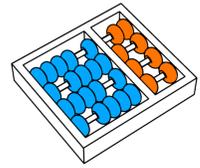




2013

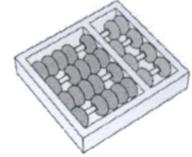


Flávio Adalberto Kubota

**“Escalonamento e Controle de Admissão cross-layer para  
redes IEEE 802.16”**

CAMPINAS





Universidade Estadual de Campinas  
Instituto de Computação

**Flávio Adalberto Kubota**

**“Escalonamento e Controle de Admissão cross-layer para  
redes IEEE 802.16”**

Orientador(a): **Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca**

Co-Orientador(a): **Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Juliana Freitag Borin**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação do Instituto de Computação da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Ciência da Computação.

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA POR FLÁVIO ADALBERTO KUBOTA, SOB ORIENTAÇÃO DE PROF. DR. NELSON LUIS SALDANHA DA FONSECA.

A handwritten signature in black ink, appearing to read "Nelson Luis Saldanha da Fonseca", written over a horizontal line.

Assinatura do Orientador(a)

CAMPINAS

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca do Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica  
Ana Regina Machado - CRB 8/5467

K951e Kubota, Flávio Adalberto, 1987-  
Escalonamento e controle de admissão cross-layer para redes IEEE 802.16 /  
Flávio Adalberto Kubota. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Nelson Luis Saldanha da Fonseca.  
Coorientador: Juliana Freitag Borin.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de  
Computação.

1. Redes de computadores. 2. Sistemas de comunicação sem fio. 3. Redes metropolitanas de computação. I. Fonseca, Nelson Luis Saldanha da, 1961-. II. Borin, Juliana Freitag. III. Universidade Estadual de Campinas. Instituto de Computação. IV. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Cross-layer scheduler and admission control for the IEEE 802.16 standard

**Palavras-chave em inglês:**

Computer networks

Wireless communication systems

Metropolitan area networks

**Área de concentração:** Ciência da Computação

**Titulação:** Mestre em Ciência da Computação

**Banca examinadora:**

Nelson Luis Saldanha da Fonseca [Orientador]

Cesar Augusto Viana Melo

Leandro Aparecido Villas

**Data de defesa:** 06-12-2013

**Programa de Pós-Graduação:** Ciência da Computação

# TERMO DE APROVAÇÃO

Dissertação Defendida e Aprovada em 06 de dezembro de 2013, pela  
Banca examinadora composta pelos Professores Doutores:



---

Prof. Dr. Cesar Augusto Viana Melo  
DCC / UFAM



---

Prof. Dr. Leandro Aparecido Villas  
IC / UNICAMP



---

Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca  
IC / UNICAMP



# **Escalonamento e Controle de Admissão cross-layer para redes IEEE 802.16**

**Flávio Adalberto Kubota<sup>1</sup>**

06 de dezembro de 2013

## **Banca Examinadora:**

- Prof. Dr. Nelson Luis Saldanha da Fonseca (Orientador)
- Prof. Dr. César Augusto Viana Melo  
Departamento de Ciência da Computação - UFAM
- Prof. Dr. Leandro Aparecido Villas  
Instituto de Computação - UNICAMP
- Prof. Dr. Edmundo Roberto Mauro Madeira (Suplente)  
Instituto de Computação - UNICAMP
- Prof. Dr. Omar Carvalho Branquinho (Suplente)  
Faculdade de Engenharia Elétrica - PUC Campinas

---

<sup>1</sup>Suporte financeiro de: Bolsa FAPESP (processo 2008/07753-6), Bolsa CNPq



# Resumo

O padrão IEEE 802.16, também conhecido como WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) e seu adendo, o IEEE 802.16-2005, apresentam uma solução de baixo custo para o acesso à Internet. A tecnologia é capaz de prover altas taxas de transferências de dados para amplas áreas geográficas, alto nível de escalabilidade e baixo custo de instalação e manutenção. Além disso, a tecnologia inclui uma arquitetura para provisão de Qualidade de Serviço (QoS) para aplicações de tempo real e aplicações que demandam altas taxas de transferências.

Para garantir os requisitos de QoS, o padrão define um mecanismo de sinalização entre a estação base (BS) e a estação cliente (SS), cinco classes de serviço, um mecanismo de escalonamento e um mecanismo de controle de admissão de novas conexões. Entretanto, as políticas que devem ser utilizadas na implementação dos mecanismos de escalonamento e controle de admissão não foram especificadas no padrão. O mecanismo de escalonamento é responsável principalmente por garantir os requisitos de banda mínima das conexões, enquanto que o controle de admissão restringe o número de conexões para evitar a sobrecarga do enlace sem fio.

Esta dissertação propõe dois mecanismos de escalonamento e um mecanismo de controle de admissão para redes baseadas no padrão IEEE 802.16. Os mecanismos propostos são totalmente compatíveis com o padrão IEEE 802.16 e são capazes de atender os requisitos de QoS das cinco classes de serviço.

Devido a alta variabilidade do sinal do canal sem fio, os mecanismos de escalonamento para redes cabeadas não são adequados para dispositivos sem fio. Dessa forma, as duas políticas de escalonamento e o mecanismo de controle de admissão propostos utilizam informações sobre a qualidade do sinal, através de uma abordagem *cross-layer*, para promover um uso eficiente do enlace sem fio. As três soluções foram avaliadas através de experimentos de simulação utilizando um módulo para simulação de redes IEEE 802.16.



# Abstract

The IEEE 802.16 standard, also known as WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) and its amendment, IEEE 802.16-2005, are a low cost solution for Internet access. The technology is capable of providing high data transfer rates for large geographic areas, high level of scalability and low cost of installation and maintenance. Furthermore, the technology includes an architecture for Quality of Service (QoS) provision for real-time applications and applications that require high transfer rates.

To guarantee the QoS requirements, the standard defines a signaling mechanism between Base Station (BS) and Subscriber Station (SS), five classes of service, a scheduling mechanism and an admission control mechanism for new connections. However, policies that must be used in the implementation of scheduling mechanisms and admission control mechanisms were not defined by the standard. The scheduling mechanism is responsible for guaranteeing the minimum reserved rate requirements for the connections, while the admission control mechanism restricts the number of connections in the network to avoid the wireless link saturation.

This dissertation proposes two scheduling mechanisms and one admission control mechanism for IEEE 802.16 networks. The proposed mechanisms are fully-standard compliant and capable of meeting the QoS requirements of the five classes of service.

Due to the high variability of wireless channel signal, the scheduling mechanisms for wired networks are not suitable for wireless networks. Thus, the two scheduling policies and admission control mechanism proposed use information about the quality of the signal, through a cross-layer approach, to promote an efficient use of the wireless link. The three solutions were evaluated through simulation experiments using a simulation module for IEEE 802.16 networks.



*Para Arielle, minha fonte de energia e aos meus pais.*



# Agradecimentos

Quero agradecer a todos que me deram suporte para que este trabalho chegasse até o final e estiveram comigo durante os anos de Mestrado, em momentos de alegria e em momentos de luta.

Primeiramente à minha esposa, Arielle, que sempre acreditou que eu conseguiria, sempre esteve ao meu lado me incentivando para que o título de Mestre estivesse antes do meu nome. Sem ela, esta dissertação não seria realidade.

Aos meus pais, Maria e João, que mesmo em momentos difíceis, me deram a educação de qualidade para chegar onde cheguei. À toda minha família, tios e tias, primos e primas.

Ao meu orientador, Prof. Nelson Fonseca e minha co-orientadora, Prof<sup>a</sup>. Juliana Borin, que compartilharam comigo sabedoria e me direcionaram na pesquisa durante este período.

Aos amigos que ganhei durante a graduação e que sempre torceram para o meu sucesso, em especial, Marcia, Rafa, Mari, Fabio, Gian, Felipe (Sansão), Evandro, Bruno e Gustavo.

Aos amigos da república, Arthur, Janaína, Daniel, Eric e Cláudio.

Aos amigos do LRC que sempre estavam abertos à discussões técnicas: Cesar, Luciano, Ju Santi, Pedro, Tati, Daniel batista, Christian, Geraldo, Esteban, Mariana, Milton, Tiago, Neumar, André, Jorge, Bit, Carlos Senna e Carlão.

Aos amigos da Sofist, em especial, Fernando, Lucas, Zanoni, Bruno e Júlio, que sempre me incentivaram para que eu concluísse o Mestrado.

