>WirelessMAN Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access</i>
WMAN-SC	<i>WirelessMAN Single Carrier</i>
WMAN-SCa	<i>WirelessMAN Single Carrier adaptative</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

N	Número total de símbolos OFDM no quadro MAC
S_{OFDM}	Número de símbolos OFDM utilizados somente para dados
T_s	Duração do símbolo OFDM
T_b	Tempo útil do símbolo OFDM
T_g	Prefixo cíclico
G	Intervalo do protetor
BW	Largura de banda nominal do canal (Hz)
F_s	Frequência de amostragem (Hz)
n	Fator de amostragem
N_{FFT}	Número de pontos para a modulação OFDM
Δf	Distância entre duas portadoras adjacentes (Hz)
r_i	Taxa alocada do servidor
θ_i	Latência do escalonador
σ	Tamanho do balde de fichas
ρ	Taxa do balde de fichas
D_i	Atraso máximo
T_{TTG}	Intervalo de tempo entre o subquadro de <i>downlink</i> e <i>uplink</i>
T_{RTG}	Intervalo de tempo entre o subquadro de <i>uplink</i> e <i>downlink</i>
T_{DL}	Tempo do sub-quadro de <i>downlink</i>
T_{UL}	Tempo do sub-quadro de <i>uplink</i>
$L_{max,i}$	Tamanho máximo de um pacote
R	Capacidade física do canal
$D_{max,i}$	Atraso requerido pelo usuário
D_{bound}	Limite de atraso

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	CONTEXTO	17
1.2	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	18
1.3	OBJETIVOS DO TRABALHO	19
1.3.1	Objetivo Geral	19
1.3.2	Objetivos Específicos	19
1.4	CONTRIBUIÇÕES	20
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	20
2	UMA VISÃO GERAL DO PADRÃO IEEE 802.16	21
2.1	A FAMÍLIA IEEE 802.16	22
2.2	ARQUITETURA E TOPOLOGIA	24
2.3	MODELO DE REFERÊNCIA	26
2.4	CAMADA FÍSICA (PHY)	28
2.4.1	Modulação OFDM	28
2.4.2	Concepção Básica da Técnica OFDM	29
2.4.3	Criação do Símbolo OFDM	31
2.4.4	Cálculo do Número de Símbolos OFDM Utilizados para Transmissão de Dados	33
2.4.5	Parâmetros Primitivos para o Cálculo de um Símbolo OFDM em WiMAX	34
2.5	CAMADA DE CONTROLE DE ACESSO AO MEIO (MAC)	37
2.6	QUALIDADE DE SERVIÇO - QOS	40
2.7	TRABALHOS RELACIONADOS	42
3	DESCRIÇÃO DO NOVO ESCALONADOR PROPOSTO	47
3.1	SERVIDOR <i>LATENCY-RATE (LR)</i>	47
3.2	MECANISMO <i>TOKEN BUCKET</i>	49
3.3	MODELO ANALÍTICO DO NOVO ESCALONADOR	49
3.4	DESCRIÇÃO DO CONTROLE DE ADMISSÃO DE CONEXÃO	51
3.5	DESCRIÇÃO DO ESCALONAMENTO	55
4	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO	56
4.1	CÁLCULO DO TEMPO DO QUADRO (TF) ÓTIMO E QUANTIDADE MÁXIMA DE USUÁRIOS ALOCADOS EM CADA QUADRO	56
4.1.1	Comparação da Alocação de Usuários no TF Ótimo	61
4.2	ATRASSO MÁXIMO GARANTIDO	62
4.2.1	Cenário de Avaliação e Validação do Modelo	62
4.2.2	Comparação do Novo Escalonador Proposto (DOSCIATTI; GODOY-JÚNIOR; FORONDA, 2010) com Outros Escalonadores	67
5	CONCLUSÃO	69
5.1	REVISÃO DOS OBJETIVOS E DIFICULDADES ENCONTRADAS	69
5.2	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONTRIBUIÇÕES	70
5.3	TRABALHOS FUTUROS	70
	ANEXO A – ESTRUTURA DO SIMULADOR	72
	REFERÊNCIAS	74

1 INTRODUÇÃO

O grupo de trabalho do IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*), que está desenvolvendo o padrão IEEE 802.16 (IEEE 802.16-2004, 2004), determinou que desde o princípio fosse elaborado um padrão visando fornecer uma alternativa de acesso em banda larga com desempenho e serviços iguais ou até melhores que as tecnologias cabeadas. Além disso, que esta tecnologia também fosse capaz de atender restrições de aplicações multimídia, como largura de banda mínima, atraso máximo, entre outros. Devido a sua grande cobertura e elevada capacidade de transmissão de dados, o padrão é competitivo até mesmo em ambientes onde as demais tecnologias já estão consolidadas. Em especial, em algumas regiões rurais onde a população não tem acesso nem mesmo à estrutura básica de telefonia, soluções baseadas em WMAN (*Wireless Metropolitan Area Network*) tornam-se a única alternativa.

Dessa forma, a crescente demanda por serviços multimídia e Internet de elevada velocidade e a busca por novas tecnologias de rede de acesso sem fio, fez surgir um mercado de usuários corporativos e residenciais ansiosos por novas tecnologias que ofereçam acesso de banda larga de forma eficiente e com baixo custo de implantação e manutenção. Também, com o avanço dessas tecnologias de rede de acesso sem fio, um novo cenário surgiu, no qual os usuários de dispositivos portáteis demandam de conectividade à rede, a qualquer hora, em qualquer lugar. Tais usuários fazem uso da rede para executar serviços ubíquos¹, heterogêneos e com garantia de QoS (*Quality of Service*) para suas aplicações multimídia.

No entanto, apesar das diversas vantagens das redes de acesso sem fio, como o baixo custo de implantação e manutenção, facilidade de configuração e possibilidade de mobilidade dos dispositivos, existem desafios que devem ser superados para alavancar a disseminação desse tipo de rede. Segundo Sun et al. (2005), o aumento da implantação de infraestrutura sem fio está habilitando uma variedade de novas aplicações, que necessitam de suporte flexível, mas também robusto, por parte da rede, como por exemplo, aplicações multimídia, que incluem fluxo de vídeo e voz sobre IP (VoIP - *Voice over Internet Protocol*), entre outros, e que sempre

¹O termo ubíquo é usado para exprimir que tanto os computadores, como a computação estarão presentes em qualquer lugar e embutidos nas estruturas de nossas vidas.

demandam entrega de dados em tempo real.

Esse capítulo apresenta o contexto ao qual esse tema se encaixa; uma breve introdução sobre a caracterização do problema abordado; os objetivos desse trabalho; as contribuições que esse trabalho vai oferecer; e, finalmente, a estrutura do restante da dissertação.

1.1 CONTEXTO

A difusão do acesso à Internet de elevada velocidade caracteriza-se como a nova fronteira do desenvolvimento nesta segunda década do século XXI. Conhecida também como Internet banda larga, é eficaz na redução das barreiras físicas e do conhecimento, bem como dos custos de transação em uma economia, sendo fator fundamental de incentivo à competitividade (FIRJAN, 2010). Nas grandes cidades, a maior parte das conexões ainda são feitas a partir de redes cabeadas, sejam de telefone, através da tecnologia ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*)(BINGHAM, 2000) ou sejam através da Internet via televisão a cabo (IETF, 2007), exigindo que exista toda uma infraestrutura para que a velocidade de transmissão de dados alcançada seja elevada. Por causa disso, muitas cidades acabam privadas de uma Internet rápida, já que o investimento necessário para cabear toda uma região não compensaria os retornos financeiros que a empresa provedora conseguiria com a quantidade de usuários em áreas menos populadas. Uma das possíveis soluções, para se diminuir o custo de implantação de banda larga em áreas sem a infraestrutura necessária, é se aproveitar de tecnologias sem fio, pois assim, não é preciso instalar cabeamento, reduzindo tanto o tempo de implantação quanto o custo (GOSH et al., 2005).

Essa é uma das motivações por trás da criação do padrão IEEE 802.16 (IEEE 802.16-2004, 2004), também conhecido como WiMAX, acrônimo de *Worldwide Interoperability for Microwave Access*, padrão que o IEEE vem desenvolvendo para as redes metropolitanas sem fio WMAN, tendo seu desenvolvimento iniciado em 1998 e com a primeira versão da especificação pronta em 2001. A tecnologia WiMAX, como provedora de serviços, irá gerar novas alternativas para aplicações como: serviço de telefonia, distribuição de sinais de TV (broadcast) e acesso de banda larga à Internet para usuários residenciais, comerciais, industriais e de centros universitários. Assim, esse é um novo nicho de mercado que está revolucionando as empresas de telecomunicação e os fabricantes de equipamentos de interconexão (EKLUND et al., 2002). Além disso, a tecnologia WiMAX permite a conexão em banda larga em regiões de difícil acesso ou carente de infraestrutura, uma vez que ela não requer instalações físicas complexas ou a conexão via cabo como nas tecnologias tradicionais (WIMAX, 2009).

Como se observa na Figura 1, o tráfego sem fio é transmitido entre as estações clientes e uma estação base. Estes clientes podem ser usuários domésticos ou um centro comercial acessando a Internet, várias escolas de um município, situadas em uma zona suburbana, conectadas ao núcleo de ensino situado na zona urbana, ou mesmo uma empresa que esteja situada em uma zona rural da cidade que queira acessar a rede mundial.

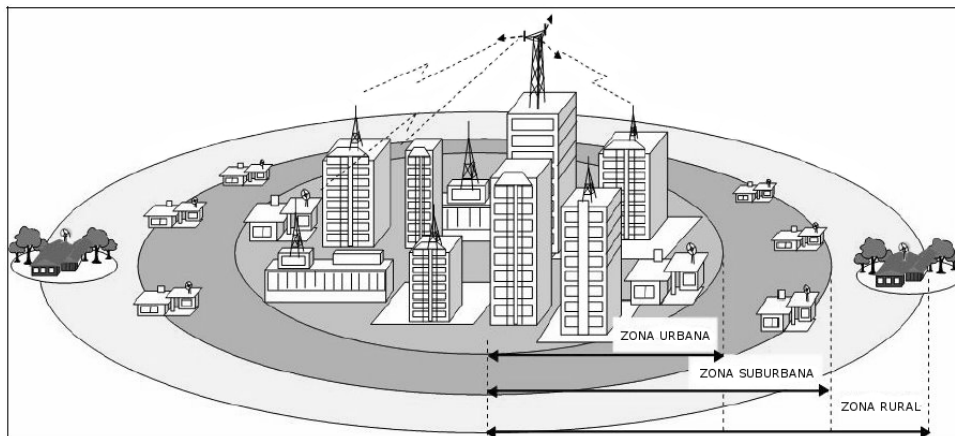


Figura 1 - Cenário de aplicação do padrão IEEE 802.16

Fonte: adaptado de (TEMPORIM, 2007).

1.2 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O desenvolvimento da tecnologia WiMAX foi motivado pela crescente necessidade de elevada velocidade, onde a tecnologia sem fio é uma opção para fornecer uma solução de custo eficaz que pode ser implantado com rapidez e com grande facilidade de instalação, proporcionando elevada largura de banda para conectividade na última milha², ou seja, a parte final de acesso aos serviços da rede. Para atingir esse objetivo, o padrão IEEE 802.16 propõe um conjunto de mecanismos como, por exemplo, as classes de serviços e as múltiplas possibilidades de adaptação dos sistemas de codificação e modulação com base nas condições do canal (IEEE 802.16-2004, 2004). No entanto, a norma deixa questões em aberto, relacionadas com o gerenciamento de recursos da rede e o escalonamento de pacotes.

Segundo Zweben e Fox (1994), escalonamento é definido como “a seleção entre planos alternativos alocando recursos e atividades em cada instante de tempo, tal que esta designação obedeça às restrições temporais das atividades e as limitações de capacidade de um conjunto de recursos compartilhados”.

²Referência a infraestrutura de comunicação entre o ponto de presença (POP) do provedor de serviço e as localizações onde se encontram os consumidores empresariais ou residenciais, ou seja, a parte final da malha de distribuição dos serviços. Esta é a porção mais cara do serviço, devido aos custos de infraestrutura e instalação.

De acordo com Pinedo (2001), a atividade de escalonamento objetiva alocar uma quantidade de recursos limitados para a execução de uma tarefa no decorrer do tempo, de tal forma, que um ou mais objetivos possam ser alcançados.

Algumas pesquisas desenvolvidas sobre esse tema, seguem uma visão algorítmica para a solução desse problema. Um algoritmo de escalonamento decide qual o próximo pacote que será servido na fila de espera. Este algoritmo é um dos mecanismos responsáveis por distribuir a largura de banda da ligação pelos diferentes fluxos (atribuindo a cada fluxo a largura de banda que foi requerida e disponibilizada).

Uma vez que os algoritmos de escalonamento não estão definidos na especificação do padrão IEEE 802.16, algumas soluções tem sido propostas para fornecer QoS para a tecnologia WiMAX. No Capítulo 2 alguns destes algoritmos de escalonamento são discutidos.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo dessa dissertação é apresentar um novo modelo de escalonamento com controle de admissão de conexão (CAC) para a estação base (*BS - Base Station*) do WiMAX.

1.3.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos desse trabalho, destaca-se:

1. Desenvolver um modelo analítico, baseado na teoria do servidor *Latency-Rate (LR)* (STILIADIS; VARMA, 1998b), onde um tamanho ideal de quadro³ é estimado (nesse trabalho denominado como *TF - Time Frame*) com garantia do atraso solicitado pelo usuário.
2. Maximizar o número de estações alocadas no sistema. Nesse procedimento, todo o cabeçalho (*overhead*) gerado pelas camadas MAC (*Medium Access Control*) e PHY (*Physical Layer*) foi considerado para calcular a duração de cada segmento de tempo⁴.

³Segundo Tanenbaum (2003), todos os pacotes em uma rede são encapsulados em quadros (*frames*) para serem transmitidos. Cada quadro contém um cabeçalho (*header*) de quadro, um campo de carga útil, que conterá o pacote, e um final de quadro, reservado para o total de verificação.

⁴Segmento de tempo é um intervalo de tempo de um símbolo que é utilizado para alocação de recursos em uma rede sem fios.

Os resultados mostram que o limite de atraso superior pode ser respeitado por uma grande variedade de cargas na rede, com otimização da largura de banda ⁵.

Propriedades desse modelo foram investigadas teoricamente e através de simulações. Um conjunto de simulações foi apresentado com fluxos de taxa de bits constante (*CBR - Constant Bit Rate*) e taxa de bits variável (*VBR - Variable Bit Rate*) e as comparações de desempenho com diferentes atrasos (*delay*) e diferentes TFs.

1.4 CONTRIBUIÇÕES

Durante a realização desse trabalho, foi projetado e avaliado um novo escalonador com controle de admissão de conexão para o padrão de redes de acesso sem fio banda larga IEEE 802.16, com o objetivo de garantir o limite de atraso para diferentes tipos de fluxo com requisição de QoS e com otimização da largura de banda. Assim, um modelo analítico foi desenvolvido para calcular um valor ótimo para o TF, onde é alocado um número otimizado de usuários e com garantia de atraso máximo requerido. Após essa etapa, foi desenvolvido um programa na linguagem C (RITCHIE; KERNIGHAN, 1989) para a simulação do atraso máximo garantido.

Em virtude do exposto acima, esse trabalho traz, como principal contribuição, um novo escalonador com controle de admissão de conexão. O desempenho obtido através da análise do seu comportamento em diferentes cenários de validação do modelo, demonstrou que a obtenção de um TF ótimo foi conseguida, juntamente com um atraso máximo garantido, atraso este, definido pelo usuário. Dessa forma, os resultados demonstraram que o novo escalonador com controle de admissão de conexão, garantiu, com sucesso, o limite de atraso e a maximização do número de usuários no ambiente simulado.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esse trabalho está organizado em cinco capítulos. O primeiro capítulo apresenta uma introdução geral sobre o trabalho desenvolvido nessa dissertação. O segundo capítulo é uma introdução detalhada do padrão IEEE 802.16. O modelo analítico de escalonamento de pacotes é proposto e explicado no Capítulo 3. A avaliação do desempenho é mostrada no Capítulo 4 e, finalmente, no Capítulo 5, a conclusão desse trabalho é mostrada, bem como as propostas para futuros trabalhos.

⁵Largura da banda ou apenas banda usualmente se refere à bitrate de uma rede de transferência de dados, ou seja, a quantidade em bits/s que a rede suporta. A denominação banda, designada originalmente a um grupo de frequências é justificada pelo fato de que o limite de transferência de dados de um meio está ligado à largura da banda em hertz.

2 UMA VISÃO GERAL DO PADRÃO IEEE 802.16

Os objetivos que levaram o grupo de trabalho do IEEE 802.16, ao propor a tecnologia WiMAX, além de padronizar as camadas física e de controle de acesso ao meio dessas redes, foram:

- Fornecer uma alternativa de acesso em banda larga com desempenho e serviços iguais ou até melhores que as tecnologias cabeadas;
- Atender restrições de aplicações multimídia, como largura de banda mínima e atraso máximo;
- Atingir uma grande área com elevadas velocidades;
- Diminuir o custo de implantação, manutenção e atualização de banda larga;
- Prover serviços em áreas de difícil implantação de infraestrutura.

A norma IEEE 802.16 (IEEE 802.16-2004, 2004) define a interface sem fio para sistemas fixos, como uma solução para o acesso banda larga sem fio (*Broadband Wireless Access - BWA*). Para promover e certificar a compatibilidade e interoperabilidade entre os equipamentos de acesso sem fio a banda larga, que estejam em conformidade com o padrão IEEE 802.16, foi formado o consórcio *WiMAX Forum* (WIMAX, 2009). Este consórcio tem como função certificar que os equipamentos industriais e produtos comerciais estejam em conformidade entre si e que estejam de acordo com o padrão IEEE 802.16, além de promover o uso desta tecnologia.

Esse capítulo apresenta uma visão geral do padrão IEEE 802.16 e uma descrição das camadas PHY e MAC. Como o escopo do padrão é especificar a interface sem fio, incluindo estas camadas MAC e PHY, para redes metropolitanas sem fio (WMAN), com diferenciação de serviços, é visto que o padrão IEEE 802.16 fornece apenas o suporte para a implementação dessa arquitetura, possibilitando que cada fabricante introduza a sua própria solução. Por fim, são apresentados os trabalhos relacionados ao tema dessa dissertação.

2.1 A FAMÍLIA IEEE 802.16

A versão inicial do padrão IEEE 802.16 opera nas frequências de 10 a 66 GHz e requer visada direta (*LOS - Line Of Sight*). A extensão IEEE 802.16a não requer transmissão com visada direta (*NLOS - Non Line Of Sight*) e permite o uso de frequências mais baixas (2 a 11 GHz), muitas das quais não são licenciadas. Segundo Tanenbaum (2003) O padrão IEEE 802.16 pode alcançar, teoricamente, uma área de 50 Km. As taxas de transmissão de dados podem variar de 50 a 150 Mbps, dependendo da largura de frequência do canal e do tipo de modulação (INTEL, 2005). As emendas ao padrão IEEE 802.16 possibilitaram que uma única estação base ofereça acesso banda larga sem fio (BWA) tanto para terminais fixos quanto móveis. Essas correções preencheram a lacuna entre as elevadas taxas de dados das redes locais sem fio WLAN (*Wireless Local Area Network*) e a alta mobilidade celular das redes metropolitanas sem fios (WMAN). A seguir, a família de padrões que compõem a tecnologia WiMAX é brevemente apresentada:

- IEEE 802.16: Corresponde à especificação original, projetada para padronizar implementações LMDS (*Local Multipoint Distribution System*). É usado em frequências de 10 - 66 GHz.
- IEEE 802.16a: Projetada para atender as frequências nas faixas 2 a 11 GHz. Foi especificado com o objetivo de competir com as tecnologias que oferecem acesso à última milha, como *xDSL* e *cable modems*. Pode obter taxas de transmissão de até 75 Mbps com um alcance máximo de 50 Km. Emprega antenas fixas NLOS.
- IEEE 802.16b: Trata aspectos relativos à qualidade de serviço.
- IEEE 802.16c: Trata de interoperabilidade, protocolos e especificações de testes de conformação.
- IEEE 802.16d: Atualização do padrão IEEE 802.16 que consolida as revisões dos padrões IEEE 802.16a e IEEE 802.16c em um único padrão, substituindo o IEEE 802.16a como o padrão base. Entre as alterações pode-se destacar a provisão de suporte para antenas MIMO (*Multiple-Input Multiple-Output*)⁶ (*Multiple-Input Multiple-Output*), o que

⁶A tecnologia de Múltiplas Entradas e Múltiplas Saídas (*Multiple-Input Multiple-Output*) representam um grupo de aparelhos dotados de sensores acoplados a um processador digital, que é capaz de interpretar o sinal captado pelos sensores através da aplicação de algoritmos que permitem um melhor aproveitamento do sinal, reduzindo o efeito destrutivo da interferência e maximizando o ganho na transmissão do referido sinal. A inovação presente nesse modelo é que as antenas são usadas tanto no transmissor (múltiplas saídas) quanto no receptor (múltiplas entradas). Há uma otimização na hora de o transmissor enviar o sinal, e na hora de o receptor interpretar o sinal. Essa é uma das razões que explicam as elevadas taxas de transmissão que podem ser alcançadas com MIMO.

aumenta a confiabilidade do alcance com multipercurso.

- IEEE 802.16e: Adiciona especificações de mobilidade⁷ (WMANs móveis). Este padrão possui as seguintes características:
 1. camada física (PHY): o WiMAX Móvel utiliza um esquema de modulação conhecido como *S-OFDMA* (*Scalable Orthogonal Frequency Division Multiple Access*), na faixa de 2 a 6 GHz, que permite associar um subconjunto de subportadoras para diferentes usuários possibilitando assim que múltiplos usuários possam conectar-se ao mesmo tempo, na mesma frequência e sem interferência. Cada usuário é tratado separadamente, independente da localização, distância para a estação base, interferência e requisitos de potência;
 2. camada de acesso ao meio (MAC): adicionalmente, o WiMAX Móvel introduz funcionalidades típicas para permitir o *handoff/handover*⁸ entre células assegurando a mobilidade. Em frequências inferiores a 3.5 GHz pode oferecer concorrência à tecnologia celular com alcance de 2 a 5 Km (nas cidades).

A Tabela 1 mostra as características dos padrões IEEE 802.16, IEEE 802.16a/d, IEEE 802.16e.

O padrão 802.16d acabou sendo denominado somente de IEEE 802.16 porque engloba todos as atualizações e revisões anteriores em um único padrão. Esse padrão, WiMAX fixo, é utilizado nesse trabalho, pois trata-se apenas de transmissões de pacotes entre estações (base e clientes) fixas. A incorporação de transmissão de pacotes entre usuários móveis (padrão IEEE 802.16e) e que utilizam a tecnologia *mesh*, será desenvolvida em um trabalho futuro, pois envolvem alterações na camada física, como podem ser vistos em (GINEVAN, 2008; JONES, 2005; LYMAN, 2005).

⁷Esse termo é empregado apenas para aparelhos que se movem rapidamente (dentro de veículos, por exemplo), enquanto o termo “nômade” é empregado para aparelhos que se movem lentamente (uma pessoa se locomovendo a pé).

⁸*Handoff* ou *handover*, sendo o segundo termo mais utilizado na Europa, é o procedimento empregado em redes sem fio para tratar a transição de uma unidade móvel de uma célula para outra de forma transparente ao utilizador. Por exemplo, se um veículo se desloca de uma célula de rádio para uma célula adjacente, a rede entrega a ligação em curso para a nova célula. Este processo é designado por *handoff* (entrega). A controladora da estação base administra esta entrega da ligação ativa dentro da estação base transmissora/receptora administrada pela controladora da estação base ou de uma controladora da estação base a outra controladora da estação base, que controla uma estação base transmissora/receptora vizinha.

Tabela 1 - Comparação dos padrões IEEE 802.16, IEEE 802.16a/d, IEEE 802.16e

	IEEE 802.16	IEEE 802.16a/d	IEEE 802.16e
Homologação	Dezembro de 2001	802.16a - Janeiro de 2003 802.16d - Junho de 2004	Dezembro 2006
Frequência	10 - 66 GHz	2 - 11 GHz	2 - 6 GHz
Condição do Canal	Somente LOS	NLOS e LOS	NLOS e LOS
Taxa de Transmissão	32 - 134 Mbps em canal de 28 MHz	Até 75 Mbps em canal de 20 MHz	Até 15 Mbps em canal de 5 MHz
Modulação	QPSK, 16QAM, 64QAM	OFDM 256 subportadoras, OFDMA QPSK, 16QAM, 64QAM, BPSK	OFDM 256 subportadoras, OFDMA, QPSK, 16QAM, 64QAM, BPSK
Mobilidade	Fixa	Fixa e portátil (nômade)	Mobilidade, <i>roaming</i> regional
Largura de Faixa do Canal	20, 25 e 28 MHz	Entre 1.75 e 20 MHz com até 16 subcanais lógicos	Entre 1.75 e 20 MHz com até 16 subcanais lógicos
Raio da Célula Típico	2 - 5 Km	5 - 10 Km Alcance máximo de 50 Km dependendo do tamanho da antena, seu ganho e potência de transmissão	2 - 5 Km

Fonte: Autoria própria.

2.2 ARQUITETURA E TOPOLOGIA

A arquitetura de uma rede que utiliza o padrão IEEE 802.16 define duas entidades participantes do enlace sem fio: Estação Base (*Base Station - BS*) e Estação Cliente (*Subscriber Station - SS*), como mostra a Figura 2. A BS é o nó central que coordena toda a comunicação e provê conectividade às SSs e são mantidas fixas em torres espalhadas de forma a otimizar a área de cobertura da rede. Tipicamente as BSs são conectadas entre si por uma rede denominada *backhaul*⁹, permitindo que troquem informações entre si.

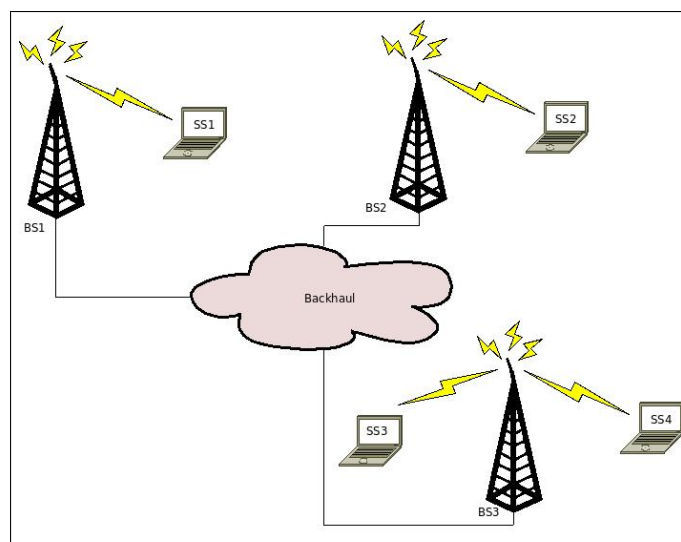


Figura 2 - Rede IEEE 802.16 com estações base (BS) e estações cliente (SS)

Fonte: Autoria própria.

⁹Backhaul, em redes de tecnologia sem fio, é utilizado para conectar as BSs entre si. Estando conectada à Internet, permite que as SSs também obtenham acesso a rede mundial.

As redes baseadas no padrão IEEE 802.16 podem ser estruturadas em dois esquemas:

- **PMP (Point-to-MultiPoint):** toda a comunicação entre as SSs, bem como entre elas e redes externas, acontece por intermédio de um nó central, a BS. Portanto, o tráfego flui apenas entre a BS e as SSs.
- **Mesh:** Todas as SSs comunicam-se entre si sem a necessidade de um nó mediador, ou seja, o tráfego pode ser roteado através das SSs e pode ocorrer diretamente entre duas SSs. Desta forma, todas as estações são pares (*peers*) e cada par pode atuar como roteador para repassar pacotes dos seus nós vizinhos (AKYILDIZ; WANG, 2005).

A Figura 3 mostra um esquema dessas topologias. Esse trabalho somente considera a topologia PMP, uma vez que ela é a implementada pela primeira geração de dispositivos WiMAX e também pelo fato de existir uma forte tendência dos provedores de acesso em adotar a topologia PMP, pois tem-se a possibilidade de controlar os parâmetros da rede de uma maneira centralizada, sem a necessidade de *recall* de todas as estações assinantes (WIMAX, 2009).

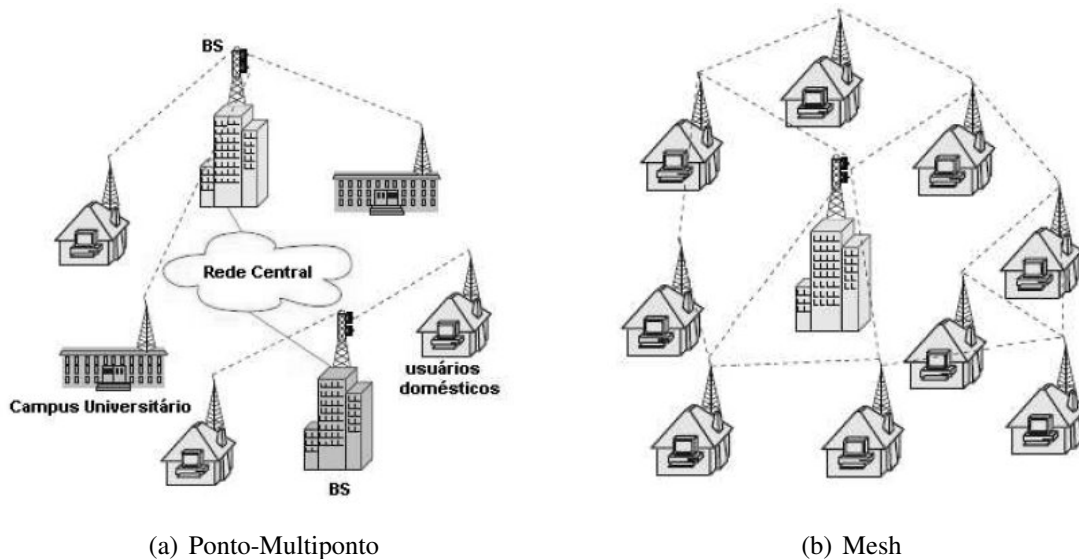


Figura 3 - Topologias permitidas pelo padrão IEEE 802.16

Fonte: (VIEIRA, 2008).

Embora seja referenciado como padrão fixo, o padrão IEEE 802.16 permite que as estações clientes apresentem alguma mobilidade em baixas velocidades. A funcionalidade que falta a este padrão e que justifica sua denominação como fixo é a possibilidade de realização de *handoff/handover*, que permite a uma estação cliente trocar de estação base sem perder a conectividade. Neste caso, costuma-se denominar a estação cliente como estação móvel. A

funcionalidade de *handoff/handover* foi incluída no conjunto de padrões IEEE 802.16 no início de 2006, com a publicação do padrão IEEE 802.16e (IEEE 802.16e-2005, 2005), que automaticamente recebeu a denominação de padrão IEEE 802.16 móvel.

A tecnologia WiMAX foi desenvolvida para alavancar o acesso sem fio à banda larga em redes metropolitanas, oferecendo desempenho comparável às tradicionais tecnologias a cabo e *xDSL* (MACIEL-JUNIOR, 2005). Então, segundo Maciel-Junior (2005), as principais vantagens do padrão IEEE 802.16 são:

- A habilidade de prover serviços em áreas de difícil implantação de infraestrutura;
- Evitar gastos desnecessários com custos de instalações;
- A capacidade de ultrapassar limites físicos, como paredes ou prédios;
- Alta escalabilidade; e
- Baixo custo de atualização e manutenção.

2.3 MODELO DE REFERÊNCIA

O modelo de referência do padrão IEEE 802.16 é composto por uma pilha de protocolo bastante parecida com a maioria das famílias de padrões IEEE 802, porém, contendo um maior número de divisões, como ilustrado na Figura 4.

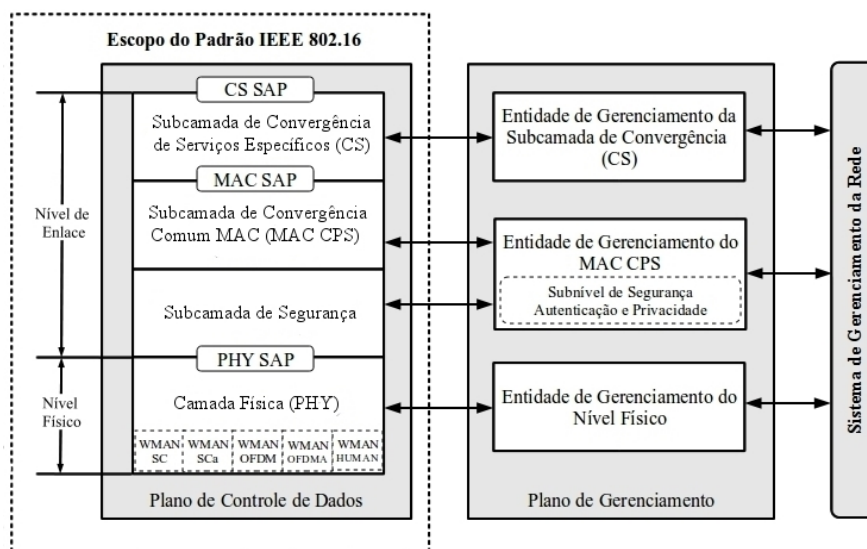


Figura 4 - Modelo de referência do padrão IEEE 802.16

Fonte: adaptado de (IEEE 802.16-2004, 2004).

A pilha de protocolo é dividida em duas partes: a camada física (PHY) e a camada de nível de enlace (MAC).

A camada MAC é dividida em três subcamadas:

- Subcamada de convergência de serviços específicos (*Service Specific Convergence Sub-layer (CS)*): é a interface entre a camada MAC e a camada superior da rede, recebendo pacotes de dados dela, através da *CS Service Access Point (CS SAP)*. Esses pacotes são chamados de *MAC Service Data Units (SDUs)*. A CS é responsável por realizar todas as operações que dependem da natureza da camada superior à camada MAC, como compressão de cabeçalhos e mapeamento de endereços de identificadores. Pode ser vista como uma camada de adaptação que mascara o protocolo da camada superior e seus requisitos para o resto das camadas MAC e PHY de uma rede padrão IEEE 802.16. A CS é especificada para a rede à qual a subcamada MAC está conectada.
- Subcamada de convergência comum (*MAC Common Part Sublayer (CPS)*): realiza todas as operações independentes das camadas superiores, como fragmentação e concatenação de SDUs, controle de QoS e ARQ (*Automatic Repeat Request*). Por ser a subcamada onde se localiza toda a lógica de provisionamento de QoS, é nela que se encontra o algoritmo de escalonamento de banda de *uplink*. Nessa subcamada que esse trabalho é desenvolvido.
- Subcamada de segurança (*Security Sublayer*): é responsável pela encriptação, autorização e intercâmbio de chaves de criptografia entre as SSs e a BS.

O padrão IEEE 802.16, em sua camada física, possui diferentes especificações de interfaces sem fios que, em conjunto com a camada MAC, fornecem confiabilidade ponto a ponto para o enlace. As cinco especificações das interfaces sem fios são (IEEE 802.16-2004, 2004):

- *WirelessMAN-SC (Single Carrier)*: a camada física com interface sem fio usa uma única portadora que opera em frequências elevadas, sendo assim necessária a garantia de linha de visada (LOS);
- *WirelessMAN-SCa (Single Carrier Adaptive)*: usa uma única portadora adaptativa para a interface sem fio. Com isso é possível a transmissão fora de linha de visada (NLOS);
- *WirelessMAN-OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing)*: multiplexação por divisão de frequência ortogonal com 256 portadoras, 192 são utilizadas para dados, 56 são anuladas, por serem utilizadas como banda de guarda, e 8 são pilotos, ou seja, utilizadas

para auxiliar na sincronização e equalização. O acesso múltiplo para diferentes estações clientes (SSs) é baseado em divisão de tempo (TDMA - *Time Division Multiple Access*). É o padrão recomendado pelo fórum dos fabricantes (WiMAX, 2009) por sofrer menos com interferências e utilizar o cálculo da transformada rápida de Fourier (FFT - *Fast Fourier Transform*).

- *WirelessMAN-OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access)*: OFDM com 2048 portadoras. O acesso múltiplo é fornecido atribuindo um subconjunto de portadoras para um único receptor. Este esquema de acesso múltiplo combina TDMA e OFDMA.
- *WirelessMAN-HUMAN (High-speed Unlicensed MAN)*: especificação para redes metropolitanas não licenciadas¹⁰, suporta os mesmos padrões, possuindo alguns componentes específicos de canalização e transmissão de máscara espectral.

2.4 CAMADA FÍSICA (PHY)

A camada física do WiMAX é dividida em etapas funcionais, como por exemplo: a criação do símbolo OFDM, a definição dos parâmetros e a composição dos quadros. A técnica de modulação OFDM e essas etapas são detalhadas na sequência.

2.4.1 Modulação OFDM

A técnica de modulação OFDM, surgiu como uma evolução da técnica convencional de Multiplexação por Divisão de Frequência, FDM (*Frequency Division Multiplexing*) onde, no lugar de utilizar-se de bandas de guarda para a separação das subportadoras na recepção do sinal, trabalha-se com uma particular sobreposição espectral de subportadoras.

O sistema OFDM foi proposto em 1968 (CHANG; GIBBY, 1968). A primeira avaliação da aplicação da técnica OFDM para comunicações móveis foi apresentada em 1985 (CIMINI, 1985). Esta técnica vem desde então sendo particularmente considerada para ser empregada em radiodifusão, em transmissão digital sobre linhas de telefone e em redes locais sem fio (*Wireless LAN*). A grande vantagem dessa técnica é que pode-se trabalhar com uma segunda dimensão, o domínio da frequência, o qual permite obter ganhos adicionais na utilização de técnicas de melhoria do sinal (entrelaçamento e códigos corretores de erro) relativamente aos obtidos pela utilização destas técnicas no domínio do tempo.

¹⁰As bandas não licenciadas são as de 2.4 GHz e 5.8 GHz. Como o padrão é projetado para transmissões *outdoor* em longas distâncias, a banda de 5.8 GHz permite a operação em uma faixa não poluída.

2.4.2 Concepção Básica da Técnica OFDM

Num sistema convencional de transmissão de dados, os símbolos são enviados em sequência através de uma única portadora (modulada na taxa de símbolos da fonte de informação), cujo espectro ocupa toda a faixa de frequências disponível. A técnica OFDM consiste na transmissão paralela de dados em diversas subportadoras com modulação QAM¹¹ (*Quadrature Amplitude Modulation*) ou PSK (*Phase Shift Keying*)¹² e taxas de transmissão por subportadora tão baixas quanto o maior número destas empregadas. A redução na taxa de transmissão (aumento na duração dos símbolos transmitidos em cada subportadora) implica em uma diminuição da sensibilidade à seletividade em frequência (dispersão no tempo) causada por multipercurso. Além disso, a utilização de símbolos ciclicamente estendidos torna a técnica de modulação OFDM ainda mais eficaz no combate a desvanecimentos¹³ desta natureza.

A Figura 5 ilustra o espectro de um pulso gerado na modulação QAM, o qual é da forma $\text{sinc}(fT)$, com cruzamentos de zeros em pontos múltiplos de $1/T$, sendo T a duração de um símbolo QAM. Salienta-se que o valor zero no eixo horizontal da figura corresponde de fato a frequência da portadora.

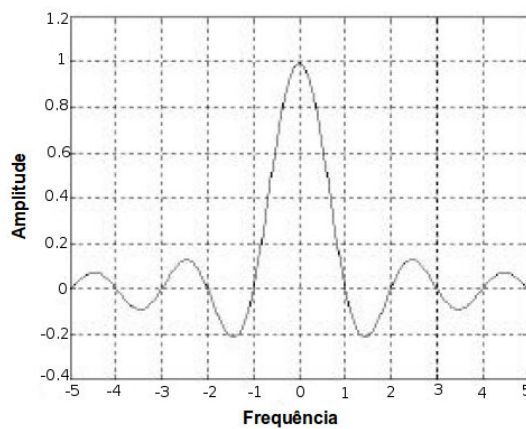


Figura 5 - Espectro de um sinal QAM

Fonte: (PINTO; ALBUQUERQUE, 2002).

Em um sistema OFDM o espaçamento entre subportadoras é cuidadosamente selecionado de forma que cada subportadora seja alocada em pontos de cruzamento de zero do espectro das

¹¹A modulação QAM (Modulação por Amplitude em Quadratura) modifica simultaneamente duas características da onda portadora: amplitude e fase.

¹²O PSK (Modulação por Desvio de Fase) é uma forma de modulação em que a informação do sinal digital é embutida nos parâmetros de fase da portadora.

¹³Existem dois tipos de desvanecimentos: (i) em larga escala, resultantes do efeito de sombreamento (prédios e morros obstruindo a passagem do sinal) e (ii) desvanecimentos em pequena escala associados ao efeito multipercurso.

demais, conforme mostrado na Figura 6.