Ao suporte financeiro da FAPESP e CNPq.



# Sumário

<b>Resumo</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract</b>	<b>xi</b>
<b>Dedication</b>	<b>xiii</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Contribuições da dissertação . . . . .	3
1.2 Organização da dissertação . . . . .	4
1.3 Publicações . . . . .	4
<b>2 Padrão IEEE 802.16</b>	<b>6</b>
2.1 Histórico . . . . .	7
2.2 Arquitetura . . . . .	8
2.3 Pilha de protocolos . . . . .	9
2.4 Camada física . . . . .	9
2.4.1 Esquemas de Modulação e Codificação . . . . .	11
2.5 Camada de Acesso ao Meio - MAC . . . . .	12
2.5.1 Alocação de recursos . . . . .	14
2.5.2 Qualidade de serviço . . . . .	15
2.5.3 Inicialização e entrada na rede . . . . .	18
<b>3 Simulador ns-3</b>	<b>21</b>
3.1 Modelo de canal . . . . .	22
3.1.1 Validação do modelo de canal e modelo de erros . . . . .	25
3.2 Considerações Finais . . . . .	27



<b>4</b>	<b>Escalonamento em redes IEEE 802.16</b>	<b>28</b>
4.1	Estado da arte da pesquisa em escalonamento em redes IEEE 802.16 . . . . .	29
4.2	Escalonador uplink para provisão de QoS que considera a camada física . . . . .	32
4.3	Escalonador uplink para provisão de QoS que considera as modulações . . . . .	36
4.4	Avaliação das políticas de escalonamento . . . . .	37
4.4.1	Escalonador uplink para provisão de QoS que considera a camada física	37
4.4.2	Escalonador <i>uplink</i> para provisão de QoS que considera as modulações	41
4.5	Considerações Finais . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Controle de admissão em redes IEEE 802.16</b>	<b>49</b>
5.1	Estado da arte da pesquisa em controle de admissão . . . . .	49
5.2	Proposta de um mecanismo de controle de admissão . . . . .	51
5.2.1	Controle de admissão baseado na Taxa Mínima . . . . .	51
5.2.2	Controle de admissão <i>Cross-layer</i> . . . . .	51
5.3	Avaliação da política de controle de admissão . . . . .	52
5.4	Considerações Finais . . . . .	54
<b>6</b>	<b>Conclusões e Trabalhos Futuros</b>	<b>59</b>
6.1	Conclusões . . . . .	59
6.2	Trabalhos Futuros . . . . .	60
6.2.1	Extensão do mecanismo de escalonamento para redes IEEE 802.16m . . . . .	60
6.2.2	Extensão do mecanismo de escalonamento para redes LTE . . . . .	61
6.2.3	Extensão do mecanismo de controle de admissão para considerar lucro e utilidade . . . . .	61



# Lista de Tabelas

2.1	Comparação dos padrões IEEE para redes sem fio . . . . .	7
2.2	Principais documentos do padrão IEEE 802.16 . . . . .	7
2.3	Codificação do canal por perfil de modulação e codificação . . . . .	13
2.4	Parâmetros de QoS por tipo de fluxo de serviço . . . . .	18
4.1	Perfis OFDM . . . . .	36



# Lista de Figuras

2.1	Arquitetura de uma rede IEEE 802.16 . . . . .	8
2.2	Pilha de protocolos . . . . .	9
2.3	Estrutura de um <i>frame</i> TDD . . . . .	11
2.4	Modulações da camada física OFDM . . . . .	12
2.5	MAC PDU . . . . .	14
2.6	Procedimento de <i>Ranging</i> . . . . .	20
2.7	Procedimento de criação do fluxo de serviço . . . . .	20
3.1	Curvas de BER pelo SNR . . . . .	23
3.2	Curvas de PER pelo SNR . . . . .	24
3.3	Curvas de BER pelo SNR - Universidade de Tecnologia de Vienna . . . . .	24
3.4	Modelo de Espaço Livre . . . . .	25
3.5	Modelo de Erceg - cenário montanhoso com grande densidade urbana . . . . .	26
3.6	Vazão - Free Space e Bustamante <i>et al.</i> . . . . .	26
3.7	Vazão - Free Space e ICRFE . . . . .	27
4.1	Goodput médio para o fluxo de serviço nrtPS . . . . .	40
4.2	Goodput médio para o fluxo de serviço BE . . . . .	41
4.3	Goodput médio para o fluxo de serviço nrtPS . . . . .	42
4.4	Goodput médio para o fluxo de serviço BE . . . . .	43
4.5	Atraso médio para os serviço rtPS . . . . .	44
4.6	Goodput médio para os serviços nrtPS . . . . .	45
4.7	Goodput médio para os serviços rtPS . . . . .	46
4.8	Goodput médio para os serviços BE . . . . .	47
4.9	Atraso médio para os fluxos rtPS . . . . .	47
4.10	Goodput médio para os serviços UGS e ertPS . . . . .	48
4.11	Agregação do goodput médio de todos os fluxos . . . . .	48
5.1	Taxa de bloqueio para o fluxo de serviço UGS . . . . .	54
5.2	Goodput médio para o fluxo de serviço UGS . . . . .	55
5.3	Taxa de bloqueio para o fluxo de serviço rtPS . . . . .	56



5.4	Goodput médio para o fluxo de serviço rtPS . . . . .	56
5.5	Taxa de bloqueio para o fluxo de serviço nrtPS . . . . .	57
5.6	Goodput médio para o fluxo de serviço nrtPS . . . . .	57
5.7	Taxa de bloqueio para o fluxo de serviço ertPS . . . . .	58
5.8	Goodput médio para o fluxo de serviço ertPS . . . . .	58



# Capítulo 1

## Introdução

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

Com o objetivo de padronizar a tecnologia BWA, o padrão IEEE 802.16 [1], também conhecido como WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*) vem sendo desenvolvido, incluindo uma arquitetura para provisão de Qualidade de Serviço (QoS) para aplicações de tempo real e aplicações que demandam altas taxas de transferências.

A arquitetura de QoS inclui um mecanismo de sinalização entre a estação base (BS) e a estação cliente (SS), um *framework* para mecanismos de escalonamento, um mecanismo de controle de admissão de novas conexões e cinco classes de serviço: UGS (*Unsolicited Grant Service*), rtPS (*real-time Polling Service*), ertPS (*extended real-time Polling Service*), nrtPS (*non-real-time Polling Service*) e BE (*Best-Effort*). Tanto para o tráfego no sentido *uplink* quanto para o tráfego *downlink*, os pacotes são associados à um fluxo de serviço pela camada de acesso ao meio (MAC) e cada fluxo de serviço é associado à uma das cinco classes de serviço. Para cada classe de serviço, o padrão define um conjunto de parâmetros de QoS que são configurados durante o registro da estação cliente na estação base. Esses parâmetros são utilizados pelos mecanismos de controle de admissão e de escalonamento para prover a diferenciação de serviços.

As políticas que devem ser utilizadas na implementação dos mecanismos de escalonamento e controle de admissão não foram especificadas pelo padrão para que os fabricantes possam diferenciar os seus produtos. Dessa forma, políticas para esses dois mecanismos ficam abertas às pesquisas com o desafio possibilitar altas taxas de transmissão em um ambiente metropolitano com alta densidade populacional. Esta dissertação propõe soluções para esses dois problemas em aberto.

A alocação de recursos em redes IEEE 802.16 é feita sob demanda, ou seja, quando uma estação cliente precisa enviar dados para a estação base, ela envia uma mensagem de requisição

de banda. Essa requisição pode ser enviada como um pacote ou junto com o cabeçalho de um pacote de dados (*piggyback*). Esse pedido de banda pode ser enviado quando a estação cliente recebe um *grant* alocado pela estação base para esse fim através de um mecanismo chamado de *polling*. O *grant* pode ser alocado para uma estação cliente específica (*polling unicast*) ou para um grupo de estações clientes (*polling* baseado em contenção).

O objetivo do escalonamento é garantir a banda passante requisitada pelas estações, bem como promover o uso eficiente do enlace sem fio. A estação base possui um escalonador para o tráfego *uplink* (das estações cliente para a estação base) e um escalonador para o tráfego *downlink* (da estação base para as estações cliente). O mecanismo de escalonamento *uplink* é mais complicado do que o escalonamento *downlink*, pois a estação base não tem acesso direto às filas das estações cliente. As estações cliente informam o status de suas filas para a estação base através de mensagens de requisição de banda enviadas periodicamente, porém, não há garantia de que o status de uma fila esteja atualizado no momento em que a estação base realiza o escalonamento.

Um fator que tem grande influência no escalonamento em redes sem fio é a condição do canal utilizado pelas estações cliente. Em ambientes suburbanos com alta densidade de construções ou até mesmo terrenos acidentados, a qualidade do canal de uma estação cliente pode deteriorar e, dessa forma, prejudicar a transmissão. Isso faz com que os diversos mecanismos de escalonamento para redes cabeadas sejam impróprios para redes sem fio. Nesta dissertação utiliza-se uma abordagem *cross-layer* para que a camada de acesso ao meio possa obter informações sobre as condições do canal na camada física.

Estão disponíveis na literatura diversas propostas de mecanismo de escalonamento para redes IEEE 802.16 que levam em consideração a qualidade do meio sem fio. Algumas propostas caracterizam a qualidade do canal com valores de SNR [2, 3], enquanto em outras propostas a referência utilizada para essa métrica é a taxa de transmissão instantânea [4, 5, 6, 3, 7]. Neste trabalho utilizamos o SNR para medir a qualidade do canal.

Dentre os mecanismos de escalonamento propostos na literatura, alguns trazem uma solução para o tráfego no sentido *downlink* [8, 9]. Ainda, há propostas [10, 11] que não tratam as particularidades apresentadas no padrão IEEE 802.16, como por exemplo, as cinco classes de serviços projetadas para os diferentes tipos de aplicação; enquanto outras [2, 3] focam na classe de serviço rtPS, que é voltada para aplicações de tempo real.

O escalonador *uplink* proposto por Freitag e Fonseca [12], também conhecido como MBQoS (Migration-based QoS), foi desenvolvido de modo a garantir os requisitos de QoS das cinco classes de serviço sendo totalmente compatível com as especificações do padrão IEEE 802.16. O MBQoS utiliza três filas de prioridade para armazenar as mensagens de requisição de banda enviadas pelas estações clientes e um esquema de migração das mensagens entre essas filas para garantir a provisão dos requisitos de QoS de cada fluxo de serviço. O trabalho desta dissertação se baseia no escalonador proposto por Freitag e Fonseca [12] e aproveita as variações das condições

do meio sem fio para propor um mecanismo de escalonamento *cross-layer*, mantendo a aderência às especificações do padrão IEEE 802.16.

A primeira política de escalonamento proposta é mais simples e não considera as trocas dos perfis de modulação e codificação que as estações clientes possam realizar ao longo do tempo. A estratégia básica do escalonador é bloquear a transmissão de uma conexão caso ela esteja passando por um momento de má qualidade do sinal. Para o tráfego *uplink*, a qualidade de sinal pode ser medida na própria estação base, que coleta o SNR. A estação base desbloqueia o tráfego de uma conexão caso ela volte a ter uma boa qualidade de sinal, ou ela necessite atender com urgência um requisito de QoS para aquela conexão.

A segunda política já envolve a troca dos perfis de modulação e codificação das estações clientes. Ao longo do tempo, a qualidade do sinal pode variar, e então o mecanismo de adaptação de enlace irá realizar a troca do perfil de modulação e codificação para um perfil mais eficiente caso o sinal melhore, ou mais robusto, caso contrário. De uma forma oportunista, o escalonador prioriza as conexões com o objetivo de melhorar a vazão geral da rede.

A política de controle de admissão proposta nesta dissertação utiliza uma abordagem *cross-layer* e utiliza informações de qualidade de sinal para decidir quais estações clientes serão aceitas na rede através de uma estratégia gulosa.

Os mecanismos propostos neste trabalho foram avaliados através de experimentos de simulação utilizando modelos de tráfego que representam o tráfego real para os diferentes tipos de classes de serviço. Para essa avaliação, o escalonador MBQoS bem como os escalonadores propostos foram implementados em um módulo para simulação de redes WiMAX no simulador ns-3[13].

## 1.1 Contribuições da dissertação

Este trabalho traz as seguintes contribuições:

- Apresentação do estado da arte das pesquisas relacionadas ao desenvolvimento de escalonamento *uplink* que considera a qualidade do enlace sem fio em redes IEEE 802.16 e mecanismo de controle de admissão que considera a qualidade do enlace sem fio em redes IEEE 802.16.
- Proposta de um mecanismo de escalonamento do tráfego *uplink* que leva em consideração a qualidade do enlace sem fio para redes IEEE 802.16. O mecanismo apresentado garante os requisitos de QoS, estando, dessa forma, totalmente de acordo com o padrão IEEE 802.16.
- Proposta de um mecanismo de escalonamento do tráfego *uplink* que leva em consideração as trocas de modulações da camada física. O mecanismo apresentado garante os requisitos

de QoS e está totalmente de acordo com o padrão IEEE 802.16.

- Proposta de um controle de admissão que considera a qualidade do enlace sem fio para admitir uma nova estação cliente na rede.
- Implementação de um escalonador *uplink* para redes IEEE 802.16 no módulo WiMAX para ns-3 e disponibilização deste para a comunidade científica. O escalonador *uplink* proposto em [14] está disponível na distribuição oficial do ns-3.

## 1.2 Organização da dissertação

O Capítulo 2 apresenta as principais funcionalidades e conceitos do padrão IEEE 802.16 para o entendimento deste trabalho. O capítulo descreve a camada física e a camada MAC, assim como os mecanismos de sinalização necessários para o escalonamento e os mecanismos de sinalização para ingresso e admissão de uma estação cliente na rede.

O Capítulo 3 apresenta o estudo e a implementação de um modelo de canal e um modelo de pacotes no simulador ns-3. Para tornar a simulação dos cenários mais realista foram utilizados modelos que reproduzem um ambiente suburbano com alta densidade de construções.

A primeira seção do Capítulo 4 apresenta o estudo da arte relacionado ao escalonamento do tráfego *uplink* realizado pela estação base que leva em consideração as condições do meio sem fio, mostrando o que cada solução se propõe a resolver, assim como as vantagens e desvantagens. Nas seções seguintes são apresentadas duas propostas de escalonamento do tráfego *uplink* em redes IEEE 802.16. A principal diferença entre as propostas é que a segunda delas se aproveita das trocas de modulações para melhorar o desempenho. Na seção seguinte, os experimentos de simulação realizados para avaliar os mecanismos de escalonamento são descritos, assim como os resultados são apresentados e discutidos.

O Capítulo 5 apresenta o estudo da arte relacionado ao controle de admissão que considera as condições do canal sem fio de cada estação cliente em redes IEEE 802.16. Neste capítulo é apresentado um novo mecanismo de controle de admissão e sua avaliação realizada através de experimentos.

No Capítulo 6, é apresentada a conclusão e as potenciais extensões do trabalho realizado.

## 1.3 Publicações

- KUBOTA, F. A. ; BORIN, J. F. ; FONSECA, N. L. S. . Opportunistic Cross-layer Uplink Scheduler for the IEEE 802.16 standard. *IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2011, Kyoto. Wireless Networking Symposium, 2011.

- KUBOTA, F. A. ; BORIN, J. F. ; FONSECA, N. L. S. . Cross-layer Uplink Scheduler for the IEEE 802.16 standard. *IEEE Global Communications Conference*, 2010, Miami. Wireless Networking, 2010.

## Capítulo 2

### Padrão IEEE 802.16

Diversos padrões de comunicação sem fio têm sido desenvolvidos baseados em vários requisitos de mercado. O IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) desenvolveu uma hierarquia de padrões para diferentes categorias de redes sem fio. A Tabela 2.1 compara as diferentes categorias e o propósito de cada tipo de rede sem fio que abrange desde a comunicação de dispositivos pessoais até a comunicação em extensas áreas geográficas.

Em 1999, o IEEE criou um grupo chamado WiMAX Forum para desenvolver o IEEE 802.16. Desde então, um conjunto de padrões para redes sem fio em banda larga vem sendo desenvolvido pelo IEEE. O IEEE 802.16 é comercialmente conhecido como WiMAX (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*).