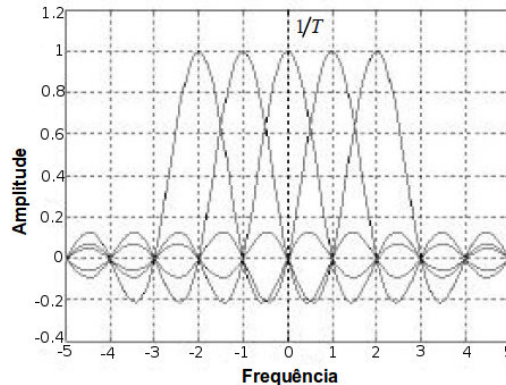


Figura 6 - Subportadoras de um sinal OFDM

Fonte: (PINTO; ALBUQUERQUE, 2002).

Embora exista sobreposição espectral de subportadoras moduladas, a informação conduzida por cada uma delas poderá ser isolada das demais através de um correlator (ou filtro casado) adequado. Admitindo sincronização de relógio, a saída deste correlator corresponderá a projeção do sinal OFDM recebido sobre a subportadora a ele associada. É possível mostrar que tal projeção depende apenas da informação conduzida por esta subportadora. Ou seja, existe ortogonalidade entre as subportadoras, a qual se deve ao espaçamento de frequência empregado. Porém, para que se tenha ortogonalidade entre os subcanais na recepção, é necessário que as subportadoras estejam centradas nas respectivas frequências dos subcanais OFDM, além de se ter a sincronização do relógio.

A sobreposição espectral particular produz uma economia significativa de banda, quando comparado a técnica FDM tradicional, conforme mostrado na Figura 7. Pode-se obter uma economia de banda de cerca de 50%.

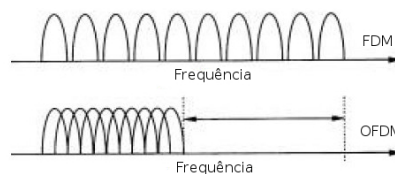


Figura 7 - Espectros FDM convencional e OFDM

Fonte: (PINTO; ALBUQUERQUE, 2002).

Em relação ao domínio do tempo, a característica de ortogonalidade entre subportadoras implica que duas subportadoras quaisquer diferem exatamente por um número inteiro de ciclos durante um intervalo de símbolo OFDM, uma vez que estas estarão separadas em frequência

por um valor múltiplo de $1/T$. A Figura 8 ilustra esta propriedade para o caso de quatro subportadoras OFDM.

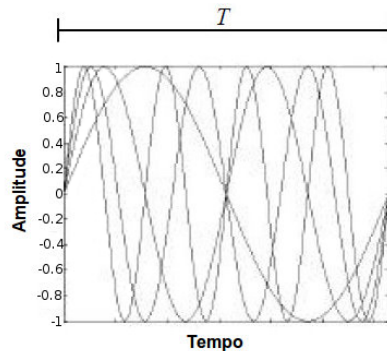


Figura 8 - Subportadoras no domínio do tempo

Fonte: (PINTO; ALBUQUERQUE, 2002).

Em princípio a geração direta e a demodulação do sinal OFDM requerem conjuntos de osciladores¹⁴ coerentes, resultando numa implementação complexa e cara, quando o número de subportadoras é elevado. Porém, esses processos de modulação e demodulação podem ser executados de forma mais simples utilizando-se algoritmos IFFT (*Inverse Fast Fourier Transform*) e FFT.

A largura de faixa dos subcanais de um sistema OFDM é dada pela divisão da largura de faixa total destinada ao sistema pelo número de subportadoras empregadas. Trabalhar com canais mais estreitos, ao invés de um único canal mais largo, traz um grande benefício no que diz respeito a seletividade em frequência. A possível natureza de desvanecimento seletivo em frequência apresentado por um canal para uma transmissão de portadora única, pode ser revertida em uma natureza de desvanecimento plano ou quase plano apresentada pelas frações desse canal, quando do emprego da técnica OFDM. Embora a técnica leve o termo multiplexação em sua denominação, não ocorre multiplexação em um sistema OFDM, mas sim a transmissão em paralelo de uma sequência de bits originalmente única.

2.4.3 Criação do Símbolo OFDM

Para que o sinal seja recebido corretamente após a transmissão, é necessário que o transmissor e o receptor estejam sincronizados no tempo e na frequência. Se isto não ocorrer, a ortogonalidade entre as subportadoras é prejudicada, o que resulta na chamada interferência interportadoras (*Intercarrier Interference - ICI*). Além disso, devido às elevadas taxas de trans-

¹⁴Osciladores são amplificadores que geram um sinal de saída sem a necessidade de um sinal de entrada.

missão, pode ocorrer também interferência intersímbolos (*Intersymbol Interference - ISI*). A camada física do WiMAX permite opções para diversos parâmetros de transmissão, como número de subportadoras e separação entre subportadoras, de forma a diminuir a ICI e a ISI sem comprometer o desempenho da transmissão.

Um subcanal, como definido no padrão IEEE 802.16, é um conjunto lógico de subportadoras. Para criar um símbolo OFDM, os símbolos modulados são mapeados nos subcanais que tiverem sido alocados para a transmissão. A constituição, em subportadoras, destes subcanais é definida pelo esquema de permutação de subportadoras; elas podem ser adjacentes, o que permite o uso da técnica de *beamforming* (aumenta a potência do sinal e diminui a sensibilidade a erros e interferência), ou podem estar espalhadas no espectro, diminuindo a ICI.

Entre os principais esquemas de permutação está o DL-FUSC (*Downlink Full Usage of Subcarriers*). Neste esquema, todas as subportadoras de dados são utilizadas para compor os subcanais. Cada subcanal é composto de 48 subportadoras distribuídas pela banda de frequência (as subportadoras são alocadas antes desta distribuição). Já no DL-PUSC (*Downlink Partial Usage of Subcarriers*), as subportadoras são divididas em *clusters*, em cada qual há a definição de 24 subportadoras de dados e 4 subportadoras piloto. Os *clusters* são, então, redistribuídos logicamente e divididos em seis grupos. Dois *clusters* do mesmo grupo formam os subcanais. No DL-PUSC é possível alocar apenas parte destes grupos a transmissores. Se os grupos alocados a transmissores diferentes forem disjuntos, podemos separar os seus sinais no espaço de subportadoras, o que facilita a reutilização de frequências ao custo da taxa de transmissão.

Outro esquema de permutação é o UL-PUSC (*Uplink Partial Usage of Subcarriers*), no qual as subportadoras são divididas em conjuntos contendo, no modo tradicional, 8 subportadoras de dados e 4 subportadoras piloto, ou no modo alternativo, 8 subportadoras de dados e 1 subportadora piloto (o modo alternativo, por possuir maior proporção de subportadoras de dados, permite uma taxa de transmissão de dados maior, mas perde em rastreamento de canal). Estes conjuntos são agrupados em seis grupos, e os subcanais são formados por seis conjuntos de um mesmo grupo.

Por último, temos o esquema Band AMC (*Band Amplitude Modulation and Coding*). A grande diferença deste esquema para os anteriores reside no fato de que todas as subportadoras de um mesmo subcanal estão adjacentes no espectro, facilitando a exploração de acesso multiusuário.

A alocação destes recursos pela camada de acesso ao meio é feita em segmentos de tempo, que são a menor unidade de recursos nos domínios do tempo e da frequência que a camada física pode alocar a um único usuário. O tamanho do segmento varia com o esquema de permutação.

A partir do momento que os símbolos que serão transmitidos em cada subportadora já são conhecidos, é necessário aplicar a transformada rápida de *Fourier* inversa (IFFT), em blocos, aos símbolos que serão transmitidos. O tamanho dos blocos, em símbolos, é igual à quantidade de subportadoras utilizadas para realizar a transmissão. Temos, então, um vetor de símbolos no domínio do tempo, ao qual é anexado o prefixo cíclico. Esta série de símbolos compõe o sinal digital que é transmitido em uma única frequência de rádio.

No WiMAX, cada quadro é dividido em sub-quadro de *downlink* e sub-quadro de *uplink*. Cada um destes sub-quadros é dividido em diversas zonas, cada uma usando um esquema de permutação de subportadoras diferente. No início do sub-quadro de *downlink*, são enviadas mensagens de controle indicando a posição inicial das zonas e suas durações. O primeiro símbolo OFDM é utilizado para a transmissão de um preâmbulo, utilizado para sincronização e estimativa de interferência, por exemplo. Nos símbolos seguintes são enviados o cabeçalho de controle do frame (*Frame Control Header - FCH*), que carrega informações de controle do sistema, as mensagens DL-MAP (*Downlink Map*) e UL-MAP (*Uplink Map*), que especificam as regiões de dados alocadas a cada estação, e os descritores de canal de *uplink* (*Uplink Channel Descriptor - UCD*) e *downlink* (*Downlink Channel Descriptor - DCD*), que contém informações adicionais sobre as estruturas de canais, constelações, taxa de código, entre outros, permitidos pela estação base. Para poupar recursos, o UCD e o DCD são transmitidos apenas periodicamente. Finalmente, temos as rajadas de *downlink* e as rajadas de *uplink*.

2.4.4 Cálculo do Número de Símbolos OFDM Utilizados para Transmissão de Dados

Na Figura 9, os parâmetros que fazem parte do cálculo de um símbolo OFDM estão representados. A fórmula de cálculo, bem como a descrição dos parâmetros, estão expostos na sequência do texto.

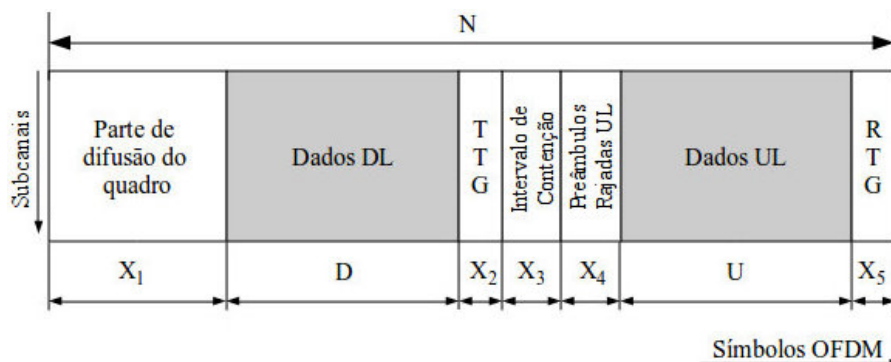


Figura 9 - Quadro para cálculo do símbolo OFDM

Fonte: adaptado de (MACH; BESTAK, 2008).

O número total de símbolos OFDM (variável N) em um quadro MAC é derivado de dois parâmetros:

- comprimento do símbolo OFDM;
- duração do quadro MAC.

O número de símbolos OFDM utilizados somente para dados é calculado através da equação:

$$S_{OFDM} = N - (X_1 + X_2 + X_3 + X_4 + X_5) \quad (1)$$

sendo que N e X_i são descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Composição do símbolo OFDM

S_{OFDM}	Número de símbolos OFDM utilizados somente para dados.
N	Número total de símbolos OFDM no quadro MAC.
X_1	Representa o <i>broadcast</i> da BS, incluindo: a) pré-âmbulo longo (2 símbolos OFDM); b) FCH (cabeçalho de controle do quadro (1 símbolo OFDM)); e c) Mapas <i>downlink/uplink</i> . Como esta parte de difusão do quadro é transmitida pela taxa de codificação e tipo de modulação mais robusta, somente 92bits/OFDM é transportado. O comprimento dos mapas e simultaneamente a quantidade de símbolos OFDM depende do número de IEs (<i>Information Element</i>) dos MAPs.
X_2	É um intervalo entre os subquadros <i>downlink</i> e <i>uplink</i> e depende, principalmente, do atraso de ida e volta.
X_3	São segmentos de contenção que são compostos de segmentos de intervalo de reserva e requisição de largura de banda. - O segmento de intervalo de reserva tem 6 símbolos para superar o atraso de ida e volta e permitir a transmissão de mensagem de pedido de banda e longo pré-âmbulo. - O segmento de requisição de largura de banda tem valor de 3 símbolos OFDM. A quantidade desses segmentos é dependente do número de usuários. Com isso, se conclui que mais usuários, mais necessidade de segmentos.
X_4	São os pré-âmbulos de cada pacote na rajada de <i>uplink</i> .
X_5	É um intervalo entre os subframes <i>uplink</i> e <i>downlink</i> e depende, principalmente, do atraso de ida e volta.

Fonte: Autoria própria.

2.4.5 Parâmetros Primitivos para o Cálculo de um Símbolo OFDM em WiMAX

A modulação OFDM em WiMAX, segundo o padrão IEEE 802.16, tem a distribuição dos dados emitidos na forma de símbolos OFDM, como mencionado anteriormente. Dessa forma, um símbolo OFDM é composto de portadoras, e o tamanho da FFT é determinado pelo número de portadoras.

Nesse padrão são determinados 256 portadoras, sendo que 192 portadoras são utilizadas para transmissão de dados; 8 portadoras são pilotos, espaçadas ao longo do espectro OFDM e utilizadas em estimativas; e 56 portadoras são nulas, reservadas para bandas de guarda, que tem como objetivo permitir que o sinal decaia naturalmente criando uma espécie de escudo do FFT.

A Figura 10 esquematiza a descrição das portadoras OFDM.

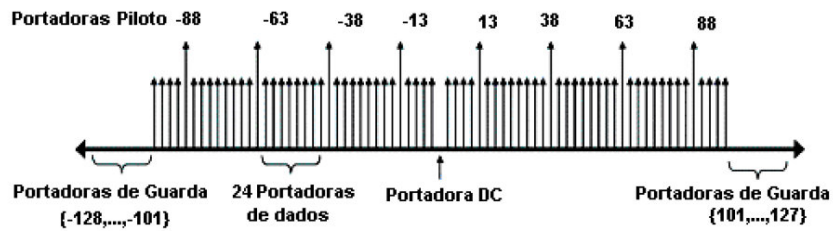


Figura 10 - Descrição das portadoras OFDM

Fonte: adaptado de (IEEE 802.16-2004, 2004).

A forma de onda do símbolo OFDM, no domínio da frequência, é criado utilizando a transformada inversa de *Fourier* do símbolo OFDM no tempo (descrita em 2.4.3). O símbolo OFDM tem duração T_s , incluindo o tempo útil do símbolo T_b ($T_b = 1/\text{espaçamento da portadora}$), e um prefixo T_g . O prefixo, denominado de Prefixo Cíclico, é uma cópia do fim do símbolo adicionado no começo, como mostrado na Figura 11.

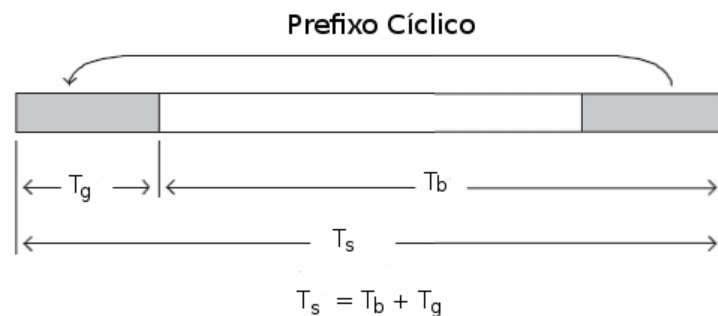


Figura 11 - Prefixo cíclico

Fonte: adaptado de (IEEE 802.16-2004, 2004).

O intervalo do protetor, G , é definido como a relação do comprimento do prefixo cíclico ao tempo útil do símbolo ($G = T_g/T_b$). O padrão IEEE 802.16 especifica quatro relações para o intervalo do protetor, $1/4$, $1/8$, $1/16$ e $1/32$. O intervalo do protetor é utilizado pelo receptor para reduzir o efeito multipercurso e melhorar o desempenho do sistema.

Para descrever o sistema OFDM, um número de termos são utilizados para especificar os parâmetros das propriedades físicas, conforme descrito na Tabela 3.

Tabela 3 - Termos utilizados na composição de um símbolo OFDM

Parâmetros	Descrição / Fórmula / Valor
Largura de banda nominal do canal BW (Hz)	$BW = F_s/n$
Frequência de amostragem F_s (Hz)	A frequência de amostragem F_s é sempre maior que o comprimento da onda
Fator de amostragem n	$n = F_s/BW$
N_{FFT} Tamanho da Transformada Rápida de <i>Fourier</i> (FFT) ou número de pontos para OFDM	256
Espaçamento da portadora Δf (Hz). É a distância entre duas portadoras OFDM adjacentes	$\Delta f = F_s/N_{FFT}$
Tempo de símbolo usado T_b (s). Para análise de FFT este é a longitude de intervalo analisada	$T_b = 1/\Delta f$
Relação período de guarda / intervalo G , prefixo cíclico (CP) T_g (s). Valores típicos de G : 1/4, 1/8, 1/16 ou 1/32	O tempo absoluto é chamado de Prefixo Cíclico ($T_g = G * T_b$)
Tempo do símbolo OFDM	$T_s = T_b + T_g$

Fonte: Autoria própria.

Baseado nesses parâmetros, a duração de um símbolo OFDM é computado por:

$$T_s = \frac{1 + G}{n * \frac{BW * 10^{-6}}{N_{FFT}}} \quad (2)$$

Nessa dissertação, os seguintes parâmetros foram utilizados para o cálculo da duração de um símbolo OFDM:

- $BW = 20$ MHz.
- $N_{FFT} = 256$.
- $n^{15} = 144/125$ (BW , tendo o valor de 20 MHz, é múltiplo de 1.25 MHz).
- $G = 1/4$.

Com base nesses parâmetros e utilizando a Equação (2), a duração do símbolo OFDM, utilizado nessa dissertação, é de $13.89\mu s$.

O número de símbolos OFDM por quadro é constante e depende da duração do quadro (TF) e da duração do símbolo OFDM. Por exemplo, em um quadro com duração de $10ms$, haverá 720 símbolos OFDM por quadro. Nessa dissertação, para calcular o tempo do quadro ótimo (TF ótimo), a duração do quadro tem seu tamanho variando entre $2.5ms$ e $20ms$, conforme definido pelo padrão IEEE 802.16 (IEEE 802.16-2004, 2004).

¹⁵De acordo com IEEE 802.16-2004 (2004) o valor de n é calculado em conjunto com BW e N_{FFT} e define o espaçamento entre as subportadoras e o tempo útil de um símbolo. O valor de n é pré-definido em função de BW e segue a seguinte regra: (i) Para um canal com largura de banda que são múltiplos de 1.75 MHz, $n = 8/7$. (ii) Para um canal com largura de banda que são múltiplos de 1.5 MHz, $n = 86/75$. (iii) Para um canal com largura de banda que são múltiplos de 1.25 MHz, $n = 144/125$. (iv) Para um canal com largura de banda que são múltiplos de 2.75 MHz, $n = 316/275$. (v) Para um canal com largura de banda que são múltiplos de 2.0 MHz, $n = 57/50$. (vi) Para um canal com outra largura de banda qualquer, $n = 8/7$.

2.5 CAMADA DE CONTROLE DE ACESSO AO MEIO (MAC)

A tecnologia WiMAX pode alcançar, teoricamente uma distância de 50 Km (TANENBAUM, 2003). As taxas de transmissão de dados podem variar de 50 a 150 Mbps, dependendo da largura de frequência do canal e do tipo de modulação (INTEL, 2005). As transmissões em uma tecnologia WiMAX ocorrem em dois canais diferentes: um canal de descida (*downlink* - DL), com o fluxo de dados direcionado da BS para as SSs, e outro de subida (*uplink* - UL), com o fluxo de dados direcionado das SSs para a BS. No canal de *downlink*, os dados são transmitidos por difusão, enquanto que no canal de *uplink* o meio é compartilhado através de múltiplo acesso.

O padrão IEEE 802.16 fornece a flexibilidade de dois esquemas para alocação de banda: duplexação por divisão de tempo (*Time Division Duplexing* - TDD), que é abordada nessa dissertação, e duplexação por divisão de frequência (*Frequency Division Duplexing* - FDD). Basicamente, no TDD, *downlink* e *uplink* compartilham a mesma frequência e os dados são transmitidos em tempos diferentes, sendo o canal segmentado no tempo e composto por quadros diferentes. No FDD os dois canais utilizam frequências diferentes, sendo os dados transmitidos ao mesmo tempo, conforme pode ser visto na Figura 12.

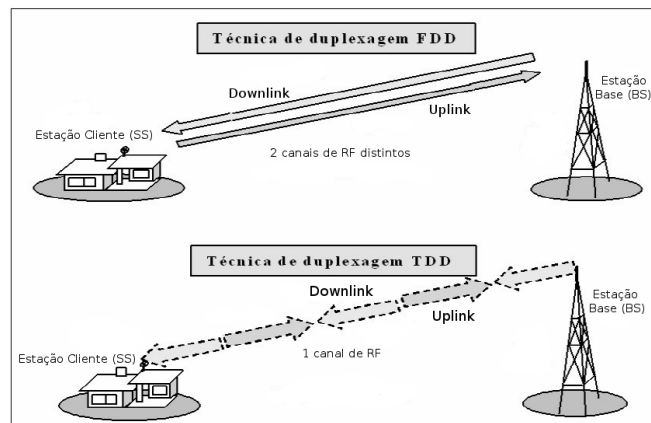


Figura 12 - Técnicas de duplexagem para alocação de banda no padrão IEEE 802.16

Fonte: (TEMPORIM, 2007).

No TDD, como o canal é segmentado no tempo e composto por quadros de tamanho fixo, cada quadro é dividido em um sub-quadro para o *downlink* e outro para o *uplink*. A duração desses sub-quadros é dinamicamente controlada pela BS e, embora o quadro possua tamanho fixo, a divisão entre os tempos fornecidos para *downlink* e para *uplink* podem ser variados, o que significa que a banda alocada para eles é adaptativa. Cada sub-quadro é composto por um número de segmentos de tempo, de maneira que todas as SSs e a BS devem estar sincronizadas

e transmitir os dados em intervalos pré-determinados. A divisão do quadro TDD entre *downlink* e *uplink* é uma funcionalidade de sistema controlada pela camada MAC. A Figura 13 mostra a estrutura do quadro com TDD.

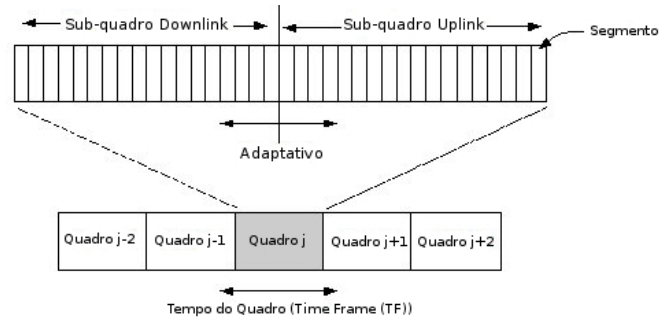


Figura 13 - Estrutura do quadro TDD

Fonte: adaptado de (IEEE 802.16-2004, 2004)

O padrão IEEE 802.16 prevê SSs *full-duplex* e *half-duplex*. Para sistemas FDD, a alocação de segmentos de tempo é diferente para estações *full-duplex* e *half-duplex*. Quando há SSs *half-duplex*, a BS não pode designar um período de *uplink* que adentre o período de *downlink*. Para sistemas TDD, uma vez que não há interseção entre os períodos de *uplink* e *downlink*, estações *full-duplex* e *half-duplex* podem ter a mesma alocação de segmentos de tempo.

A maior parte da literatura disponível sobre o padrão IEEE 802.16 assume a duplexação TDD para os quadros MAC, além de que os primeiros dispositivos WiMAX certificados implementam esse esquema (WiMAX, 2009). É por essa razão que, nessa dissertação, a duplexação TDD para os quadros da camada MAC é utilizada.

Na TDD, durante o *downlink*, os pacotes de dados são transmitidos por difusão pela BS para todas as SSs, que por sua vez capturam apenas os pacotes destinados a elas, fazendo, dessa forma, que a transmissão seja relativamente simples pois somente a BS transmite nesse sub-quadro. Durante o *uplink*, através da mensagem UL-MAP¹⁶, no começo de cada quadro, a BS transmite por difusão o número de segmentos que é atribuído para cada SS dentro do sub-quadro. A UL-MAP contém informações específicas (*Information Element - IE*) que incluem as oportunidades de transmissão, ou seja, os segmentos de tempo em que a SS pode transmitir durante o sub-quadro de *uplink*. Portanto, após receber a UL-MAP, as estações transmitem os dados em segmentos de tempo pré-definidos como indicados no IE.

Na BS, é necessário um módulo de escalonamento do *uplink* para determinar as oportunidades de transmissão (IEs) utilizando as requisições de banda (*BW-Request*) enviadas pelas

¹⁶UL-MAP é um mapa de *uplink* que contém os segmentos em que cada estação está apta a transmitir.

SSs. A Figura 14 ilustra a estrutura do quadro MAC no esquema de duplexação TDD.

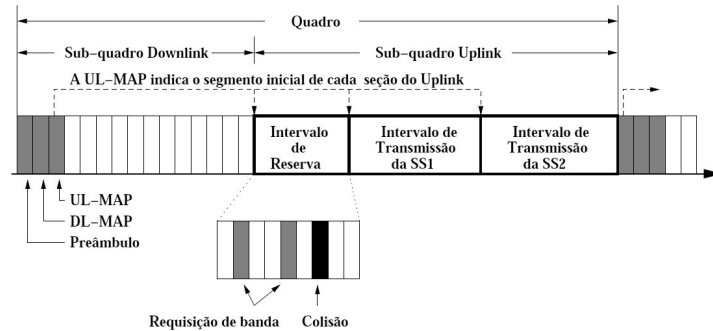


Figura 14 - Estrutura do quadro MAC no esquema de duplexação TDD

Fonte: (MACIEL-JUNIOR, 2005).

Para enviar requisições de oportunidades de transmissões para a BS, as SSs utilizam acesso aleatório e *piggybacking*¹⁷ no sub-quadro *uplink* (IEEE 802.16-2004, 2004). A BS é responsável por estabelecer um intervalo de reserva no início do sub-quadro de *uplink* para que as SSs possam requisitar as oportunidades de transmissões no próximo sub-quadro de *uplink*, ou em algum mais a frente, dependendo da ocorrência ou não de colisões. É importante salientar que o padrão IEEE 802.16 utiliza um protocolo de acesso ao meio baseado em alocação dinâmica, onde o período de reserva, que serve para identificar as demandas dos usuários, utiliza acesso aleatório. Depois de enviar a requisição de banda para a BS, a estação aguarda ser escalonada em algum sub-quadro *uplink* mais adiante, como indicado na Figura 15.

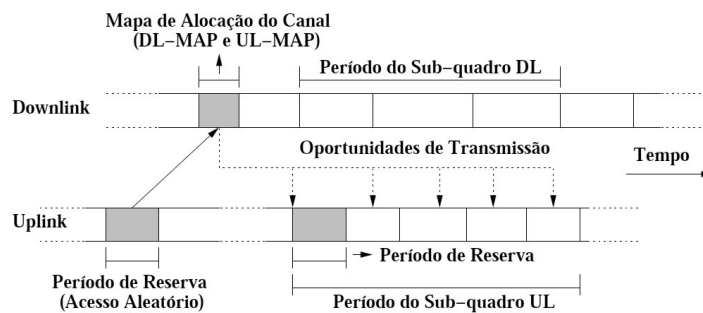


Figura 15 - Estrutura de alocação de banda do padrão IEEE 802.16

Fonte: (MACIEL-JUNIOR, 2005).

A camada MAC é orientada à conexão. Cada conexão tem 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 tráfego, incluindo o tráfego não orientado à

¹⁷Requisições enviadas pelas SSs no final do quadro de dados, transmitidas durante o *uplink*.

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.

O Padrão IEEE 802.16 define apenas os mecanismos para sinalização de QoS, tais como *BW-Request* e UL-MAP, mas não define o escalonador de *uplink*, ou seja, o mecanismo que determina as IEs na UL-MAP. Esse trabalho apresenta um novo escalonador com controle de admissão de conexão, que é discutido no Capítulo 3.

2.6 QUALIDADE DE SERVIÇO - QOS

A camada MAC do padrão IEEE 802.16 define mecanismos para fornecer QoS e funções para controlar a transmissão de dados entre a BS e as SSs. O principal mecanismo 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 unidirecional às mensagens. Durante a fase de estabelecimento da conexão, esses fluxos de serviço são criados e ativados pela BS e pela SS. Cada fluxo de serviço deve definir seu conjunto de parâmetros de QoS, dentre eles, retardo máximo, largura de banda mínima e o tipo de serviço de escalonamento.

Dentro desse contexto, o padrão IEEE 802.16 define quatro classes de serviços associados a fluxos de tráfego, cada uma com diferentes requisitos de QoS, sendo que o escalonador da BS aloca largura de banda para as SSs seguindo o conjunto de regras definido pelo escalonamento das SSs (IEEE 802.16-2004, 2004). Cada uma dessas classes devem ser tratadas de forma diferenciada pelo mecanismo de escalonamento de pacotes da camada MAC. Assim, cada tipo de aplicação pode ser incluída em uma classe de serviço, sendo elas:

- *Unsolicited Grant Service (UGS)*: esta categoria foi projetada para oferecer suporte aos fluxos de serviço de tempo real que geram pacotes de dados de tamanho fixo em intervalos periódicos, ou seja, tráfego CBR. Esta categoria pode ser representada pelo tráfego gerado por aplicações de voz sobre IP (VoIP). A BS oferece periodicamente concessões de banda não solicitadas para transmissão de dados, eliminando a sobrecarga na rede pois isso retira a necessidade de fazer requisição de banda;
- *Real-Time Polling Service (rtPS)*: esta categoria foi projetada para oferecer suporte aos fluxos de serviço de tempo real que geram pacotes de dados de tamanho variável em intervalos periódicos, como, por exemplo, o tráfego gerado por transmissão de vídeo no formato MPEG;
- *Non-Real-Time Polling Service (nrtPS)*: esta categoria foi projetada para oferecer suporte

aos fluxos de serviço que geram pacotes de tamanho variável, não necessariamente em intervalos periódicos e com um pequeno atraso aceitável. Engloba o tráfego gerado por aplicações como FTP (*File Transfer Protocol*), correio eletrônico, dentre outros;

- *Best Effort (BE)*: esta categoria foi projetada para oferecer suporte aos fluxos de serviço toleráveis a atraso, onde não existe garantia de QoS, como o HTTP (*Hypertext Transfer Protocol*).

Esse trabalho está focado na classe de serviços rtPS, pois os cenários das simulações são realizados para a categoria de tráfego em tempo real, tendo os pacotes tamanhos variados em intervalos periódicos.

No serviço UGS, *BW-Request* não é necessário. Para os demais tipos, o tamanho atual da fila é incluído no *BW-Request* para representar a demanda atual por banda de transmissão. Em resumo, o padrão IEEE 802.16 especifica: (i) o mecanismo de sinalização para a troca de informações entre a BS e as SSs, como a configuração de conexões, *BW-Request* e UL-MAP; (ii) o escalonamento do *uplink* para serviço UGS. O padrão IEEE 802.16 não define: (i) o escalonamento do *uplink* para serviços rtPS, nrtPS e BE; (ii) controle de admissão e o policiamento do tráfego.

A Figura 16 exibe a arquitetura de QoS existente no padrão IEEE 802.16. O módulo de escalonamento de pacotes do *uplink* (*Uplink Packet Scheduling - UPS*) encontra-se na BS e controla todas as transmissões de pacotes no *uplink*.

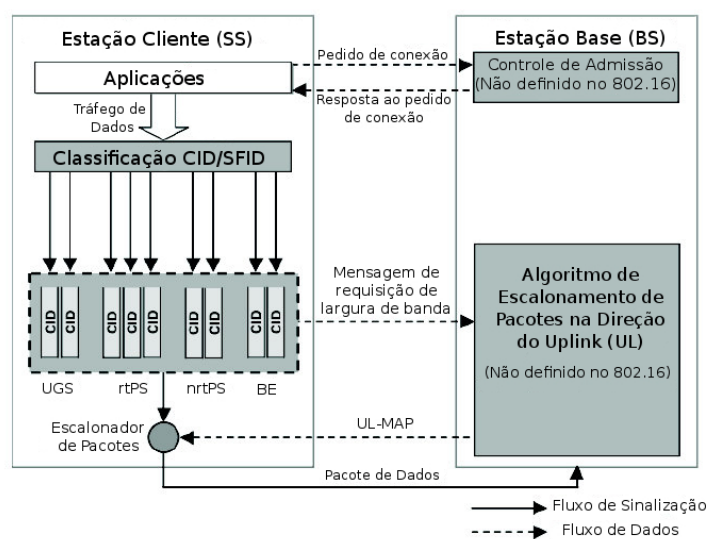


Figura 16 - Arquitetura de QoS do padrão IEEE 802.16

Fonte: adaptado de (IEEE 802.16-2004, 2004).

Como o protocolo é orientado à conexão, a aplicação deve estabelecer uma conexão entre a BS e o fluxo de serviço associado (UGS, rtPS, nrtPS ou BE). A BS identifica as conexões com um CID único para cada uma. O padrão IEEE 802.16 define o processo de sinalização para o estabelecimento de uma conexão (*Connection Request, Response*) entre SS e BS, mas não especifica o processo de controle de admissão de conexão.

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

2.7 TRABALHOS RELACIONADOS

Uma das premissas para garantia de QoS em redes WiMAX é o algoritmo de escalonamento para ambas as direções, *uplink* e *downlink*, que deve traduzir os requerimentos de QoS das SSs para o número adequado de segmentos. Quando a BS faz a decisão de escalonamento, ela informa da sua decisão para todas as SSs utilizando as mensagens no início de cada quadro. Essas mensagens definem explicitamente que segmentos são alocados para cada SS em ambas as direções, *uplink* e *downlink*.

Esse trabalho se concentra no escalonamento de pacotes na direção *uplink*, pois garante uma otimização da taxa física da rede, garantia do atraso solicitado pelo usuário e, com isso, o número de usuários trafegando dados em cada quadro (TF) é maximizado.

Vários algoritmos de escalonamento e arquiteturas de QoS para BWA, tem sido propostos na literatura (CHU; WANG; MEI, 2002; CICONETTI et al., 2007; WONGTHAVARAWAT; GANZ, 2003; IYENGAR; IYER; SIKDAR, 2005; CHO et al., 2005; KIM; YEOM, 2007; MAHESHWARI, 2005), pelo fato de que o padrão fornece apenas mecanismos de sinalização e não especifica nenhum algoritmo para escalonamento e controle de admissão. Contudo, muitas dessas soluções abordam apenas a implementação ou a adição de uma nova arquitetura de QoS incorporada ao padrão IEEE 802.16. Não existe um modelo analítico para a garantia do atraso máximo e para a maximização do número de SSs alocadas no sistema, que representem, de forma exata, alguma métrica de desempenho do protocolo de acesso ao meio, por exemplo o atraso (*delay*). Essa dissertação tem como objeto de estudo esses parâmetros que está descrito no Capítulo 3.

Em (CHU; WANG; MEI, 2002), os autores propõem que uma arquitetura de QoS seja in-

corporada à subcamada MAC no padrão IEEE 802.16, causando, com esse ajuste, um impacto significativo no desempenho do sistema, porém não apresentam um algoritmo para fazer com que a banda seja utilizada de maneira eficiente. Este trabalho foi a primeira proposta de arquitetura de QoS para o padrão IEEE 802.16 encontrado na literatura. Entretanto, há algumas limitações que devem ser destacadas, que impulsionaram o desenvolvimento de novos trabalhos para contemplar os pontos deixados em aberto, entre elas destacamos:

- O algoritmo do escalonador é abordado de maneira muito simplista para a SS e não é considerado para a BS.
- Não há um classificador de tráfego na BS, para classificar os dados de entrada do *downlink*.
- Não é definido um objeto particionador do quadro, que faça a divisão da camada MAC entre *uplink* e *downlink* na BS.

Em (CICCONETTI et al., 2007), os autores apresentam um estudo simulado do protocolo MAC do IEEE 802.16 operando com interface aérea OFDM e com estações *full-duplex*. Eles avaliam o desempenho do sistema em diferentes cenários de tráfego, variando os valores de um conjunto relevante de parâmetros do sistema. Com respeito ao tráfego de dados, foi observado que a sobrecarga devido a transmissão dos preâmbulos físicos aumenta com o número de estações.

Em (WONGTHAVARAWAT; GANZ, 2003), os autores propõem um escalonador de pacotes para o sub-canal *uplink* do padrão IEEE 802.16, baseado em uma estrutura hierárquica de filas. Seguindo o escalonador proposto, a alocação de banda entre os fluxos distintos segue uma disciplina de propriedade fixa, da maior (fluxo UGS) para a menor (fluxo BE). A alocação de banda entre os fluxos de igual prioridade segue diferentes disciplinas de serviço. Para conexões UGS, o canal é alocado em quantidade fixa, dependendo da demanda total das conexões. A alocação de banda para conexões rtPS segue uma disciplina de serviço EDF (*Earliest Deadline First*), onde o pacote com menor tempo de vida é transmitido primeiro. Conexões nrtPS são servidas de acordo com a disciplina WFQ (*Weighted Fair Queuing*). Por fim, o restante da banda é alocada igualmente entre as conexões BE. Os autores desenvolveram um modelo de simulação para avaliar o comportamento do escalonador proposto. Contudo, apesar de apresentar resultados simulados, os autores desconsideram a complexidade de implementação desta solução hierárquica e não definem claramente como é feita a requisição de banda.

Em (IYENGAR; IYER; SIKDAR, 2005), a proposta de um protocolo MAC baseado em

*polling*¹⁸ é apresentada, juntamente com um modelo analítico para avaliar o seu desempenho, considerando um sistema onde a BS interroga cada nó em cada quadro para determinar seus requerimentos de largura de banda, com três estratégias de escalonamento diferentes. Foram desenvolvidas expressões analíticas de forma fechada nos casos onde as estações são interrogadas no início ou no fim do sub-quadro de *uplink*. Dessa forma não é possível saber como é desenvolvido o modelo para garantia de atraso.

Em (CHO et al., 2005) os autores propõem uma arquitetura de QoS onde o escalonamento é baseado no tempo de vida do pacote de cada tipo de fluxo. Nesse trabalho os autores consideram o processo de comunicação de dados entre BS e SS desde o estabelecimento da conexão e negociação de parâmetros de tráfego, como largura de banda e atraso. A proposta tem as funcionalidades da arquitetura definidas em blocos bem estruturados, o que faz com que o fluxo de dados e ações da arquitetura sejam imprecisos. No entanto, apesar dos resultados das simulações serem apresentados, o trabalho deixa a desejar por não abordar adequadamente os blocos funcionais propostos no esquema da arquitetura e por não especificar claramente como é calculado o tempo de vida de cada pacote.

Em (KIM; YEOM, 2007), o algoritmo de escalonamento trata do tráfego de “Melhor Esforço” (BE), tendo chegado a conclusão de que é difícil estimar a quantidade de largura de banda necessária devido às mudanças dinâmicas da taxa de envio para este tráfego. O objetivo deste algoritmo é manter uma equidade na alocação da largura de banda entre os fluxos de BE, mantendo a utilização de toda a largura de banda. O sistema mede a taxa de envio de cada fluxo e aloca largura de banda baseado na taxa média de envio.

Finalmente, em (MAHESHWARI, 2005), a autora constituiu uma proposta bem elaborada de arquitetura de QoS para a camada MAC do padrão IEEE 802.16. O destaque desse trabalho é o componente responsável pela alocação de banda de transmissão *uplink* para cada SS, sendo que a decisão sobre a largura de banda concedida a cada SS é tomada com base nos seguintes aspectos:

- Largura de banda requisitada por cada SS para transmissão de dados *uplink*.
- Necessidades periódicas de banda dos fluxos UGS das SSs.
- Largura de banda necessária para que sejam feitas requisições adicionais de banda de transmissão.

Considerando as limitações expostas acima, esses trabalhos constituem a base de uma ar-

¹⁸*Polling* é o processo pelo qual uma BS aloca banda para uma SS fazer suas requisições de banda.

quitetura genérica, que pode ser estendida e especializada. Porém, nesses trabalhos, pode-se conseguir a garantia de QoS, mas, sem maximizar o número de usuários alocados na rede. Essa dissertação propõe um novo escalonador com controle de admissão de conexão (DOSCIATTI; GODOY-JÚNIOR; FORONDA, 2010) para a BS que estima um tempo de quadro ótimo (TF), garantindo o atraso máximo solicitado por cada usuário e, ao mesmo tempo, otimizando o número de SSs que são alocadas no sistema. O novo escalonador com controle de admissão de conexão proposto, sua modelagem analítica e simulações são apresentadas nos Capítulos 3 e 4.

A Tabela 4 mostra uma comparação das funcionalidades implementadas em cada um dos trabalhos relacionados com o modelo de escalonador com controle de admissão de conexão proposto nessa dissertação, onde “-” indica que a funcionalidade não está implementada no trabalho e “x” indica que a funcionalidade está implementada no trabalho.

Tabela 4 - Comparação entre os trabalhos relacionados e o novo escalonador

Autor	Modelo Analítico	Simulação	Garantia de Atraso Máximo	Cálculo TF Ótimo	Maximização do Número de Usuários
(CHU; WANG; MEI, 2002)	-	X	-	-	-
(CICCONETTI et al., 2007)	-	X	-	-	-
(WONGTHAVARAWAT; GANZ, 2003)	-	X	X	-	-
(IYENGAR; IYER; SIKDAR, 2005)	X	X	X	-	-
(CHO et al., 2005)	-	X	-	-	-
(KIM; YEOM, 2007)	-	X	-	-	-
(MAHESHWARI, 2005)	-	X	-	-	-
Novo Escalonador Proposto (DOSCIATTI; GODOY-JÚNIOR; FORONDA, 2010)	X	X	X	X	X

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 5 mostra um resumo de todos os trabalhos relacionados, seus pontos fortes e fracos, juntamente com o novo escalonador com controle de admissão de conexão proposto.