O padrão IEEE 802.16 especifica a camada de acesso ao meio (MAC) e a camada física (PHY) sem fio para acesso em banda larga à Internet com o objetivo de padronizar a tecnologia BWA (*Broadband Wireless Access*), sendo uma alternativa de baixo custo e rápida instalação às formas de acesso tradicionais via cabo e DSL (*Digital Subscriber Line*). Além disso, o longo alcance facilita a implantação da rede em locais de difícil acesso como, por exemplo, locais mais afastados de centros urbanos onde a instalação de uma infraestrutura de uma rede cabeada é lenta e cara.

Outra vantagem do padrão IEEE 802.16 está na especificação de um mecanismo de sinalização para provisão de Qualidade de Serviço (QoS). Entretanto, o padrão IEEE 802.16 não define uma política de escalonamento e controle de admissão, possibilitando que os fabricantes disponibilizem diferentes mecanismos para os produtos.

Este capítulo apresenta as principais características do padrão IEEE 802.16 para o entendimento do trabalho.

<b>Tecnologia</b>	<b>Cobertura</b>	<b>Padrão</b>
WWAN ( <i>Wireless Wide Area Network</i> )	Extensa área geográfica	IEEE 802.20
WMAN ( <i>Wireless Metropolitan Area Network</i> )	Redes metropolitanas com alcance de uma cidade	IEEE 802.16
WLAN ( <i>Wireless Local Area Network</i> )	Redes locais com alcance dentro de um prédio	IEEE 802.11
WPAN ( <i>Wireless Personal Area Network</i> )	Redes pessoais com alcance de uma pessoa	IEEE 802.15

**Tabela 2.1:** Comparação dos padrões IEEE para redes sem fio

## 2.1 Histórico

O padrão IEEE 802.16 vem sendo desenvolvido desde 1999. Desde então, foram lançados vários documentos com correções e aperfeiçoamentos. Os principais documentos e suas principais características são listados na Tabela 2.2.

<b>Documento</b>	<b>Descrição</b>
IEEE 802.16-2001[15]	Frequência 10-66GHz; Com linha de visada (LOS); Alcance de 2-5km; Largura de banda de 20, 25 e 28MHz
IEEE 802.16-2004[1]	Frequência 2-11GHz; Sem linha de visada (NLOS); Alcance de 5-50km
IEEE 802.16-2005[16]	Mobilidade; OFDMA ; Classe de serviço ertPS
IEEE 802.16-2011[17]	Especifica taxa de transferência de pelo menos 100 Mbps para aplicações móveis e 1 Gbps para aplicações fixas

**Tabela 2.2:** Principais documentos do padrão IEEE 802.16

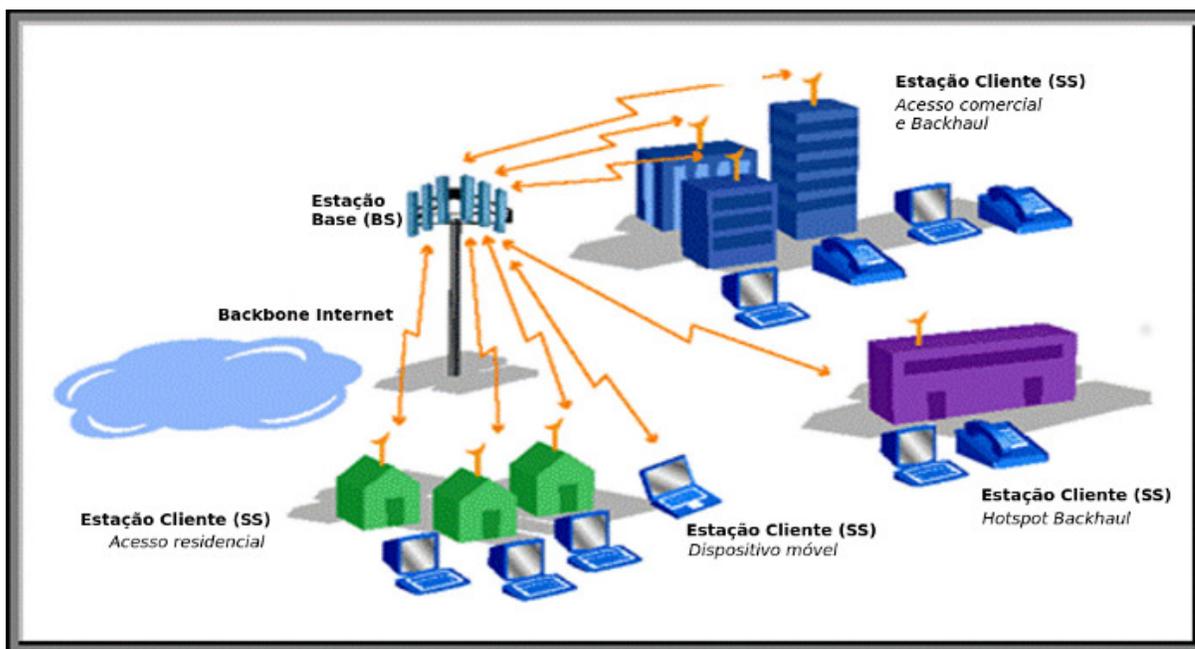
A primeira versão do documento foi lançada em 2001 e especificava apenas estações clientes fixas e com linha de visada. Uma nova versão do documento lançada em 2004 revisa e consolida o padrão, e uma das principais alterações foi a adição da especificação sem linha de visada e um maior alcance, podendo chegar a 50km com linha de visada. Em 2005, é finalizado o adendo IEEE 802.16-2005 que traz mobilidade às estações clientes especificando a camada física OFDMA. Além disso, inclui uma nova classe de serviço, a ertPS, para suportar tráfego de pacotes periódicos de tamanho variável. O documento IEEE 802.16-2011 introduz um novo formato de frames, composto por 4 *frames* e chamado de *superframe*, e possibilita a taxa de transferência de até 1Gbps para estações clientes fixas.

## 2.2 Arquitetura

A arquitetura de rede do padrão IEEE 802.16 possui dois elementos principais, mostrados na Figura 2.1, que são:

- Estação Cliente (*Subscriber Station - SS*): Dispositivo final que se comunica com a estação base.
- Estação Base (*Base Station - BS*): A estação base é responsável por prover uma interface sem fio à estação cliente, conectando-a ao núcleo da rede. Além disso, a estação base também realiza funções de gerenciamento como, por exemplo, classificação de tráfego, gerenciamento de chaves, controle de admissão, escalonamento de pacotes, entre outros.

O padrão IEEE 802.16 permite dois tipos de topologia: a topologia ponto multi-ponto (PMP) e a topologia MESH. Na topologia ponto multi-ponto, todo o tráfego de dados das estações clientes passam por uma estação base central, enquanto que na topologia MESH, o tráfego pode ser roteado entre duas ou mais estações clientes. Neste trabalho, serão consideradas apenas redes com topologia PMP.



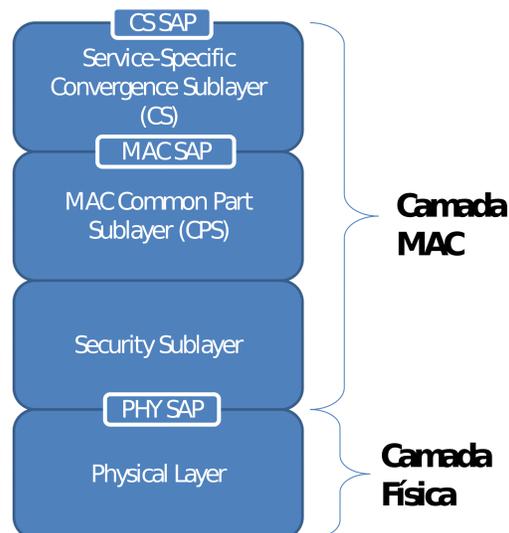
**Figura 2.1:** Arquitetura de uma rede IEEE 802.16<sup>a</sup>

<sup>a</sup>Adaptado de [http://ecee.colorado.edu/~ecen4242/marko/WiMax/WiMax/WiMax\\_files/image002.gif](http://ecee.colorado.edu/~ecen4242/marko/WiMax/WiMax/WiMax_files/image002.gif)

## 2.3 Pilha de protocolos

O padrão IEEE 802.16-2001[15] se baseia no modelo de camadas OSI (*Open Systems Interconnection*) e especifica as duas camadas mais baixas: a camada física (PHY) e a camada de acesso ao meio (MAC).