Tabela 5 - Resumo dos escalonadores dos trabalhos relacionados

Autor	Pontos Fortes	Pontos Fracos
(CHU; WANG; MEI, 2002)	- Arquitetura de QoS é incorporada à subcamada MAC melhorando o desempenho do sistema. - Primeira proposta de arquitetura de QoS para o padrão IEEE 802.16.	- Não apresentam um algoritmo para fazer com que a largura de banda seja utilizada de maneira eficiente. - O algoritmo do escalonador é abordado de maneira muito simplista para a SS e não é considerado para a BS. - Não há um classificador de tráfego na BS, para classificar os dados de entrada do <i>downlink</i> .
(CICCONETTI et al., 2007)	- Estudo simulado do padrão IEEE 802.16 operando com interface aérea OFDM e com estações <i>full-duplex</i> .	- Sobrecarga devido a transmissão dos preâmbulos físicos aumentando com o número de estações.
(WONGTHAVARAWAT; GANZ, 2003)	- Proposta de um escalonador de pacotes para o sub-canal <i>uplink</i> do padrão IEEE 802.16, baseado em uma estrutura hierárquica de filas.	- A complexidade da implementação é desconsiderada para esta solução. - Não é definido como é feita a requisição de banda.
(IYENGAR; IYER; SIKDAR, 2005)	- A BS interroga cada nó em cada quadro para determinar seus requerimentos de largura de banda com três estratégias de escalonamento diferentes.	- As expressões analíticas foram desenvolvidas de forma fechada nos casos onde as estações são interrogadas no início ou no fim do sub-quadro de <i>uplink</i> .

Autor	Pontos Fortes	Pontos Fracos
(CHO et al., 2005)	<ul style="list-style-type: none"> - O escalonamento é baseado no tempo de vida do pacote de cada tipo de fluxo. - Funcionalidades da arquitetura são definidas em blocos bem estruturados. 	<ul style="list-style-type: none"> - Fluxo de dados e ações da arquitetura são imprecisos, pelo fato de a arquitetura ser definida em blocos. - Não aborda adequadamente os blocos funcionais propostos no esquema da arquitetura. - Não especifica como é calculado o tempo de vida de cada pacote.
(KIM; YEOM, 2007)	<ul style="list-style-type: none"> - Trata somente do tráfego de melhor esforço (BE). 	<ul style="list-style-type: none"> - Tem dificuldade para estimar a quantidade de largura de banda necessária, devido às mudanças da taxa de envio para o tráfego BE.
(MAHESHWARI, 2005)	<ul style="list-style-type: none"> - A decisão sobre a largura de banda concedida a cada SS é tomada com base em: <ul style="list-style-type: none"> (i) largura de banda requisitada por cada SS para transmissão de dados <i>uplink</i>; (ii) necessidades periódicas de banda dos fluxos UGS das SSs; (iii) largura de banda necessária para que sejam feitas requisições adicionais de banda de transmissão. 	<ul style="list-style-type: none"> - Não discutem o efeito do atraso no algoritmo.
Novo Escalonador (DOSCIATTI; GODOY-JÚNIOR; FORONDA, 2010)	<ul style="list-style-type: none"> - Modelagem analítica para a garantia do - Cálculo do TF ótimo. - Maximização do número de SSs alocadas no sistema. 	<ul style="list-style-type: none"> - Esta versão não trata das perdas de pacotes no canal.

Fonte: Aatoria própria.

3 DESCRIÇÃO DO NOVO ESCALONADOR PROPOSTO

Em qualquer sistema, computacional ou não, um desempenho mínimo aceitável é um fator que deve ser buscado durante todo o desenvolvimento. Sendo assim, é necessária uma forma de medir ou dimensionar o desempenho destes sistemas. Para realizar esse dimensionamento são utilizadas ferramentas para medição e análise de desempenho, que disponibilizam, ao analista, medidas e métricas distintas. Nesse escopo, são apresentadas características abordadas anteriormente e que são discutidas e relacionadas ao proposto nessa dissertação. Para realizar isso, esse capítulo apresenta uma modelagem analítica do novo escalonador e a descrição analítica do seu controle de admissão de conexão. Antes disso, nas Seções 3.1 e 3.2, discute-se os servidores LR (*Latency-Rate*) e a ferramenta para modelagem do tráfego de entrada *token bucket*, ambos utilizados nessa dissertação.

3.1 SERVIDOR *LATENCY-RATE* (LR)

O fornecimento de qualidade de serviço (QoS) em uma rede de pacotes requer o uso de algoritmos de escalonamento de tráfego nos roteadores. A função de um algoritmo de escalonamento é selecionar, para cada enlace de saída do roteador, o pacote para ser transmitido a partir dos próximos pacotes disponíveis pertencentes às sessões de compartilhamento do enlace de saída.

Diversas disciplinas de serviço são conhecidas na literatura para a alocação de banda e escalonamento de transmissão em roteadores com saída *bufferada*¹⁹ (CRUZ, 1992; DEMERS; KESHAV; SHENKER, 1990; GOLESTANI, 1991, 1994; KALMANEK; KANAKIA; KESHAV, 1990; KATEVENIS; SIDIROPOULOS; COURCOUBETIS, 1991; SHREEDHAR; VARGHESE, 1996; STILIADIS; VARMA, 1998a, 1998c; ZHANG, 1990; PAREKH; GALLAGER, 1993). Muitos destes algoritmos são também capazes de fornecer garantias de atraso determinísticas quando a rajada de tráfego da sessão é limitada, por exemplo, quando modelada por um balde de fichas.

¹⁹Saída *bufferada* normalmente é utilizada quando existe uma diferença entre a taxa em que os dados são recebidos e a taxa em que eles podem ser processados, ou no caso em que essas taxas são variáveis.

Existe uma quantidade significativa de trabalhos que analisam vários tráfegos de algoritmos de escalonamento (descritos na Seção 2.7), a maioria destes estudos são aplicados somente para um algoritmo de escalonamento em particular. Poucos trabalhos têm sido reportados na análise das características de serviços oferecidos para sessões individuais na rede de servidores onde os escalonadores, no caminho da sessão, podem usar diferentes algoritmos de escalonamento.

Uma vez que é improvável que as redes sejam homogêneas, no quesito tipo de algoritmos de escalonamento empregado pelo roteador individual, um modelo geral para a análise de algoritmos de escalonamento é um instrumento valioso no projeto e análise dessas redes. No trabalho de (STILIADIS; VARMA, 1998b) foi desenvolvido um modelo para estudar o comportamento do pior caso de sessões individuais em uma rede de escalonadores onde esses escalonadores podem empregar uma ampla variedade de algoritmos de escalonamento. Essa abordagem permite calcular os limites justos para o atraso fim-a-fim de sessões individuais e o tamanho do *buffer* necessário para suportar uma rede arbitrária de escalonadores.

A abordagem básica consiste na definição de uma classe geral de escalonadores, chamado de servidor *Latency-Rate*, ou simplesmente servidor *LR*. A teoria dos servidores *LR* fornece um meio para descrever o comportamento do pior caso de uma ampla gama de algoritmos de escalonamento de uma forma simples e elegante. Essa teoria é baseada no conceito de um período ocupado de uma sessão, que é um período de tempo durante o qual a taxa média de chegada na sessão permanece igual ou acima da sua taxa alocada r_i . Para que um algoritmo de escalonamento pertença à classe *LR*, é necessário apenas que a taxa média de serviço oferecido pelo escalonador, para uma sessão ocupada, durante todos os intervalos de partida no tempo θ_i do início do período ocupado, seja pelo menos igual a sua taxa alocada. O parâmetro θ_i é chamado de latência do escalonador.

O comportamento de um escalonador *LR* é determinado por dois parâmetros: a latência (θ_i) e a taxa alocada (r_i). A latência de um servidor *LR* pode ser dita como o pior caso de atraso medida pelo primeiro pacote do período ocupado de uma sessão, que é um pacote chegando quando a fila da sessão está vazia. A latência de um algoritmo de escalonamento particular pode depender de seus parâmetros internos, da sua taxa de transmissão no enlace de saída e das taxas alocadas de várias sessões. No entanto, o máximo atraso fim-a-fim experimentado por um pacote em uma rede de escalonadores pode ser calculado somente pelas latências dos escalonadores individuais no caminho da sessão, e os parâmetros de tráfego da sessão que gerou o pacote. Uma vez que o atraso máximo de um escalonador aumenta diretamente na proporção de sua latência, o modelo traz à tona a importância do uso de escalonadores de baixa latência para alcançar um atraso fim-a-fim baixo.

3.2 MECANISMO *TOKEN BUCKET*

O mecanismo *token bucket* é frequentemente utilizado para controlar a taxa de pacotes que são injetados em uma rede. Ele funciona bem para o tráfego em rajadas. Dois parâmetros são necessários para seu mecanismo de controle: tamanho do balde (*bucket*) σ e taxa das fichas (*token*) ρ . O funcionamento do mecanismo *token bucket* pode ser visto na Seção 3.4.

Um balde de fichas (GOSH et al., 2005) é um contador não-negativo que acumula fichas a uma taxa constante ρ_i até o contador atingir a capacidade σ_i . Cada ficha representa uma unidade de *bytes* ou uma unidade de pacote de dados (*Packet Data Unit - PDU*) na camada de rede. Quando um pacote é gerado, ele é colocado como primeiro da fila de pacotes. Não é permitido transmitir pacotes, até que a fila possua fichas. Se não há nenhum pacote gerado, a fila de pacotes é vazia e a produção de fichas é armazenada em um balde de fichas. Pacotes da sessão i podem ser liberados para a fila somente após a remoção do número necessário de fichas do balde de fichas. Se o balde de fichas está vazio, pacotes que chegam são descartados. Se o balde está cheio, uma quantidade máxima de σ_i pacotes podem ser enviados para a fila. Quando não há fluxo ou está rodando a uma taxa inferior tal que a quantidade de fichas atinja o limite máximo σ_i , o acúmulo de fichas é suspenso até a chegada do próximo pacote. É assumido que a sessão se inicie com o balde cheio de fichas.

3.3 MODELO ANALÍTICO DO NOVO ESCALONADOR

A Figura 17 ilustra uma rede sem fio com a proposta de um novo escalonador com controle

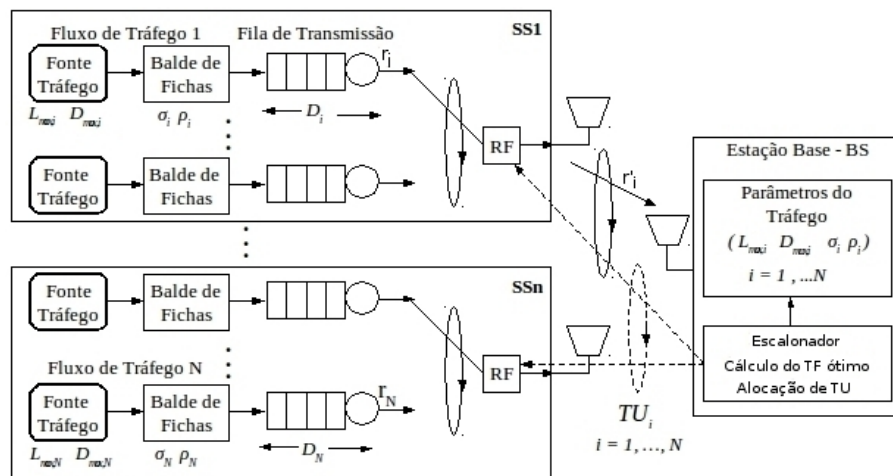


Figura 17 - Rede sem fio com o novo escalonador com controle de admissão de conexão

Fonte: adaptado de (FORONDA et al., 2007).

de admissão de conexão, que é baseado em uma modificação do escalonador LR (STILIADIS; VARMA, 1998b) e utiliza o algoritmo do balde de fichas, também conhecido como *token bucket*, para modelagem do tráfego de entrada.

A abordagem básica desse novo escalonador com controle de admissão de conexão consiste de que o balde de fichas pode limitar a entrada do tráfego e o escalonador LR pode prover uma taxa de alocação para cada usuário. Desta forma, se a taxa alocada pelo escalonador LR é maior que a taxa do balde de fichas, um atraso máximo é calculado.

Um escalonador que provê garantia de largura de banda pode ser modelado como um escalonador LR. O comportamento deste escalonador é determinado por dois parâmetros para cada sessão i : latência θ_i e taxa alocada do servidor r_i . A latência θ_i do escalonador pode ser vista como o pior caso de atraso e depende dos parâmetros de alocação de recursos da rede. No novo escalonador com controle de admissão de conexão, latência θ_i é um período do tempo do quadro, do tempo para transmitir um pacote de tamanho máximo e dos intervalos que separam os sub-quadros *downlink* e *uplink* (TTG (*Transmitter-receiver Turnaround Gap*) e RTG (*Receiver-transmitter Turnaround Gap*)).

A taxa alocada r_i é a taxa fornecida pelo servidor e deve ser maior que a taxa de serviço $S_i(t)$ ofertada durante o intervalo $(0, t)$ pelo escalonador. No gráfico da Figura 18, pode ser observado que o atraso máximo D_i é limitado pelo atraso do balde de fichas ($\sigma_i + \rho_i t$) e pelo atraso do escalonador LR e esse atraso máximo depende da latência θ_i e taxa alocada $r_i(t - \theta_i)$ e é mostrado abaixo como obtê-lo para o novo escalonador com controle de admissão de conexão. No gráfico, $A_i(t)$ se refere ao tráfego de entrada e $L_{max,i}$ ao tamanho máximo de um pacote.

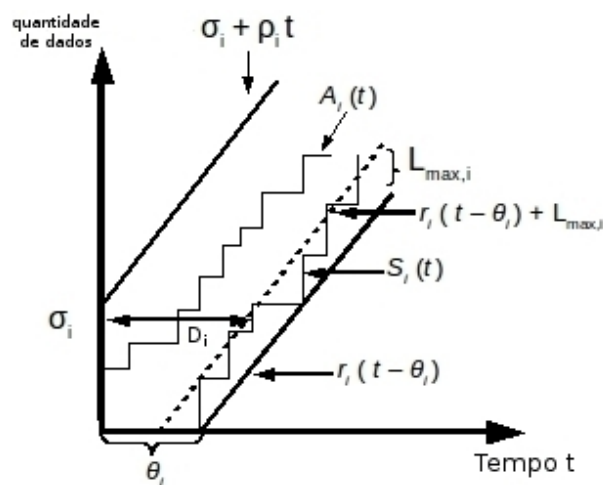


Figura 18 - Atraso máximo D_i

Fonte: adaptado de (FORONDA et al., 2007).

Considerando o atraso para a transmissão do primeiro pacote, a latência θ_i do escalonador é calculada pela equação

$$\theta_i = T_{TTG} + T_{RTG} + T_{DL} + T_{UL} + \frac{L_{max,i}}{R}, \quad (3)$$

sendo que T_{TTG} e T_{RTG} são os intervalos de separação dos sub-quadros de *downlink* e de *uplink*, T_{DL} e T_{UL} são a duração do tempo dos sub-quadros de *downlink* e de *uplink*, respectivamente, $L_{max,i}$ é o tamanho máximo de um pacote e R é a capacidade do canal de saída.

A seguir, é demonstrado como determinar a taxa alocada r_i para cada sessão i e como otimizar o tempo do quadro TF com o objetivo de aumentar o número de conexões acomodadas pelo CAC (Controle de Admissão de Conexão).

3.4 DESCRIÇÃO DO CONTROLE DE ADMISSÃO DE CONEXÃO

Um escalonador LR pode prover um limite de atraso se o tráfego de entrada é modelado por um balde de fichas. O modelo apresentado, considera para cada pacote, o cabeçalho determinado pelo padrão IEEE 802.16. Dessa forma, a quantidade de fichas do balde é diminuída pelo tamanho do pacote e pelo cabeçalho, que é mostrado a seguir.

A aplicação usando a sessão i declara o tamanho máximo do pacote $L_{max,i}$ e requisita o atraso máximo permitido $D_{max,i}$, que é utilizado pelo escalonador para calcular a taxa de serviço para cada sessão para garantir a requisição de atraso e otimizar o número de estações na rede. Desta forma, o tráfego de entrada $A_i(t)$ da sessão i ($i = 1, \dots, N$) passa dentro do balde de fichas da SS durante o intervalo $(0, t)$, conforme apresentado na Figura 19.

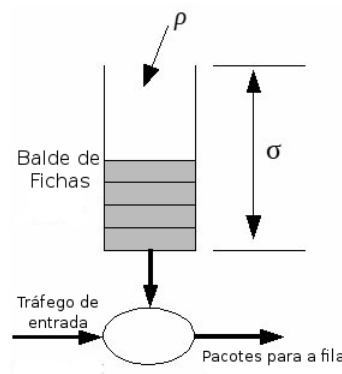


Figura 19 - Tráfego de entrada com o balde de fichas

Fonte: Autoria própria.

Essa passagem do tráfego de dados pelo balde de fichas é limitado pela equação

$$A_i(t) \leq \sigma_i + \rho_i t, \quad (4)$$

sendo que $A_i(t)$ é tráfego de entrada, σ_i é o tamanho do balde de fichas e ρ_i é a taxa do balde de fichas no período t .

Então, o pacote fica na fila da estação até que ele acesse o meio sem fio e transmita. O atraso na fila é medido desde quando o último bit do pacote é recebido e enfileirado na estação, até que ele acesse o meio sem fio e transmita. No novo escalonador com controle de admissão de conexão, o atraso na fila depende dos parâmetros do balde de fichas, da latência da rede e taxa alocada. Em (STILIADIS; VARMA, 1998b) e (PAREKH; GALLAGER, 1993), é mostrado que se o tráfego de entrada $A_i(t)$ é modelado por um balde de fichas e se o escalonador alocar uma taxa do servidor r_i , então um escalonador LR pode prover um atraso máximo D_i limitado por

$$D_i \leq \frac{\sigma_i}{r_i} + \theta_i - \frac{L_{max,i}}{r_i}, \quad (5)$$

sendo que r_i é a taxa alocada pelo servidor, σ_i é o tamanho do balde de fichas, θ_i é a latência do escalonador e $\frac{L_{max,i}}{r_i}$ é a diferença entre a envoltória superior e inferior no gráfico da Figura 18. Também tem-se que, $\frac{\sigma_i}{r_i} + \theta_i - \frac{L_{max,i}}{r_i}$ é o limite de atraso D_{bound} .

A Equação (5) é um limite de atraso melhorado para o escalonador LR, sendo que no gráfico da Figura 18, a menor inclinação do servidor ($r_i(t - \theta_i)$) é o menor limite válido para o serviço em qualquer ponto do período ocupado e a maior inclinação do servidor ($\sigma_i + \rho_i t$) é válida no ponto quando um pacote sai do sistema. Dessa forma, pode-se calcular o atraso baseado nesta inclinação superior, cujo resultado é um limite de atraso máximo na rede (STILIADIS; VARMA, 1998b).

O escalonador LR com balde de fichas provê um limite de atraso pois o tráfego é limitado entre a inclinação do balde de fichas e a inclinação superior do servidor mostrada no gráfico da Figura 18 e estimada pela Equação (5). Assim, a taxa do balde de fichas mais a taxa para transmitir o cabeçalho, deve ser menor do que a taxa do servidor para o limite do atraso. O limite de atraso superior D_{bound} deve ser menor ou igual ao atraso máximo requerido que pode ser admitido

$$\frac{\sigma_i}{r_i} + \theta_i - \frac{L_{max,i}}{r_i} \leq D_{max,i}, \quad (6)$$

sendo que σ_i é o tamanho do balde de fichas, r_i é a taxa alocada pelo servidor, θ_i é a latência do escalonador e $\frac{L_{max,i}}{r_i}$ é a diferença entre a envoltória superior e inferior no gráfico da Figura 18.

Assim, existem três diferentes atrasos que estão definidos nesse contexto. O primeiro é o atraso máximo D_i , o segundo é o limite de atraso D_{bound} e o terceiro é o atraso máximo requerido que pode ser admitido $D_{max,i}$. A relação entre eles é $D_i \leq D_{bound} \leq D_{max,i}$.

Então, levando em consideração esses pressupostos, podemos descrever a equação da condição de restrição do atraso para o novo escalonador com controle de admissão de conexão, que é

$$\frac{(\sigma'_i - L'_{max,i})TF}{r'_i TF - \Delta R + L'_{max,i}} + TF + \frac{L'_{max,i}}{R} + T_{TTG} + T_{RTG} \leq D_{max,i}, \quad (7)$$

sendo que σ'_i é o tamanho do balde de fichas com o cabeçalho, $L'_{max,i}$ é o tamanho máximo de um pacote com o cabeçalho (*preamble + pad* do padrão IEEE 802.16), TF é o tempo do quadro, r'_i é a taxa alocada pelo servidor com o cabeçalho, R é a capacidade física do canal, T_{TTG} é o intervalo de tempo entre o subquadro de *downlink* e *uplink*, T_{RTG} é o intervalo de tempo entre o subquadro de *uplink* e *downlink*, $D_{max,i}$ é o atraso requerido pelo usuário e Δ é a soma do intervalo de reserva (*initial ranging*)²⁰ e da mensagem de requisição de largura de banda (*BW Request*), que é o cabeçalho do sub-quadro de *uplink*.

Na Figura 20 é demonstrada a estrutura de um quadro TDD com alocação das fórmulas descritas na Equação 7.

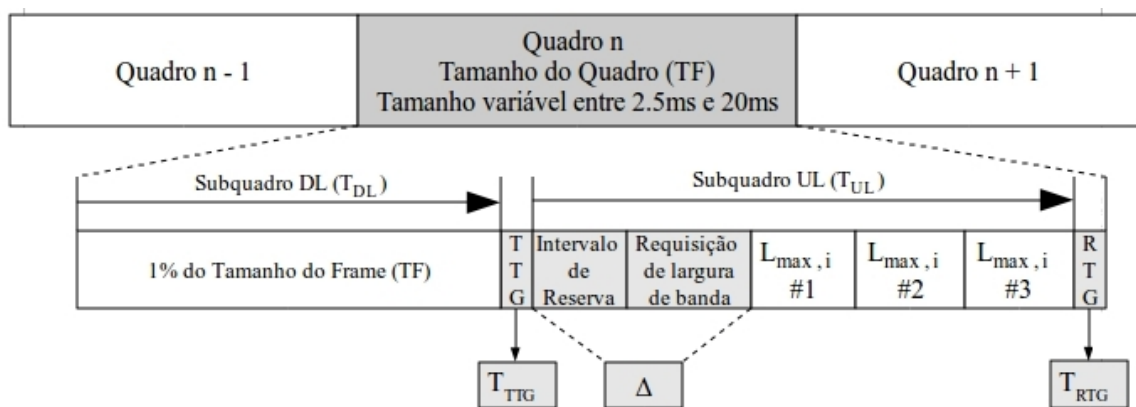


Figura 20 - Estrutura do quadro TDD com alocação das fórmulas

Fonte: Autoria própria.

A taxa física, o tamanho máximo do pacote e o tamanho do balde de fichas são parâmetros

²⁰Intervalo de reserva onde as SSs requisitam oportunidades de transmissão em um sub-quadro de *uplink*.

declarados pela aplicação. Entretanto, o tempo de duração do quadro (TF) e o total da taxa alocada do servidor são parâmetros que devem ser calculados para satisfazer (7). A Equação (8) é a segunda condição de restrição para calcular o TF e a taxa do servidor. A taxa do balde de fichas mais a taxa para transmitir o cabeçalho e o tamanho máximo do pacote devem ser menor que a taxa do servidor para o limite de atraso. Então, esta segunda condição de restrição é

$$\rho_i + \frac{\Delta R + L'_{max,i}}{TF} \leq r'_i, \quad (8)$$

sendo que ρ_i é taxa do balde de fichas, Δ é o cabeçalho do sub-quadro *uplink*, R é a capacidade física do canal, $L'_{max,i}$ é o tamanho máximo de um pacote com os cabeçalhos, TF é o tempo do quadro e r'_i é a taxa do servidor (r_i) com o cabeçalho.

Os escalonadores apresentados na Seção 2.7 não proviam qualquer mecanismo para estimar o TF e garantir o atraso máximo ou para maximizar o número de estações em um sistema, porque cada aplicação requisitava um TF sem nenhuma destas condições de restrição para calcular o tempo de cada SS. Entretanto, o valor estimado de um TF é importante, pois existe um equilíbrio entre um pequeno e um grande valor de TF. TFs com valores pequenos reduzem o atraso máximo, no entanto, aumentam o valor do cabeçalho de cada quadro, ao mesmo tempo. Por outro lado, para TFs com valores altos o valor do cabeçalho diminui, mas o atraso aumenta. Portanto, é necessário calcular um valor de TF ótimo para alocar um número máximo de SSs sob as duas condições de restrição (7) e (8). O número máximo de SSs é alcançado quando a taxa do servidor para cada SS é a mínima para garantir o limite de atraso D_{bound} . Dessa forma, é necessário encontrar o valor mínimo para a seguinte função

$$f(TF) = \frac{\sum_{i=1}^n TU_i}{TF} \rightarrow \min, (TF > 2.5ms), \quad (9)$$

sendo que TU_i é o tempo que cada SS tem para transmitir os pacotes de dados.

Diferentes técnicas de otimização podem ser utilizadas para resolver este problema. Nesse trabalho, é utilizada uma abordagem passo-a-passo, que não altera o objetivo do novo escalonador com controle de admissão de conexão. O procedimento é iniciado com o valor para o TF em $2.5ms$, sendo calculado o valor para r'_i e o procedimento é repetido neste processo, aumentando o valor do TF em $0.5ms$ até encontrar o valor mínimo para r'_i que satisfaça ambas as condições de restrição (7) e (8). Os valores estão demonstrados no Capítulo 4 desse trabalho.

Encontrado o valor ótimo do TF, tem-se a taxa mínima do servidor para cada fluxo de limite de atraso e o valor de TU, para cada fluxo, pode ser calculado através de

$$TU_i = \frac{r'_i TF}{R} - \Delta, \quad (10)$$

sendo que TU_i é o tempo que cada SS terá para transmitir seus pacotes, r'_i é a taxa alocado pelo servidor com os cabeçalhos, TF é o tempo do quadro, R é a capacidade física do canal e Δ é o cabeçalho do sub-quadro *uplink*.

A estimativa de valores para TF e TU são executadas novamente se novas SSs requisitarem acesso para a BS, se SSs deixarem a rede, ou se uma SS trocar seus parâmetros de QoS. Foi demonstrado que o novo escalonador com controle de admissão de conexão é diferente dos escalonadores vistos anteriormente, porque os valores de TF e TU, que são utilizados para aceitar novas conexões, são estimados para otimizar o número de SSs na rede.

3.5 DESCRIÇÃO DO ESCALONAMENTO

Após ser calculado o tempo de cada usuário (TU_i), o sistema, conforme demonstrado na Figura 17, utilizando a disciplina de escalonamento *Round Robin* (RR)²¹, faz o escalonamento de cada usuário, que está demonstrado na Figura 21.

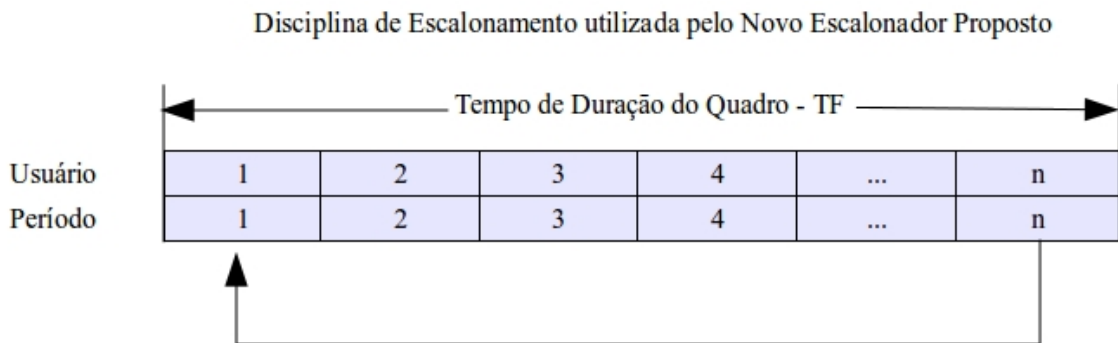


Figura 21 - Modelo de escalonamento do TF utilizando a disciplina RR

Fonte: Autoria própria.

A alocação de usuário no sistema se comporta tendo como parâmetro a duração do tempo de cada quadro, que foi calculado, sendo que uma capacidade n de usuários serão alocados, tendo o usuário 1 sua alocação no período 1, o usuário 2 sendo alocado do período 2, e assim por diante, até chegar ao tamanho da duração do quadro.

²¹Round Robin é um método para selecionar todos os elementos em um grupo de maneira equitativa e em uma ordem racional, normalmente começando pelo primeiro elemento da lista até chegar ao último e começando de novo desde o primeiro elemento. O planejamento Round Robin é tão simples como fácil de implementar, e está livre de inanição.

4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO

Para analisar o comportamento do protocolo MAC do padrão IEEE 802.16 com relação a proposta do novo escalonador com controle de admissão de conexão, esse capítulo apresenta resultados numéricos obtidos com o modelo analítico, proposto no capítulo anterior, por fim, através de uma ferramenta de simulação, o modelo analítico proposto foi validado, onde o limite de atraso máximo é garantido.

Nessa dissertação, dois tipos de atrasos são tratados, **atraso requerido**, onde é o usuário que requer o limite de atraso e o **atraso máximo garantido** que é calculado pelo modelo analítico desenvolvido para esse trabalho.

4.1 CÁLCULO DO TEMPO DO QUADRO (TF) ÓTIMO E QUANTIDADE MÁXIMA DE USUÁRIOS ALOCADOS EM CADA QUADRO

Nessa dissertação, o valor do sub-quadro *downlink* é fixado em 1% do tempo de duração do TF porque o interesse é somente no sub-quadro *uplink*. Na simulação, após ser encontrado o número ótimo de SSS por quadro para cada fluxo de tráfego, o valor do cabeçalho do sub-quadro *uplink* é calculado a uma taxa de 10% do valor de um símbolo OFDM²². Todos os parâmetros das camadas PHY e MAC, utilizados nesta simulação estão sumarizados na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros das camadas PHY e MAC

Largura de Banda	20 MHz
Duração do Símbolo OFDM	13.89 μs
Atraso Requerido pelo Usuário	5 / 10 / 15 e 20 ms
Δ (Initial Ranging e BW Request) \rightarrow 9 símbolos OFDM	125.10 μs
TTG + RTG \rightarrow 1 símbolo OFDM	13.89 μs
Sub-quadro de <i>uplink</i> (cabeçalho) \rightarrow 10% Símbolo OFDM	1.39 μs
Taxa de Dados Máxima	70 Mbps
Sub-quadro de <i>downlink</i>	1% do valor de TF

Fonte: Autoria própria.

O desempenho do novo escalonador com controle de admissão de conexão é avaliado atra-

²²O valor de um símbolo OFDM foi calculado na seção 2.4.5 e mais detalhes para o cálculo da um símbolo OFDM podem ser encontrados em (GOSH et al., 2005).

vés do atraso requerido pelo usuário e das estações alocadas. Os resultados da alocação de estações no sistema, através de um TF ótimo, limitado pelo atraso requerido pelo usuário, são descritos na sequência.

O primeiro passo é definir os parâmetros do balde de fichas, que são estimados de acordo com as características do tráfego de entrada e estão relacionados na Tabela 7. Vale a pena salientar que o tráfego de envio deve ser conhecido com antecedência. Isso é normal para diversas aplicações, tais como áudio, CBR e vídeo sob demanda.

Tabela 7 - Parâmetros do balde de fichas

	Áudio	Vídeo VBR	Vídeo MPEG4
Tamanho do Balde (bits)	3000	18000	10000
Taxa do Balde (kb/s)	64	500	4100

Fonte: Autoria própria.

Os parâmetros do balde de fichas podem ser estimados através de um esquema muito simples. Para iniciar, escolhe-se o tamanho do balde de fichas e a taxa do balde de fichas muito maior do que o tamanho máximo do pacote e a taxa de aplicação média. Depois disso, diminui-se a quantidade de fichas, até que o balde de fichas inicie o descarte de pacotes. Também, diminui-se a taxa do balde de fichas até que inicie o descarte de pacotes. Esses são os parâmetros mínimos do balde de fichas porque não haverá nenhum pacote para descartar.

Dessa forma, o valor do TF ótimo é estimado de acordo com os parâmetros do balde de fichas, o atraso máximo requerido que pode ser admitido, a taxa física e o tamanho máximo do pacote. O gráfico da Figura 22 mostra o valor mínimo da função (9), o qual corresponde ao valor ótimo do TF, para quatro valores de atraso requeridos pelos usuários (5, 10, 15 e 20 ms).

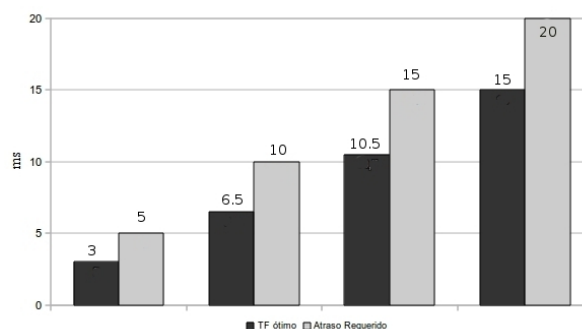


Figura 22 - Valor do TF ótimo

Fonte: Autoria própria.

Conforme o gráfico da Figura 22, para o atraso de 5 ms, o valor do TF ótimo é de 3 ms. Para

o atraso de 10 *ms*, tem-se um valor de TF ótimo de 6.5 *ms*. Para um atraso de 15 *ms*, o valor do TF ótimo é de 10.5 *ms*, e, finalmente, para um atraso de 20 *ms*, o valor do TF ótimo é de 15 *ms*.

A seguir, é mostrado o número de SSs alocadas para cada tipo de tráfego. O resultado mostra o número máximo de SSs alocadas com um valor ótimo de TF para cada tipo de tráfego. Salienta-se que três tipos de fluxo de tráfego foram utilizados: tráfego de áudio, tráfego de vídeo VBR e tráfego de vídeo MPEG4. Para efeitos de simulação, a alocação de usuários é realizada por tipo de tráfego, ou seja, somente um tráfego por vez será transmitido dentro de cada quadro.

No gráfico da Figura 23, com um atraso de 5 *ms*, tem-se um valor ótimo de TF de 3 *ms* e os seguintes números de SSs alocadas para cada fluxo:

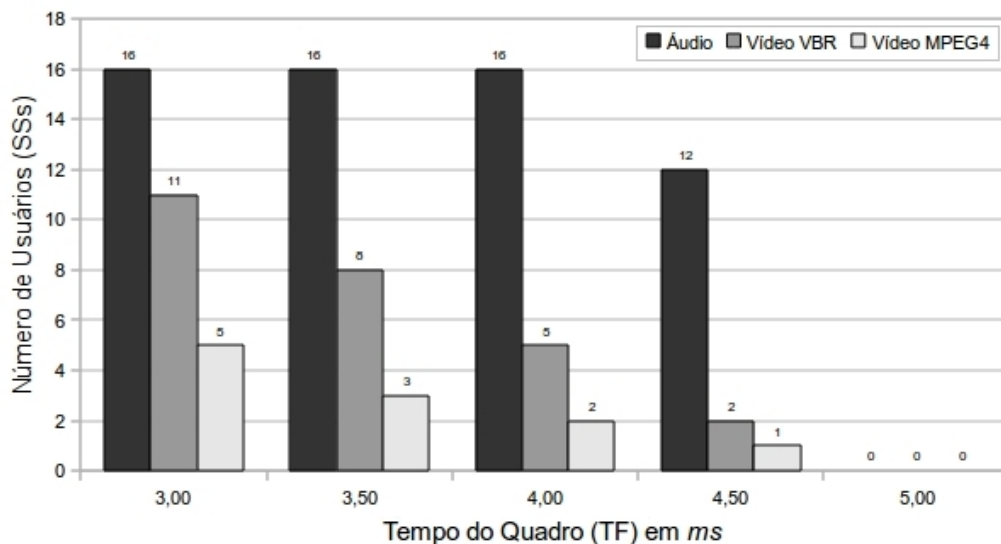


Figura 23 - Número de SSs alocadas para o atraso requerido de 5 *ms*

Fonte: Autoria própria.

- Para o tráfego de áudio, o número de SSs alocadas é de 16; ou
- Para tráfego de vídeo VBR, o número de SSs alocadas é de 11; ou
- Para o tráfego de vídeo MPEG4, o número de SSs alocadas é de 5.

No gráfico da Figura 23, duas importantes observações devem ser destacadas:

1. Com um atraso requerido de 5 *ms*, não é possível escolher um TF com tempo menor do que 3 *ms*, pois as restrições da equação (7), que é a restrição em relação ao atraso, e da equação (8), que é a restrição em relação ao balde de fichas (*token bucket*), não são

cumpridas e não haverá garantia de banda para alocação dos usuários com TFs menores do que 3 *ms*.

2. Também não poderá ser escolhido um TF maior do que 3 *ms* pois, mesmo cumprindo as restrições das equações (7) e (8) com relação a garantia de banda, haverá uma diminuição na quantidade de usuários alocados em cada fluxo de tráfego, devido ao aumento do valor do atraso.

Dessa forma, fica evidente que, como o padrão IEEE 802.16 não especifica um tempo ideal de duração do quadro (TF), essa abordagem torna-se vantajosa em relação ao padrão, pois, além de cumprir as restrições do modelo analítico, estará otimizando a alocação de usuários no sistema. Essa mesma filosofia vale para os outros valores de atraso abordados nesse trabalho (10, 15 e 20 *ms*).

No gráfico da Figura 24, com um atraso de 10 *ms*, tem-se um valor ótimo de TF de 6.5 *ms* e os seguintes números de SSs alocadas para cada fluxo:

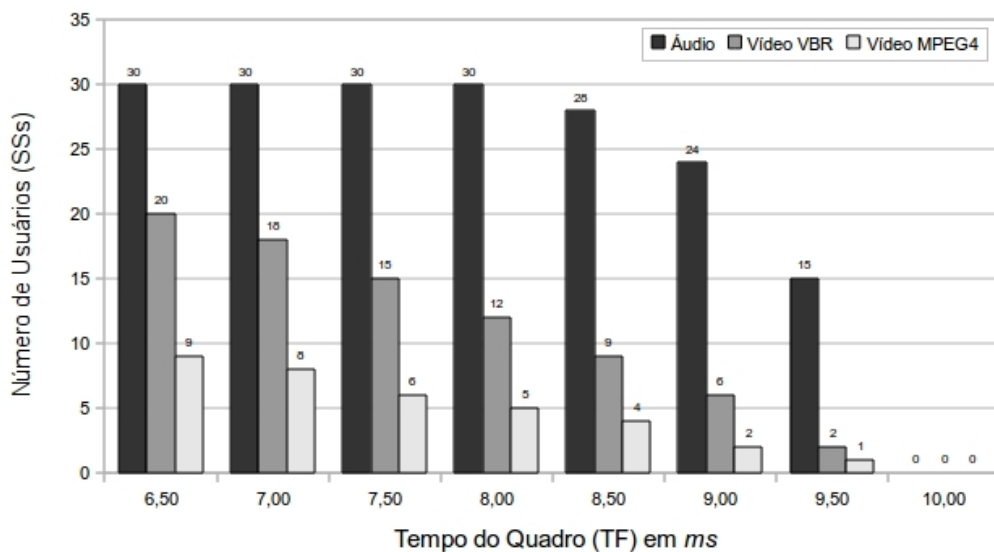


Figura 24 - Número de SSs alocadas para o atraso requerido de 10 *ms*

Fonte: Autoria própria.

- Para o tráfego de áudio, o número de SSs alocadas é de 30; ou
- Para tráfego de vídeo VBR, o número de SSs alocadas é de 20; ou
- Para o tráfego de vídeo MPEG4, o número de SSs alocadas é de 9.

No gráfico da Figura 25, com um atraso de 15 ms, tem-se um valor ótimo de TF de 10.5 ms e os seguintes números de SSs alocadas para cada fluxo:

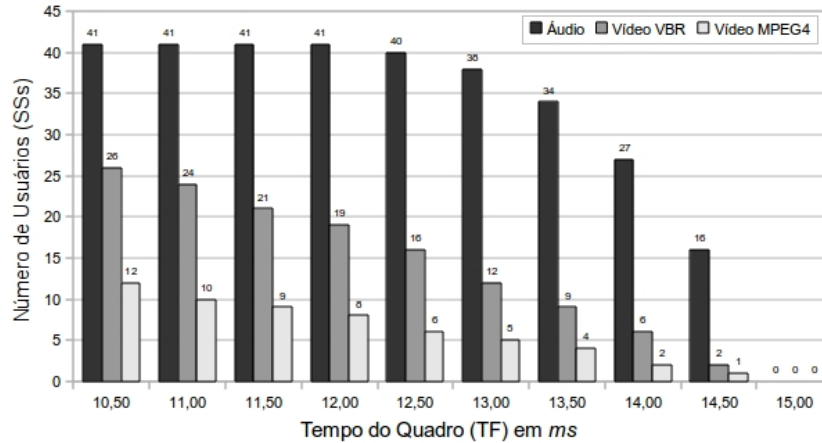


Figura 25 - Número de SSs alocadas para o atraso requerido de 15 ms

Fonte: Autoria própria.