A Figura 2.2 mostra a pilha de protocolos na qual a camada de acesso ao meio pode ser subdividida em três subcamadas. A primeira, *Service-Specific Convergence Sublayer (CS)*, faz a interface entre a camada superior (camada de transporte) e a camada MAC CPS, e seu papel é classificar as unidade de dados (SDU) e mapeá-las aos fluxos de serviço. A segunda subcamada, *MAC Common Part Sublayer*, é responsável pela alocação de banda, controle de admissão, gerenciamento das conexões e qualidade de serviço. A última subcamada, a *Security Sublayer*, realiza a criptografia dos dados e a autenticação dos clientes na rede.



**Figura 2.2:** Pilha de protocolos

## 2.4 Camada física

A primeira versão do padrão IEEE 802.16-2001[15] traz uma especificação para redes sem mobilidade, operando numa faixa de frequência de 10 Ghz a 66 Ghz, em linha de visada (LOS -

*Line of Sight*). Em 2003 é lançada uma nova especificação, trazendo mobilidade e tendo como objetivo se tornar uma alternativa às redes cabeadas.

O padrão IEEE 802.16a/d define três especificações para a camada física:

- WirelessMAN-SCa - Camada física que utiliza modulação de portadora única (*single-carrier*) para frequência de 2GHz a 11GHz para ambientes LOS.
- WirelessMAN-OFDM - Camada física OFDM com 256 portadoras FFT para operações ponto multi-ponto em condições NLOS para frequências de 2GHz a 11GHz. O acesso múltiplo das diferentes estações clientes é baseado em TDMA (*Time division multiple access*).
- WirelessMAN-OFDMA - Camada física OFDMA com 2.048 portadoras FFT para operações ponto multi-ponto em condições NLOS para frequências de 2GHz a 11GHz. O acesso múltiplo das diferentes estações clientes é realizado atribuindo um conjunto de subportadoras para um único cliente.

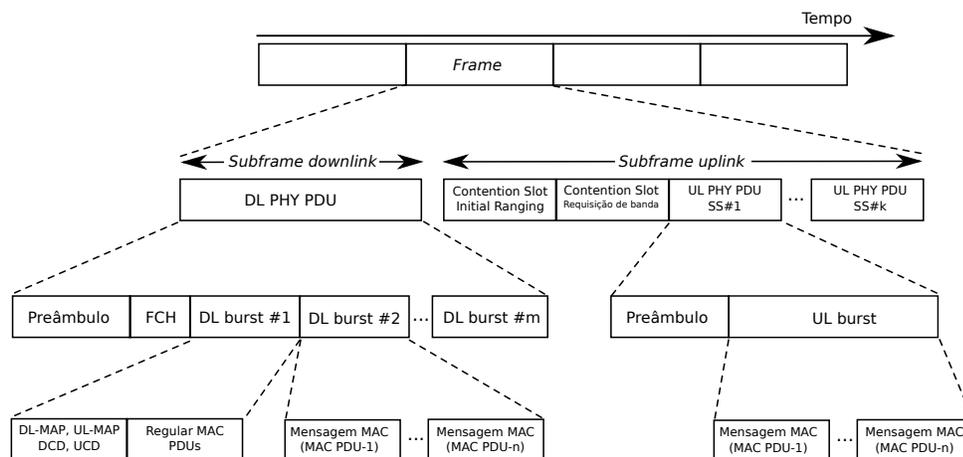
Neste trabalho, é considerada apenas a camada física OFDM. O esquema de transmissão OFDM (*Orthogonal Frequency Division Multiplexing*) é amplamente utilizado comercialmente pois permite altas taxas de transferências para comunicação de vídeo e voz. O OFDM é baseado na ideia de dividir um fluxo de dados maior em vários fluxos de dados menores, modulando cada fluxo em subportadoras. Esse esquema minimiza a interferência entre símbolos fazendo um tempo de símbolo suficientemente grande. Para a camada física WirelessMAN-OFDM, o tamanho da FFT é fixa em 256 subportadoras, onde 192 subportadoras são utilizadas para transmitir os dados, 8 subportadoras são utilizadas para estimar e sincronizar o canal e o restante são subportadoras de guarda.

O método de duplexação da camada física pode ser FDD (*Frequency Division Duplex*) ou TDD (*Time Division Duplex*). Neste trabalho será considerado apenas o método de duplexação TDD. Na duplexação TDD a camada física opera em formato de *frames* e cada *frame* contém um *subframe downlink* e um *subframe uplink*. A Figura 2.3 ilustra a estrutura do *frame*. A duração de um *frame* varia de 0,5 ms a 20 ms, dependendo da camada física.

**Subframe downlink** Um *subframe downlink* consiste de um PHY PDU *downlink*. Um PHY PDU *downlink* inicia com um longo preâmbulo que é utilizado para sincronização da estação base com as estações clientes. Em seguida, existe um rajada *Frame Control Header* (FCH), que é um símbolo OFDM transmitido na modulação BPSK 1/2 com a função de informar a modulação padrão do *frame*. Logo depois, uma rajada *downlink broadcast* que pode ter uma mensagem DL-MAP e uma mensagem UL-MAP, uma mensagem *Downlink Channel Descriptor* (DCD) e uma mensagem *Uplink Channel Descriptor* (UDC). A localização da informação dentro do *frame* e o perfil de modulação e codificação de cada rajada de pacotes *downlink* é informado

no DL-MAP, assim como o mapa UL-MAP informa a localização dentro do *frame* e o perfil de modulação e codificação onde cada cliente pode enviar uma rajada de pacotes *uplink*, ou seja, o mapa *uplink* informa às estações clientes o momento que podem realizar uma transmissão *uplink*. As mensagens DCD (*Downlink Channel Descriptor*) e UCD (*Uplink Channel Descriptor*) são transmitidas periodicamente para definir as características do canal *downlink* e *uplink*, respectivamente.

**Subframe uplink** O *subframe uplink* consiste em intervalos de contenção para *initial ranging*, intervalos de contenção ou *grant unicast* para o pedido de banda e por fim, os PHY PDU *uplink* para que as estações clientes possam transmitir os dados no sentido *uplink*. Além disso, há um intervalo de silêncio (*Transition Gap*) entre cada rajada *uplink* para evitar a interferência nas transmissões no sentido *uplink*.



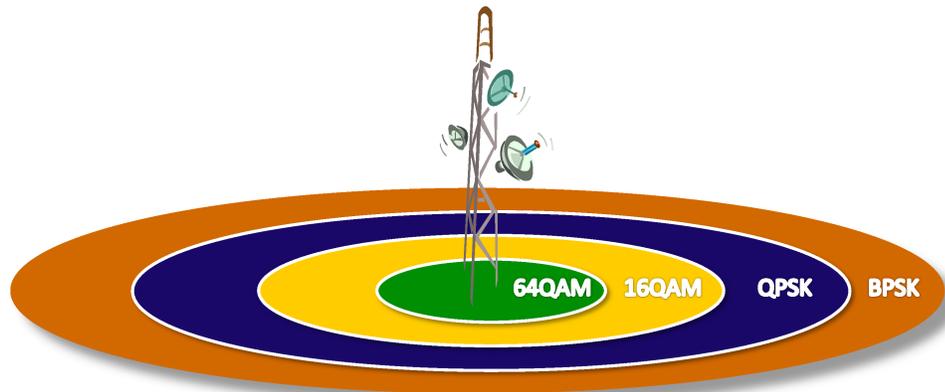
**Figura 2.3:** Estrutura de um *frame* TDD

### 2.4.1 Esquemas de Modulação e Codificação

Quatro modulações diferentes são suportadas pelo padrão IEEE 802.16:

- BPSK (*Binary Phase Shift Keying*)
- QPSK (*Quadrature Phase Shift Keying*)
- 16-QAM (*16-Quadrature Amplitude Modulation*)
- 64-QAM (*64-Quadrature Amplitude Modulation*)

Para aumentar a eficiência da transmissão, a tecnologia permite a utilização de um mecanismo de adaptação de link (AMC - *Adaptive Modulation and Coding*), onde para cada estação cliente é utilizado um perfil de modulação e codificação diferente. Se a qualidade do sinal for boa, então utilizada-se um perfil de modulação e codificação mais eficiente, mas se a qualidade do sinal for ruim, utilizada-se um perfil de modulação e codificação mais robusto. Além disso, essa qualidade de sinal varia de acordo com o tempo, e o AMC permite que cada cliente utilize o perfil de modulação e codificação mais eficiente de acordo com a sua localização dentro da célula. A Figura 2.4 ilustra as diferentes modulações dependendo da distância entre a estação cliente e a estação base.