- Para o tráfego de áudio, o número de SSs alocadas é de 41; ou
- Para tráfego de vídeo VBR, o número de SSs alocadas é de 26; ou
- Para o tráfego de vídeo MPEG4, o número de SSs alocadas é de 12.

No gráfico da Figura 26, com um atraso de 20 ms, tem-se um valor ótimo de TF de 15 ms e os seguintes números de SSs alocadas para cada fluxo:

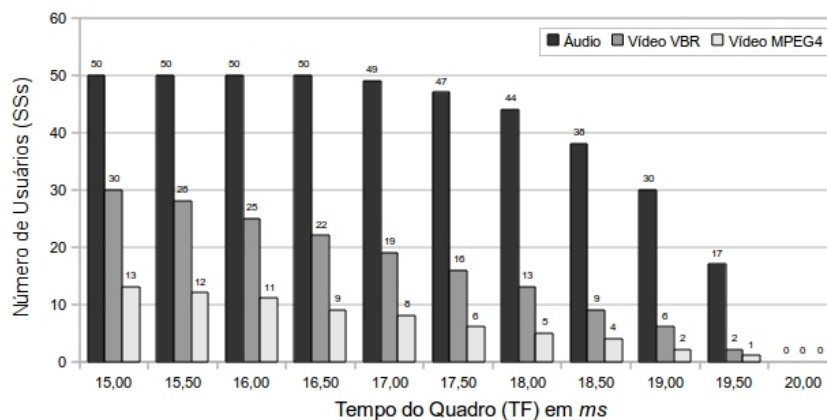


Figura 26 - Número de SSs alocadas para o atraso requerido de 20 ms

Fonte: Autoria própria.

- Para o tráfego de áudio, o número de SSs alocadas é de 50; ou
- Para tráfego de vídeo VBR, o número de SSs alocadas é de 30; ou
- Para o tráfego de vídeo MPEG4, o número de SSs alocadas é de 13.

4.1.1 Comparação da Alocação de Usuários no TF Ótimo

No desenvolvimento desse trabalho, um TF ótimo foi alcançado, para que se possa maximizar o número de SSs na rede, com garantia do atraso máximo.

Para fazer uma comparação com o resultado desse trabalho, no gráfico da Figura 27, demonstra-se que, para um tráfego de áudio, para um atraso de 15 *ms*, um TF ótimo de 10.5 *ms* é obtido e 41 usuários podem ser alocados. Quando comparado com outros TFs, escolhidos aleatoriamente, percebe-se que o TF ótimo comporta um número maior de usuários.

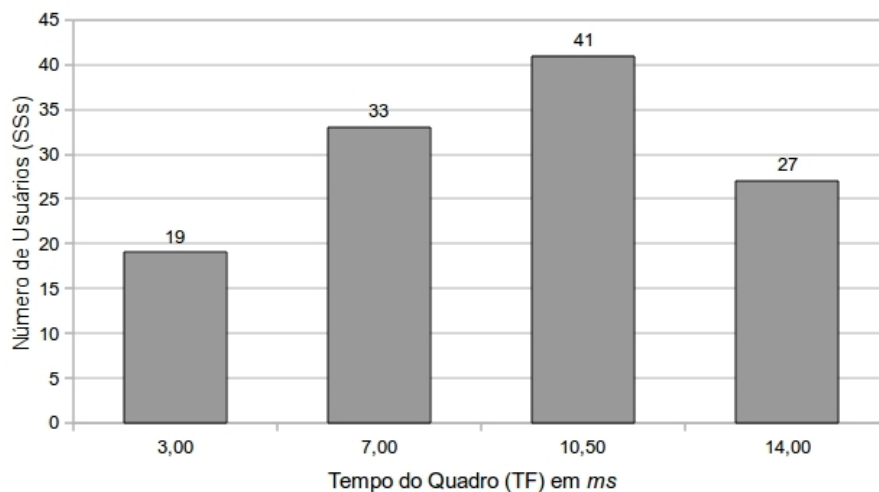


Figura 27 - Usuários alocados com vários TFs e TF ótimo para o tráfego de áudio

Fonte: Autoria própria.

Como mencionado na Seção 4.1, quando um atraso for requerido, um TF ótimo é calculado para alocar uma quantidade otimizada de usuários em determinado fluxo de tráfego. No gráfico da Figura 27, com um atraso requerido de 15 *ms*, o TF ótimo calculado é de 10.5 *ms*, comportando 41 usuários alocados. Novamente salienta-se que, com a escolha de um TF diferente do TF ótimo, poderemos estar incorrendo na não garantia de banda, pelo não cumprimento das restrições das equações (7) e (8), quando o TF for menor do que o TF ótimo, ou, na não otimização da alocação de usuários no sistema, quando o TF for maior do que o TF ótimo.

Pode-se perceber que se a escolha de um valor de TF não for o otimizado, o número de SSs

alocadas irá diminuir. Dessa forma, o novo escalonador com controle de admissão de conexão maximiza o número de SSs alocadas e garante um limite de atraso máximo, que é demonstrado na seção seguinte.

4.2 ATRASO MÁXIMO GARANTIDO

Esta seção demonstra que o novo escalonador com controle de admissão de conexão proposto atende ao atraso máximo garantido.

4.2.1 Cenário de Avaliação e Validação do Modelo

Nesse trabalho, somente foi considerado o tráfego *uplink*. Para a realização dos testes de desempenho do novo escalonador com controle de admissão de conexão para verificar a garantia de atraso máximo, foi simulada uma rede IEEE 802.16 composta por uma BS que se comunica com dezoito SSs, com somente um tipo de tráfego por SS e o destino de todos os fluxos é a BS, conforme mostrado na Figura 28.

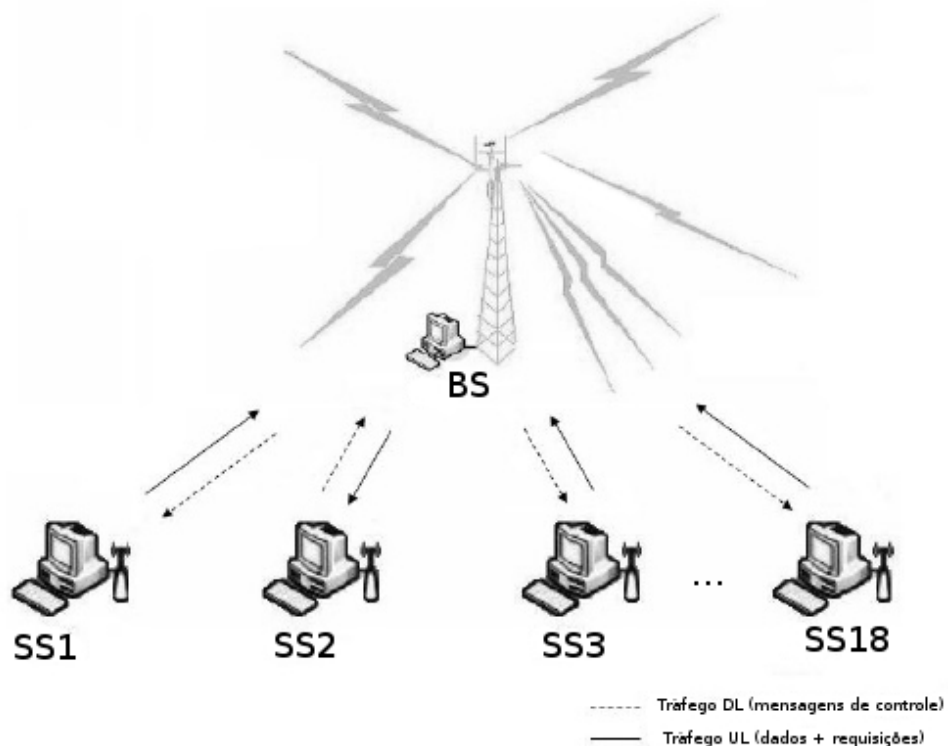


Figura 28 - Topologia da rede IEEE 802.16 utilizada na simulação

Fonte: Autoria própria.

Nessa topologia utilizada para simulação do atraso máximo garantido, existem diferentes tipos de tráfegos, sendo que, conforme a sumarização apresentada na Tabela 8, das dezoito SSs, seis enviam, para a BS, tráfego de áudio CBR, seis SSs enviam tráfego de vídeo CBR MPEG4 e seis SSs enviam tráfego de vídeo VBR.

Tabela 8 - Descrição de diferentes tráfegos

SS	Aplicação	Período de Chegada (ms)	Tamanho do Pacote (max) (bytes)	Taxa de Envio (kb/s) (média)
1 → 6	Áudio	4.7	160	64
7 → 12	Vídeo VBR	26	1024	≈ 200
13 → 18	Vídeo MPEG4	2	800	3200

Fonte: Autoria própria.

No Anexo A tem-se a estrutura do simulador e o seu código fonte, desenvolvido na linguagem de programação C (RITCHIE; KERNIGHAN, 1989).

Nas Figuras 29, 30, 31 e 32, tem-se os três tipos de tráfego propostos na simulação, quais sejam, áudio, vídeo VBR e vídeo MPEG4. Nas Tabelas 9, 10 e 11, ao final dessa seção, tem-se a quantidade de pacotes lidos em cada simulação, com seus respectivos atrasos máximos.

Na Figura 29, com um TF ótimo de 3 ms e atraso requerido de 5 ms, o tráfego de áudio obteve a média de atraso máximo garantido de 1.50 ms. Para o tráfego de vídeo VBR, com a quantidade de pacotes lidos sendo variável, a média de atraso máximo garantido foi de 1.97 ms. Já para o tráfego de vídeo MPEG4 a média de atraso máximo garantido foi de 2.00 ms.

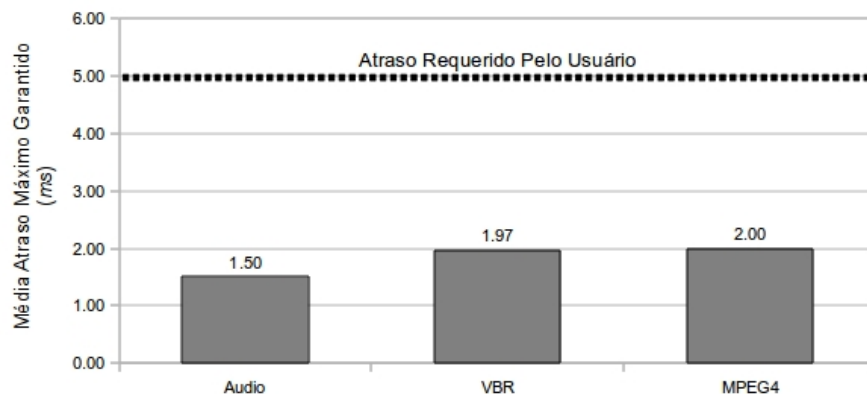


Figura 29 - Atraso máximo garantido para TF ótimo de 3 ms e atraso de 5 ms

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 30, com um TF ótimo de 6.5 ms e atraso requerido de 10 ms, o tráfego de áudio obteve a média de atraso máximo garantido de 3.25 ms. Para o tráfego de vídeo VBR, com a quantidade de pacotes lidos sendo variável, a média de atraso máximo garantido foi de 3.43 ms.

Já para o tráfego de vídeo MPEG4 a média de atraso máximo garantido foi de 3.50 ms.

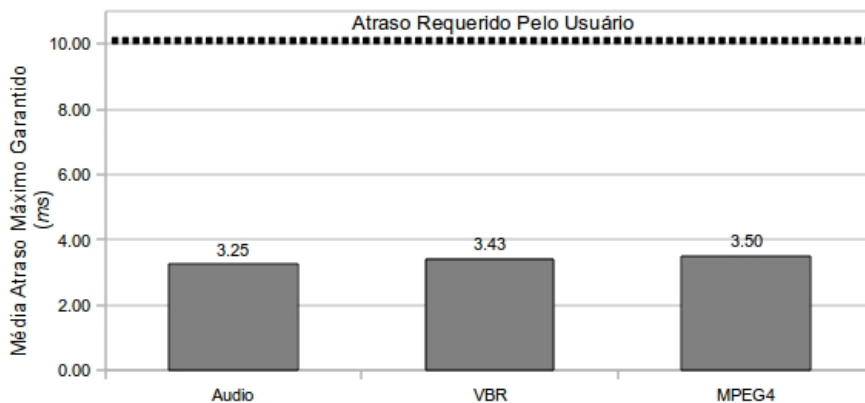


Figura 30 - Atraso máximo garantido para TF ótimo de 6.5 ms e atraso de 10 ms

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 31, com um TF ótimo de 10.5 ms e atraso requerido de 15 ms, o tráfego de áudio obteve a média de atraso máximo garantido de 5.26 ms. Para o tráfego de vídeo VBR, com a quantidade de pacotes lidos sendo variável, a média de atraso máximo garantido foi de 5.51 ms. Já para o tráfego de vídeo MPEG4 a média de atraso máximo garantido foi de 5.50 ms.

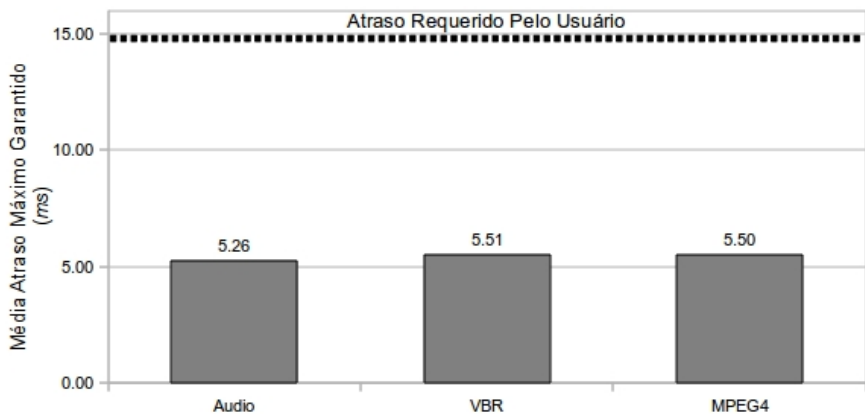


Figura 31 - Atraso máximo garantido para TF ótimo de 10.5ms e atraso de 15ms

Fonte: Autoria própria.

Na Figura 32, com um TF ótimo de 15 ms e atraso requerido de 20 ms, o tráfego de áudio obteve a média de atraso máximo garantido de 7.50 ms. Para o tráfego de vídeo VBR, com a quantidade de pacotes lidos sendo variável, a média de atraso máximo garantido foi de 8.03 ms. Já para o tráfego de vídeo MPEG4 a média de atraso máximo garantido foi de 8.00 ms.

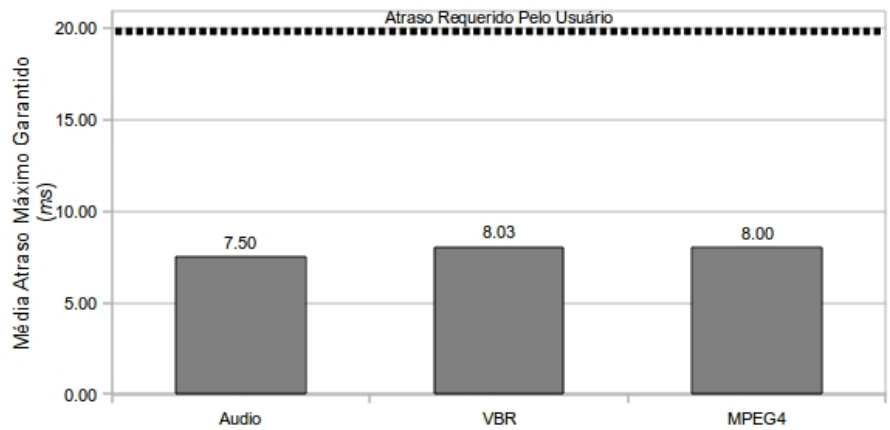


Figura 32 - Atraso máximo garantido para TF ótimo de 15 ms e atraso de 20 ms

Fonte: Autoria própria.

Os dados que subsidiaram a demonstração do atraso máximo garantido estão listados nas tabelas abaixo, com a quantidade de pacotes lidos em cada simulação e seus respectivos atrasos máximos garantidos.

A quantidade de simulações realizadas para cada tipo de tráfego foram fixadas em seis pelo fato de que o valor do atraso máximo garantido não ter uma grande variação em relação ao número de pacotes lidos. Dessa forma, com seis simulações percebeu-se que o valor tendia-se ao mesmo ou tinha uma variação muito pequena, ficando dentro da média.

Após a obtenção de todos os valores para cada TF ótimo e cada tipo de tráfego, a média do atraso máximo garantido é utilizada para a confecção dos gráficos mostrados anteriormente.

A Tabela 9 mostra os dados utilizados na simulação para o tráfego de áudio.

Tabela 9 - Tráfego de Áudio

Atraso Requerido	5 ms	10 ms	15 ms	20 ms
TF ótimo	3 ms	6.5 ms	10.5 ms	15 ms
Quantidade de Pacotes Lidos	Atraso Máximo Garantido (ms)			
1000	1.48	3.23	5.24	7.49
3000	1.49	3.24	5.24	7.50
5000	1.49	3.25	5.25	7.50
10000	1.50	3.25	5.25	7.50
30000	1.50	3.25	5.28	7.50
50000	1.50	3.35	5.29	7.51
MÉDIA	1.50	3.25	5.26	7.50
DESVIO PADRÃO	0.00816	0.00837	0.02137	0.00632

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 10 mostra os dados utilizados na simulação para o tráfego de vídeo VBR.

Tabela 10 - Tráfego de vídeo VBR

Atraso Requerido	5 ms	10 ms	15 ms	20 ms
TF ótimo	3 ms	6.5 ms	10.5 ms	15 ms
Quantidade de Pacotes Lidos	Atraso Máximo Garantido (ms)			
2176	2.06	3.48	5.50	7.98
1358	1.94	3.52	5.45	7.96
1177	1.97	3.48	5.59	8.07
1226	2.02	3.32	5.41	8.07
1159	1.87	3.33	5.57	8.08
1449	1.96	3.45	5.53	8.04
MÉDIA	1.97	3.43	5.51	8.03
DESVIO PADRÃO	0.06573	0.08438	0.06940	0.05125

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 11 mostra os dados utilizados na simulação para o tráfego de vídeo MPEG4.

Tabela 11 - Tráfego de vídeo MPEG4

Atraso Requerido	5 ms	10 ms	15 ms	20 ms
TF ótimo	3 ms	6.5 ms	10.5 ms	15 ms
Quantidade de Pacotes Lidos	Atraso Máximo Garantido (ms)			
1000	2.00	3.50	5.51	8.01
3000	2.00	3.50	5.50	8.00
5000	2.00	3.50	5.50	8.00
10000	2.00	3.50	5.50	8.00
30000	2.00	3.50	5.50	8.00
50000	2.00	3.50	5.50	8.00
MÉDIA	2.00	3.50	5.50	8.00
DESVIO PADRÃO	0.0	0.0	0.00408	0.00408

Fonte: Autoria própria.

A Figura 33 mostra, para cada atraso requerido pelo usuário (5 ms, 10 ms, 15 ms e 20 ms), o TF ótimo calculado e a média do atraso máximo garantido com os três tipos de tráfegos simulados (áudio, vídeo VBR e vídeo MPEG4).

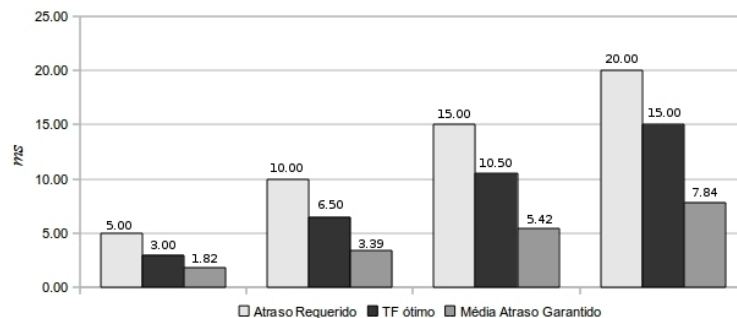


Figura 33 - Atraso requerido, TF ótimo e a média do atraso garantido nos três tipos de tráfego

Fonte: Autoria própria.

4.2.2 Comparação do Novo Escalonador Proposto (DOSCIATTI; GODOY-JÚNIOR; FORONDA, 2010) com Outros Escalonadores

Foram realizadas comparações com os trabalhos de Dosciatti, Godoy-Júnior e Foronda (2010) com Iyengar, Iyer e Sikdar (2005) e de Dosciatti, Godoy-Júnior e Foronda (2010) com Wongthavarawat e Ganz (2003). A comparação é realizada através da capacidade de alocação de usuários em um determinado tempo de duração do quadro (TF). A Tabela 12 mostra os parâmetros utilizados para as comparações dos trabalhos.