**Figura 2.4:** Modulações da camada física OFDM

As quatro modulações do IEEE 802.16 em conjunto com um mecanismo de codificação formam sete perfis de modulação e codificação (MCS - *Modulation and Coding Scheme*): BPSK 1/2, QPSK 1/2, QPSK 3/4, 16QAM 1/2, 16QAM 3/4, 64QAM 2/3 e 64QAM 3/4. A Tabela 2.3 mostra o tamanho em *bytes* de um bloco de dados a ser codificado por um símbolo nos diferentes perfis de modulação e codificação.

## 2.5 Camada de Acesso ao Meio - MAC

A camada de acesso ao meio, que fica acima da camada física, é responsável por controlar e multiplexar as conexões da camada de transporte para a camada física e vice-versa. A camada MAC segmenta ou concatena as unidades de dados (SDU) recebidos das camadas superiores em MAC PDUs (*Protocol Data Units*). A camada MAC também seleciona o perfil de modulação e codificação para transmitir o MAC PDU. É de responsabilidade da camada MAC prover QoS através da priorização das MAC PDUs e retransmitir um MAC PDU quando é detectado um erro no mecanismo de ARQ (*Automated Repeat Request*). Além disso, a camada MAC provê

Modulação	Taxa de codificação	Tamanho do bloco decodificado ( <i>bytes</i> )	Tamanho do bloco codificado ( <i>bytes</i> )
BPSK	1/2	12	24
QPSK	1/2	24	48
QPSK	3/4	36	48
16-QAM	1/2	48	96
16-QAM	3/4	72	96
64-QAM	2/3	96	144
64-QAM	3/4	108	144

**Tabela 2.3:** Codificação do canal por perfil de modulação e codificação

suporte para o gerenciamento de mobilidade, criptografia dos dados e gerenciamento das chaves e economia de energia.

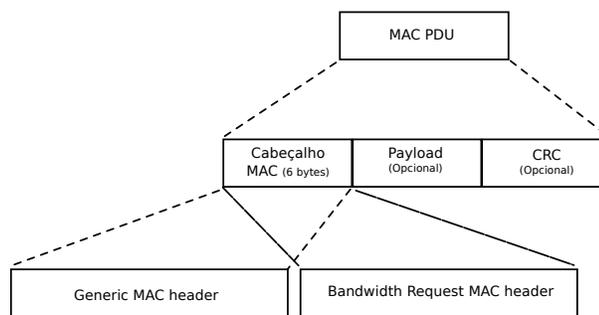
Como mostrado na Figura 2.2, a camada MAC é subdividida em outras três subcamadas: *service-specific convergence sublayer* (CS), que faz a interface com a camada superior; *common-part sublayer* (MAC CPS), que realiza todas as operações que independem das camadas superiores, tais como fragmentação e concatenação de SDUs em MAC PDUs, transmissão das MAC PDUs, controle de QoS e ARQ; *security sublayer*, que é responsável pela encriptação, autorização e a troca de chaves entre a estação base e a estação cliente. O escopo deste trabalho é o escalonamento e o controle de admissão, portanto, essa seção traz o foco na camada MAC CPS.

Na topologia PMP, a rede IEEE 802.16 opera com uma estação base central e, dentro de uma mesma frequência e mesmo setor, todas as estações clientes recebem a mesma transmissão da estação base. A transmissão no sentido *downlink* geralmente é *broadcast*, e algumas vezes a estação base não especifica qual parte do subframe *downlink* é específico para cada estação cliente, então todas as estações cliente conseguem acessar qualquer parte do subframe *downlink*. A camada MAC é orientada a conexão e cada conexão possui um identificador único (CID), então cada estação cliente verifica se a MAC PDU contém um CID destinado para si. Além disso, isso permite que a estação base realize o mapeamento dos serviços para cada estação cliente e associe diferentes níveis de QoS no contexto da conexão. Durante a entrada na rede, são estabelecidos dois pares de conexão de gerenciamento e, opcionalmente, pode haver um terceiro par de conexões. Cada par compreende uma conexão *downlink* e uma conexão *uplink*. Os dois primeiros pares são a conexão básica, que é utilizada para troca de mensagens mais urgentes, e a conexão primária, que é utilizada para mensagens mais longas tolerantes a retardo. A outra conexão de gerenciamento, a conexão secundária, é utilizada para mensagens tolerantes ao retardo de outros protocolos, como por exemplo, DHCP, TFTP, SNMP, entre outros. Para a transmissão dos pacotes de dados das camadas superiores, são estabelecidas as conexões de

transporte, que estão associadas a um fluxo de serviço e, conseqüentemente, a um conjunto de parâmetros de QoS.

As estações clientes compartilham o enlace no sentido *uplink*. Uma estação cliente pode receber o direito de transmitir periodicamente ou pode receber o direito de transmitir depois de um pedido aceito pela estação base, dependendo da classe de serviço utilizada. Para isso, o padrão IEEE 802.16 define um conjunto de mensagens de sinalização para permitir mecanismos de grants periódicos (*unsolicited bandwidth grants*), *polling* e procedimentos de contenção. Entretanto, a política de transmissão dessas mensagens não está definida no padrão para permitir que os fabricantes otimizem o desempenho dos seus produtos utilizando uma combinação de técnicas de escalonamento, mas sempre mantendo a interoperabilidade entre os produtos.

**MAC PDU** Um MAC PDU consiste de um cabeçalho seguido de um *payload* e um campo chamado *Cyclic Redundancy Check (CRC)* para verificação da integridade da mensagem, como mostra a Figura 2.5. Existem dois tipos de PDU, o *generic MAC PDU* e o *bandwidth request PDU*. O primeiro, é um cabeçalho genérico utilizado para o transporte de dados e das mensagens de sinalização da camada MAC. O *bandwidth request PDU* é utilizado para solicitar banda para a conexão *uplink*. Neste caso, a mensagem pode conter dados, além do pedido de banda. Uma vez que o MAC PDU é construído, a mensagem é enviada ao escalonador e está pronta para ser encaminhada para a camada física. Mais detalhes sobre a alocação de banda podem ser encontrados na Seção 2.5.1.



**Figura 2.5:** MAC PDU

### 2.5.1 Alocação de recursos

A alocação de recursos para as estações clientes é realizada sob demanda. Quando uma estação precisa de largura de banda para uma conexão, ela envia uma mensagem de requisição para a estação base. Uma requisição de banda pode ser enviada como um pacote, cujo cabeçalho indica a presença de um pedido de banda, ou pode ser enviada juntamente com um pacote de dados (*Piggyback*). Todas as requisições devem indicar o número de *bytes* necessários para

transmitir os dados (*payload*) e o cabeçalho MAC. A requisição de largura de banda pode ser incremental ou agregada. Uma requisição incremental indica a largura de banda adicional que a estação cliente precisa, enquanto uma requisição agregada indica a largura de banda total necessária para a estação cliente.

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

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

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

A camada MAC também provê mecanismos para fornecer QoS aos tráfegos *uplink* e *downlink*. O principal mecanismo para a provisão de QoS consiste em associar os pacotes que passam pela camada MAC a um fluxo de serviço. O fluxo de serviço é um serviço da camada MAC que fornece transporte unidirecional aos pacotes. Durante a fase de estabelecimento da conexão, esses fluxos de serviço são criados e ativados pela estação base e pela estação cliente. Cada fluxo de serviço ativo é associado a uma conexão. Várias seções das camadas superiores podem operar sobre o mesmo fluxo de serviço na camada MAC caso seus requisitos de QoS sejam os mesmos. Cada fluxo de serviço deve definir seu conjunto de parâmetros de QoS, dentre eles retardo máximo, largura de banda mínima e o tipo do serviço.

### 2.5.2 Qualidade de serviço

Durante a entrada de uma nova estação cliente na rede, são estabelecidos os fluxos de serviço das conexões, que associam um conjunto de parâmetros de qualidade de serviço à uma conexão de transporte. Quando um pacote passa pela camada MAC, ele é associado a um fluxo de serviço o que possibilita que o mecanismo para provisão de QoS priorize os pacotes que são enfileirados na camada. Os parâmetros de QoS de um fluxo de serviço definido pelo padrão IEEE 802.16 são:

- *Traffic priority* - O valor desse parâmetro especifica a prioridade associada ao fluxo de serviço. Quando houver dois fluxos de serviço com os parâmetros de QoS idênticos (exceto pelo parâmetro *traffic priority*), a prioridade pode ser desempatada por esse atributo. Entretanto, se os fluxos de serviço não forem idênticos, esse campo não deve preceder os outros parâmetros.
- *Maximum sustained traffic rate* - Esse parâmetro define a taxa de pico do serviço. A taxa é expressa em *bits* por segundo, sem levar em consideração o tamanho do cabeçalho MAC e o código de verificação CRC. Na estação cliente, o tráfego no sentido *uplink* deve ser policiado para estar de acordo com esse parâmetro, na média e ao longo do tempo. No tráfego *downlink*, é assumido que o serviço já foi policiado na entrada da rede e a estação base não precisa fazer nenhum controle adicional.
- *Maximum traffic burst* - Este parâmetro define o tamanho máximo da rajada que deve ser disponibilizado ao serviço. Uma vez que a velocidade da interface de entrada ou interface aérea pode ser maior que o *maximum sustained traffic rate*, esse parâmetro define a rajada máxima que o sistema deve associar ao serviço.
- *Minimum reserved traffic rate* - Este parâmetro especifica a taxa mínima reservada para o fluxo de serviço. A taxa é expressa em *bits* por segundo e especifica a quantidade mínima de dados a ser transportado considerando o fluxo de serviço. Esse valor é uma média calculada ao longo do tempo. Quando não há dados suficiente para atingir a taxa mínima contratada, o excedente pode ser utilizado para outras finalidades.
- *Vendor-specific QoS parameter* - O padrão IEEE 802.16 reserva um campo para permitir que os fabricantes codifiquem um parâmetro específico de QoS.
- *Service flow scheduling type* - Este parâmetro especifica a classe de serviço que o fluxo está associado, podendo assumir os valores: Indefinido, BE, nrtPS, rtPS, UGS e ertPS. O valor indefinido depende da implementação da estação base. Quando o valor do atributo *Service flow scheduling type* é omitido, é considerado um fluxo de serviço do tipo BE.
- *Request/transmission policy* - o valor desse parâmetro permite especificar certos atributos para o fluxo de serviço associado. Esses atributos incluem opções para a formatação da PDU e restrições nas opções dos tipos de requisição de banda.
- *Tolerated jitter* - Este parâmetro define a variação máxima da latência para a conexão.
- *Maximum latency* - O valor desse parâmetro especifica a latência máxima entre a recepção do pacote pela estação base ou estação cliente, e a transmissão do pacote para a interface de rádio frequência (RF);

- *Unsolicited grant interval* - Esse parâmetro define o intervalo entre *grants* alocados para os fluxos de serviço do tipo UGS ou ertPS.
- *Unsolicited polling interval* - O valor desse parâmetro especifica o intervalo máximo entre *grants* alocados para as estações clientes enviarem uma requisição de banda.

A rede do padrão IEEE 802.16-2005 suporta cinco tipos de fluxos de serviços, que são: UGS, rtPS, nrtPS, ertPS e BE. Cada fluxo de serviço é adequado para diferentes tipos de aplicações com diferentes requisitos.

### Classes de serviço

Para garantir os requisitos de QoS, o padrão define um mecanismo de sinalização entre a estação base e a estação cliente, cinco classes de serviço, um mecanismo de escalonamento e um mecanismo de controle de admissão de novas conexões. Entretanto, as políticas que devem ser utilizadas na implementação dos mecanismos de escalonamento e controle de admissão não foram especificadas pelo padrão. O UGS, rtPS, ertPS, nrtPS e BE são os cinco níveis de serviço especificados para dar suporte às várias aplicações multimídia. Tanto para o tráfego *uplink* quanto para o tráfego *downlink*, os pacotes são associados à um fluxo de serviço pela camada de acesso ao meio (MAC). De acordo com o nível de serviço, diferentes parâmetros são configurados durante o registro da estação cliente na estação base.

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

O segundo tipo de serviço é o rtPS e foi projetado para aplicações com requisito de tempo real que geram pacotes com tamanho variável periodicamente como, por exemplo, aplicações de vídeo MPEG. Fluxos rtPS requisitam banda através de *polling unicast* periódico e os requisitos de QoS são garantidos satisfazendo os requisitos de latência máxima e de banda mínima.

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

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

O serviço BE suporta tráfego de melhor esforço sem quaisquer garantias de QoS. A estação cliente pode utilizar tanto *slots unicast* quanto *slots* de contenção para requisitar largura de

banda.

A Tabela 2.4 mostra os principais parâmetros de QoS para cada tipo de serviço do padrão IEEE 802.16.

<b>Tipo de serviço</b>	<b>Parâmetros de QoS</b>
UGS	<i>Maximum sustained rate</i> <i>Maximum latency</i> <i>Tolerated jitter</i>
rtPS	<i>Minimum reserved rate</i> <i>Maximum sustained rate</i> <i>Maximum latency</i> <i>Traffic priority</i>
nrtPS	<i>Minimum reserved rate</i> <i>Maximum sustained rate</i> <i>Traffic priority</i>
ertPS	<i>Minimum reserved rate</i> <i>Maximum sustained rate</i> <i>Maximum latency</i> <i>Traffic priority</i> <i>Tolerated jitter</i>
BE	<i>Maximum sustained rate</i> <i>Traffic priority</i>

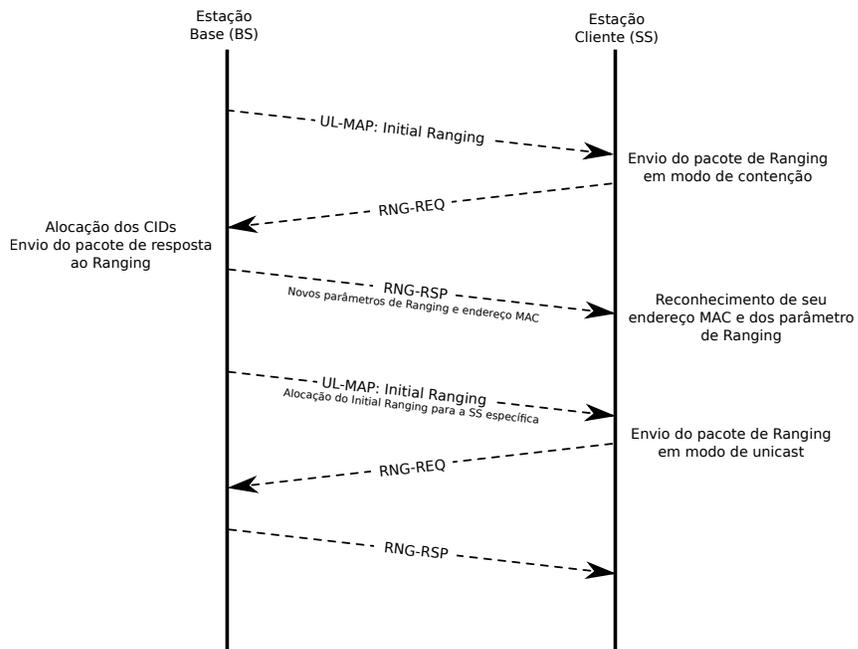
**Tabela 2.4:** Parâmetros de QoS por tipo de fluxo de serviço

### 2.5.3 Inicialização e entrada na rede

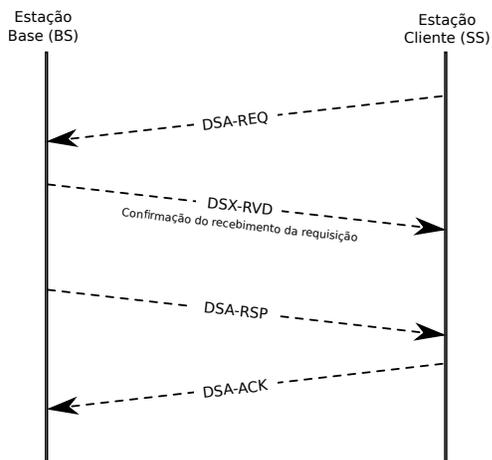
Quando a interface de uma estação cliente é ligada, ela passa por várias etapas até entrar na rede e estar apta a transmitir os dados. Uma visão geral desse processo de entrada na rede está descrita abaixo:

1. Procurar um canal *downlink* para estabelecer a sincronização com a estação base - Na inicialização ou depois da perda de sinal, a estação cliente procura continuamente nos canais por uma frequência *downlink* até encontrar um sinal válido. Durante a procura dos canais, a estação cliente procura pelos preâmbulos nos *subframes downlink*, e assim ela consegue realizar a sincronização com a estação base.