Tabela 12 - Parâmetros utilizados para as comparações

Largura de Banda	20 MHz
Duração do Símbolo OFDM	13.89 μs
Atraso Requerido pelo Usuário	dependente de cada comparação
Taxa de Dados Máxima	70 Mbps
Tipo de Tráfego	Áudio

Fonte: Autoria própria.

No gráfico da Figura 34, temos a comparação dos trabalhos de Dosciatti, Godoy-Júnior e Foronda (2010) com Iyengar, Iyer e Sikdar (2005). O atraso requerido pelo usuário foi de 0.12 ms e o tempo de duração de cada quadro (TF) foi fixado em 5 ms²³. Os demais parâmetros utilizados foram os relacionados na Tabela 12. Na comparação, o trabalho de Dosciatti, Godoy-Júnior e Foronda (2010) aloca 28 usuários em cada quadro, enquanto que o trabalho de Iyengar, Iyer e Sikdar (2005) 20 usuários são alocados, representando um desempenho 40% melhor para o trabalho de Dosciatti, Godoy-Júnior e Foronda (2010).

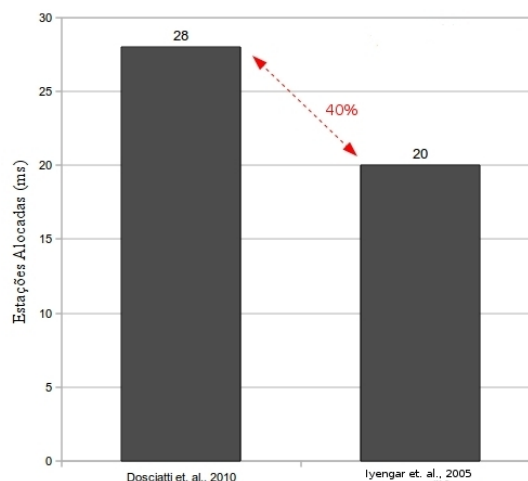


Figura 34 - Comparação de alocação de usuários de Dosciatti, Godoy-Júnior e Foronda (2010) com Iyengar, Iyer e Sikdar (2005)

Fonte: Autoria própria.

²³Esses valores são definidos no trabalho de (IYENGAR; IYER; SIKDAR, 2005).

No gráfico da Figura 35, temos a comparação dos trabalhos de Dosciatti, Godoy-Júnior e Foronda (2010) com Wongthavarawat e Ganz (2003). O atraso requerido pelo usuário foi de 20 ms e o tempo de duração de cada quadro (TF) foi fixado em 10 ms²⁴. Os demais parâmetros utilizados estão relacionados na Tabela 12. Nessa comparação estendeu-se o tempo de duração do quadro para os valores de 7.00 ms, 8.00 ms e 9.00 ms para demonstrar a eficiência do escalonador definido por Dosciatti, Godoy-Júnior e Foronda (2010). Para um TF de 10 ms, no trabalho de Dosciatti, Godoy-Júnior e Foronda (2010), 41 usuários foram alocados em cada quadro, enquanto que no trabalho de Wongthavarawat e Ganz (2003), apenas 33 usuários foram alocados, representando um desempenho 24.24% melhor para o trabalho de Dosciatti, Godoy-Júnior e Foronda (2010). Observa-se que com outros valores do tempo de duração do quadro, o trabalho de Dosciatti, Godoy-Júnior e Foronda (2010) também teve uma alocação maior de usuários em cada quadro.

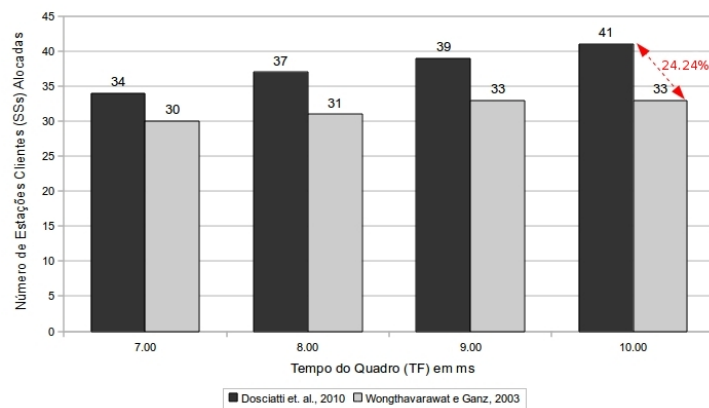


Figura 35 - Comparação de alocação de usuários de Dosciatti, Godoy-Júnior e Foronda (2010) com Iyengar, Iyer e Sikdar (2005)

Fonte: Autoria própria.

²⁴Esses valores são definidos no trabalho de (WONGTHAVARAWAT; GANZ, 2003).

5 CONCLUSÃO

Esse capítulo traz a conclusão do trabalho realizado, fazendo uma revisão dos objetivos apresentados, uma breve descrição das dificuldades encontradas, além de consolidar os resultados expostos anteriormente e chegar nas conclusões e observações relevantes. Além disso, as principais contribuições alcançadas durante a elaboração dessa dissertação são apresentadas. Por fim, também são feitas algumas recomendações para trabalhos futuros.

5.1 REVISÃO DOS OBJETIVOS E DIFICULDADES ENCONTRADAS

A demanda por serviços que só poderiam ser supridos pelo acesso em banda larga sem fio, como o nomadismo e a mobilidade, impulsionam a continuidade do desenvolvimento da norma IEEE 802.16.

Como no padrão IEEE 802.16 não existe a definição dos algoritmos de escalonamento, essa dissertação apresentou um novo escalonador com controle de admissão de conexão para a estação base (*Base Station*) do WiMAX. Um modelo analítico foi desenvolvido, baseado na teoria do servidor *Latency-Rate (LR)* (STILIADIS; VARMA, 1998b), onde um tamanho ideal de quadro foi estimado, que nesse trabalho foi denominado como *TF - Time Frame*, com garantia de atraso máximo para cada usuário. Também, esse procedimento permite maximizar o número de estações alocadas no sistema.

Para que fosse possível desenvolver esse trabalho, foi necessário fazer um estudo aprofundado do padrão IEEE 802.16, bem como dos algoritmos de escalonamento que já foram desenvolvidos e estão citados na Seção 2.7. Um problema enfrentado na elaboração do projeto foi a carência de bibliografia sobre controle de admissão, estimativa de tamanho do quadro MAC em redes IEEE 802.16 e sobre a garantia do atraso máximo.

Propriedades dessa proposta foram investigadas teoricamente e através de simulações. Um conjunto de simulações foi apresentado com fluxos de taxa de bits constante e taxa de bits variável e as comparações de desempenho com diferentes atrasos (*delay*) e diferentes TFs. Os

resultados mostraram que o limite de atraso superior pode ser alcançado por uma grande variedade de cargas na rede, com otimização da largura de banda.

5.2 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS E CONTRIBUIÇÕES

Nesse trabalho foi projetado e avaliado um novo escalonador com controle de admissão de conexão para o padrão de redes de acesso sem fio banda larga IEEE 802.16, mundialmente conhecido como WiMAX, com o objetivo de garantir o limite de atraso para diferentes tipos de fluxo com requisição de QoS e com otimização da largura de banda. Em um primeiro momento, foi desenvolvido um modelo analítico para calcular um valor ótimo para o TF, para alocação de um número otimizado de SSs e para garantir o atraso máximo requerido pelo usuário. Após, foi desenvolvido um programa na linguagem C (RITCHIE; KERNIGHAN, 1989) para simular o comportamento do sistema proposto.

Esse trabalho apresenta como principal resultado uma análise obtida de diferentes cenários de validação do modelo. Simulações foram realizadas para avaliar o desempenho desse modelo, comprovando que a obtenção de um TF ótimo foi conseguida, juntamente com a garantia de um atraso máximo garantido, baseado no atraso requerido pelo usuário. Sendo assim, os resultados mostraram que o novo escalonador com controle de admissão de conexão, garantiu, com sucesso, o limite de atraso máximo e a maximização do número de SSs no ambiente simulado.

Como resultado dessa dissertação, foram produzidos dois artigos:

- *A New Scheduler for IEEE 802.16 with Delay Bound Guarantee*. O artigo foi **aceito** para publicação no *The Sixth International Conference on Networking and Services - ICNS 2010*, realizado em Cancun, México, no período de 07 a 13 de março de 2010. O artigo foi apresentado no dia 09/03/2010.

5.3 TRABALHOS FUTUROS

Espera-se que este trabalho possa auxiliar e estimular o desenvolvimento de novos trabalhos sobre o padrão IEEE 802.16.

Como continuidade deste trabalho, pode-se citar:

- Utilização do modelo analítico para as outras classes de serviços com o mesmo mecanismo de escalonamento.

- Desenvolvimento de um módulo para simulação do padrão IEEE 802.16 no Network Simulator (NS-2,), para cálculo do tempo ótimo de duração de um quadro (TF).
- Como o padrão IEEE 802.16e envolve alteração na camada física, um novo modelo analítico deverá ser desenvolvido, utilizando os mesmos parâmetros do padrão IEEE 802.16, que foram utilizados nesse trabalho.
- Tratamento de perdas de pacote no canal, ou seja, quando ocorre o descarte de pacotes de dados pelo ocorrência de colisões.

ANEXO A – ESTRUTURA DO SIMULADOR

Nesse Anexo descreve-se a estrutura do simulador e o código fonte do simulador. A linguagem de programação C (RITCHIE; KERNIGHAN, 1989) foi utilizada para a construção do simulador que faz o cálculo do atraso máximo garantido.

Conforme o código descrito na Listagem 1, o simulador utiliza os parâmetros da Tabela 8 da Seção 4.2.1 desse trabalho. Após a leitura do arquivo com a quantidade de pacotes (*Quantidade_Pacotes*), duas variáveis, *Calculo_Tam_Pacote* e *Calculo_Time_Frame*, são utilizadas para fazer o cálculo do atraso de cada pacote, sendo que, se o valor de *Calculo_Tam_Pacote* for maior do que o valor de *Calculo_Time_Frame*, ocorreu um atraso e este será armazenado nas variáveis para calcular o atraso de cada pacote (*Atraso_Pacote*) e o total do atraso (*Total_Atraso*). Ao final, a média do atraso é calculado na variável *Media_Atraso*.

Esse código é genérico e é utilizado para o cálculo do atraso de todos os tráfegos utilizados nesse trabalho.

Listagem 1 - “Simulador para Cálculo do Atraso Máximo Garantido”

```

/* CALCULO DO ATRASO */
Total_Pacotes = 0;
Time_Frame = 0;
while ( Total_Pacotes < Quantidade_Pacotes && Time_Frame <
      Quantidade_Pacotes )
5   {
        Calculo_Tam_Pacote = v[ Total_Pacotes ];
        Calculo_Time_Frame = atTF[ Time_Frame ];

        if ( Calculo_Time_Frame > Calculo_Tam_Pacote )
10   {
            Atraso_Pacote = Calculo_Time_Frame -
                Calculo_Tam_Pacote ;
                printf ( "\nDelay %8.2f" , Atraso_Pacote );
            Total_Atraso = Total_Atraso + Atraso_Pacote ;
                printf ( "\nTotal do Delay %8.2f" ,
                    Total_Atraso );

```

```
15         cont = cont + 1;
           printf("\nContador %8.2f",cont);
           Total_Pacotes = Total_Pacotes + 1;
           }
           else
20         {
           Time_Frame = Time_Frame + 1;
           }
       }
       Media_Atraso = Total_Atraso/cont;
25     printf("\nMedia do Atraso %8.2f\n",Media_Atraso);
```

REFERÊNCIAS

- AKYILDIZ, I. F.; WANG, X. A Survey on Wireless Mesh Networks. **IEEE Communications Magazine**, v. 43, n. 9, p. 523–530, set. 2005.
- BINGHAM, J. A. C. **ADSL, VDSL, and Multicarrier Modulation**. [S.l.]: John Wiley & Sons, Inc., 2000.
- CHANG, R. W.; GIBBY, R. A. A Theoretical Study of an Orthogonal Multiplexing Data Transmission Scheme. **IEEE Transactions on Communications**, v. 16, n. 3, p. 529–540, jun. 1968.
- CHO, D.-H. et al. Performance Analysis of the IEEE 802.16 Wireless Metropolitan Area Network. **First International Conference on Distributed Frameworks for Multimedia Applications, DFMA'05 - IEEE Computer Society**, v. 1, n. 1, p. 130–137, fev. 2005.
- CHU, G.; WANG, D.; MEI, S. A QoS Architecture for the MAC Protocol of IEEE 802.16 BWA System. **In IEEE Conference on Communications, Circuits, and Systems**, v. 1, n. 1, p. 435–439, jun. 2002.
- CICCONETTI, C. et al. Performance Evaluation of the IEEE 802.16 MAC for QoS Support. **IEEE Transactions on Mobile Computing - TMC07**, v. 6, n. 1, p. 26–38, jan. 2007.
- CIMINI, L. J. Analysis and Simulation of a Digital Mobile Channel using Orthogonal Frequency Division Multiplexing. **IEEE Transactions on Communications**, v. 33, n. 7, p. 665–675, jul. 1985.
- CRUZ, R. L. Service Burstiness and Dynamic Burstiness Measures: A Framework. **Journal of High Speed Networks**, v. 1, n. 2, p. 105–127, abr. 1992.
- DEMERS, A.; KESHAV, S.; SHENKER, S. Analysis and Simulation of a Fair Queueing Algorithm. **Internetworking: Research and Experience**, v. 1, n. 1, p. 3–26, abr. 1990.
- DOSCIATTI, E. R.; GODOY-JÚNIOR, W.; FORONDA, A. A New Scheduler for IEEE 802.16 with Delay Bound Guarantee. **The Sixth International Conference on Networking and Services (ICNS 2010)**, Cancun, México, v. 1, n. 1, p. 150–155, mar. 2010.
- EKLUND, C. et al. IEEE Standard 802.16: A Technical Overview of the WirelessMAN Air Interface for Broadband Wireless Access. **IEEE Communications Magazine**, v. 1, n. 1, p. 98–107, jun. 2002.
- FIRJAN. **A Internet de Alta Velocidade no Brasil**. 2010. Disponível em: <<http://www.firjan.org.br/main.jsp>>. Acesso em: 03 de fevereiro de 2010.
- FORONDA, A. et al. Delay Guarantee and Service Interval Optimization for HCCA in IEEE 802.11e WLANs. **IEEE Wireless Communications and Networking Conference - WCNC 2007**, v. 1, n. 1, p. 2080–2085, mar. 2007.

GINEVAN, S. **Can WiMAX go the Distance?** mar. 2008. Disponível em: <<http://www.planetanalog.com/news/showArticle.jhtml>>. Acesso em: 20 de outubro de 2009.

GOLESTANI, S. J. A Framing Strategy for Congestion Management. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 9, n. 7, p. 1064–1077, set. 1991.

GOLESTANI, S. J. A Self-Clocked Fair Queueing Scheme for Broadband Applications. **In Proc. IEEE INFOCOM'94**, Toronto, Canadá, v. 1, n. 1, p. 636–646, abr. 1994.

GOSH, A. et al. Broadband Wireless Access with WiMAX/802.16: Current Performance Benchmarks and Future Potencial. **IEEE Communications Magazine**, v. 43, n. 2, p. 129–136, fev. 2005.

IEEE 802.16-2004. **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems**. New York, jun. 2004. 857 p.

IEEE 802.16e-2005. **IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks. Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands: Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems**. New York, dez. 2005.

IETF. **IP over Cable Data Network**. out. 2007. Disponível em: <<http://datatracker.ietf.org/wg/ipcdn/charter>>. Acesso em: 03 de fevereiro de 2010.

INTEL, C. **Deploying License-Exempt WiMAX Solutions**: White paper. jan 2005. 16 p.

IYENGAR, R.; IYER, P.; SIKDAR, B. Delay Analysis of 802.16 Based Last Mile Wireless Networks. **Global Telecommunications Conference - GLOBECOM'05 - IEEE**, v. 5, n. 1, p. 1–5, 2005.

JONES, D. **WiMAX: A Spec Divided**. jul. 2005. Disponível em: <<http://www.lightreading.com/document.asp>>. Acesso em: 20 de outubro de 2009.

KALMANEK, C. R.; KANAKIA, H.; KESHAV, S. Rate Controlled Servers for Very High-Speed Networks. **IEEE Global Telecommunications Conference**, v. 1, n. 1, p. 300.3.1–300.3.9, 1990.

KATEVENIS, M.; SIDIROPOULOS, S.; COURCOUBETIS, C. Weighted Round-Robin Cell Multiplexing in a General-Purpose ATM Switch Chip. **IEEE Journal on Selected Areas in Communications**, v. 9, n. 8, p. 1265–1279, out. 1991.

KIM, S.; YEOM, I. TCP-aware Uplink Scheduling for IEEE 802.16. **IEEE Communications Letters**, v. 11, n. 1, p. 146–148, fev. 2007.

LYMAN, J. **WiMAX Mobile Standard Ratified**. 2005. Disponível em: <<http://www.technewsworld.com/story/47766.html>>. Acesso em: 20 de outubro de 2009.

MACH, P.; BESTAK, R. WiMAX Throughput Evaluation of Conventional Relaying. **Springer Science Bussiness Media**, v. 1, n. 1, p. 1–15, mar. 2008.

MACIEL-JUNIOR, P. de T. **Modelagem e Análise de um Protocolo de Acesso Alternativo para o Padrão IEEE 802.16 de Redes Metropolitanas sem Fio**. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro - COOPE/PESC, Rio de Janeiro - RJ, apr 2005.

MAHESHWARI, S. **An Efficient QoS Scheduling Architecture for IEEE 802.16 Wireless MANs**. Dissertação (Mestrado) — K R School of Information Technology, Bombay, Índia, jan 2005.

NS-2. **The Network Simulator - ns-2**. Disponível em: <<http://www.isi.edu/nsnam/ns>>. Acesso em: 20 de outubro de 2009.

PAREKH, A. K.; GALLAGER, R. G. A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks: the Single-Node Case. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 1, n. 3, p. 344–357, jun. 1993.

PINEDO, M. **Scheduling – Theory, Algorithms and Systems**. 2. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2001.

PINTO, E. L.; ALBUQUERQUE, C. P. A Técnica de Transmissão OFDM. **Revista Científica Periódica - Telecomunicações**, v. 5, n. 1, p. 1–10, jun. 2002.

RITCHIE, D. M.; KERNIGHAN, B. W. C. **A Linguagem de Programação Padrão Ansi**. Rio de Janeiro - RJ: Editora Campus, 1989. 288 p.

SHREEDHAR, M.; VARGHESE, G. Efficient Fair Queueing Using Deficit Round-Robin. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 4, n. 3, p. 375–385, jun. 1996.

STILIADIS, D.; VARMA, A. Efficient Fair Queueing Algorithms for Packet Switched Networks. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 6, n. 2, p. 175–185, abr. 1998.

STILIADIS, D.; VARMA, A. Latency-Rate Servers: A General Model for Analysis of Traffic Scheduling Algorithms. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 6, n. 5, p. 611–624, out. 1998.

STILIADIS, D.; VARMA, A. Rate-Proportional Servers: A Design Methodology for Fair Queueing Algorithms. **IEEE/ACM Transactions on Networking**, v. 6, n. 2, p. 164–174, abr. 1998.

SUN, Y. et al. An Experimental Study of Multimedia Traffic Performance in Mesh Networks. **In Proceedings of the International Workshop on Wireless Traffic Measurements and Modeling**, Seattle, EUA, p. 25–30, jun. 2005.

TANENBAUM, A. S. **Computer Networks**. 4. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 2003.

TEMPORIM, J. O. I. **Redes Wireless 802.16**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Estadual de Londrina, Londrina - PR, ago 2007.

VIEIRA, D. L. F. G. **Modelagem Analítica e Avaliação do Retardo das Mensagens no Protocolo de Acesso ao Meio do Padrão IEEE 802.16**. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro - COOPE/PESC, Rio de Janeiro - RJ, sep 2008.

WIMAX, F. **WiMAX Forum**. 2009. Disponível em: <<http://www.wimaxforum.org>>. Acesso em: 16 de julho de 2009.

WONGTHAVARAWAT, K.; GANZ, A. IEEE 802.16 Based Last Mile Broadband Wireless Military Networks with Quality of Service Support. **IEEE Military Communications Conference (MILCOM'03)**, v. 2, n. 1, p. 779–784, out. 2003.

ZHANG, L. VirtualClock: A New Traffic Control Algorithm for Packet Switching Networks. **ACM SIGCOMM Computer Communication Review**, v. 20, n. 4, p. 19–29, set. 1990.

ZWEBEN, M.; FOX, M. **Intelligent Scheduling**. San Francisco - Califórnia: Morgan Kaufmann, 1994.