2. Obter os parâmetros de transmissão (das mensagens UCD/DCD) - Assim que realizar a sincronização, a estação cliente já consegue escutar as mensagens de controle, como FCH, DCD e UCD. Essas mensagens são enviadas de tempos em tempos em *broadcast* nos *subframes downlink*.
3. Realizar o *ranging* - *Ranging* é o processo para obter o correto *timing offset* e os ajustes de energia necessários para manter a conexão *uplink*. O processo de *ranging* pode ser visualizado na Figura 2.6. Após a conexão ser estabelecida, ainda ocorre o *ranging* periódico, que mantém as flutuações do *timing* e dos níveis de energia ao longo do tempo.
4. Negociar as capacidades básicas - Nessa etapa, a estação cliente envia à estação base um conjunto de parâmetros relacionados à alocação de banda e à camada física.
5. Autorizar a estação cliente e realizar as trocas de chaves - A estação base e a estação cliente realizam a autorização e a troca de chaves.
6. Realizar o registro - *Registration* é o processo em que a estação cliente é permitida entrar na rede e ela recebe um CID secundário.
7. Estabelecer conectividade IP - A atribuição de IP é realizada através do DHCP.
8. Estabelecer o horário do dia - Para que os *logs* dos eventos dos sistemas de gerenciamento estejam sincronizados, a estação cliente e a estação base precisam ter um horário aproximado, e então a estação cliente acerta o seu horário de acordo com o servidor.
9. Transferir os parâmetros operacionais - A estação cliente recupera um arquivo de configuração utilizando o protocolo TFTP (*Trivial File Transfer Protocol*).
10. Estabelecer as conexões - A etapa final consiste na criação dos fluxos de serviço. Um fluxo de serviço está associado a um conjunto de parâmetros de QoS. O processo de criação dos fluxos de serviços pode ser visualizado na Figura 2.7.



**Figura 2.6:** Procedimento de *Ranging*



**Figura 2.7:** Procedimento de criação do fluxo de serviço

# Capítulo 3

## Simulador ns-3

O ns-2[18] é um simulador de eventos discretos amplamente utilizado em pesquisas em redes. Para realizar simulações de redes IEEE 802.16, foram encontrados alguns módulos do ns-2 na literatura. Entre eles, está o módulo WiMAX [19] para o ns-2 desenvolvido pelo Laboratório de Redes de Computadores (LRC) do Instituto de Computação - UNICAMP. Este módulo implementa a camada MAC do padrão IEEE 802.16 com os 5 níveis de serviços, permitindo que se faça o escalonamento baseado nas classes de serviços. O módulo também conta com as funcionalidades de requisição e escalonamento de largura de banda e provisão de QoS.

Outro módulo para o ns-2 que se destaca é o módulo WiMAX [20] desenvolvido pelo National Institute of Standards and Technology (NIST) dos Estados Unidos. Este módulo implementa a camada MAC e a camada física OFDM com modulação configurável, duplexação por divisão de tempo e topologia ponto-multiponto, mas não implementa as classes de serviços definidas no padrão, desta maneira, não permite escalonar os pacotes para oferecer alguma garantia de QoS.

O projeto do ns-2 teve início em 1989 e se tornou referência por ser um simulador de código aberto e recebeu inúmeras contribuições. Entretanto, o projeto foi descontinuado para o desenvolvimento de um novo simulador de redes, o ns-3 [13], melhor documentado, mais fácil de usar e depurar. Em 2009, o sucessor do ns-2, o ns-3 foi lançado.

Em 2009, Farooq e Turletti [21] desenvolveram um novo módulo WiMAX para o simulador ns-3. O módulo proposto implementa a camada de acesso ao meio (MAC) e a camada física (PHY) no modo PMP. A camada física implementada é a WirelessMan-OFDM e realiza a codificação e decodificação dos pacotes. A camada MAC implementa as principais funcionalidades do padrão IEEE 802.16, incluindo QoS, mecanismo de requisição de banda e um escalonador *uplink* simples. Ismail et al. [22] contribuíram com melhorias ao módulo. Faz parte das melhorias, um classificador de pacotes IP, um escalonador *downlink* e um escalonador *uplink*, suporte a *multicast* e um modelo de canal realista.

Neste trabalho de mestrado, optou-se utilizar o ns-3 por já contar com a maioria das funcio-

nalidades implementada para a pesquisa em escalonamento utilizando a camada física OFDM. Além disso, o ns-3 vem se tornando o simulador de código aberto mais utilizado em pesquisa em redes.

### 3.1 Modelo de canal

Quando se trata de um meio físico aéreo, existem tipos de ambientes com diversas características. Num meio urbano, por exemplo, a densidade de construções fornece desafios extras na transmissão do sinal. Para simular um ambiente com características realistas, é preciso um modelo de canal sem fio.

No módulo WiMAX para o ns-3 modificado por Ismail et al. [22], é implementada a camada física OFDM e o modelo de propagação *COST 231 Hata* [23], para que se possa simular o canal sem fio das redes IEEE 802.16 em um ambiente suburbano. O modelo empírico tem baixa complexidade de execução e utiliza fatores de correção para diferenciar os ambientes suburbanos, urbanos e rurais. O modelo COST 231 é um dos modelos recomendados pelo grupo IEEE 802.16 [24] para simulações de redes IEEE 802.16.

Baseado na distância entre a antena da estação base e a antena receptora da estação cliente, o modelo de canal estima a perda de percurso e então calcula a relação sinal-ruído (SNR) de cada pacote que chega no receptor. Dependendo da probabilidade de perda e do SNR, o pacote pode ser descartado devido à erros durante a propagação. Assim, quanto maior a distância entre a estação base e a estação cliente, maior a probabilidade de perda e, conseqüentemente, mais baixo o *goodput* da estação cliente.

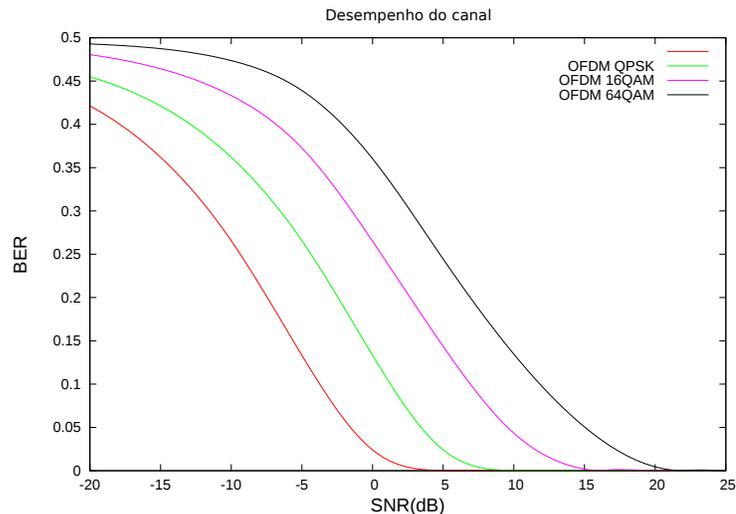
Outro modelo de propagação estudado foi o modelo SUI [25] (*Stanford University Interim*), também conhecido como Erceg. O modelo de Erceg é um modelo de propagação empírico baseado em dados coletados na faixa de frequência de 1,9 GHz em diferentes regiões suburbanas dos Estados Unidos e modela três diferentes tipos de terrenos: (i) montanhoso com grande densidade urbana; (ii) montanhoso com pouca densidade urbana; (iii) sem montanhas e com pouca densidade urbana. Assim como o modelo COST 231, o modelo Erceg é outro modelo recomendado pelo grupo IEEE 802.16 [24] para simulações de redes IEEE 802.16.

Num modelo de canal realista, leva-se em consideração as imperfeições do meio sem fio, com o objetivo de determinar se um pacote foi recebido com sucesso ou não. O modelo de propagação se baseia na perda de potência no valor de SNR (*Signal-to-Noise Ratio*), que é a relação entre a potência do sinal recebido e a potência do ruído do canal do receptor. Com o valor de SNR, é preciso calcular a probabilidade de erro de *bit* do canal e, de acordo com o tamanho do pacote, obtêm-se a probabilidade de erro de pacote. Por fim, usando uma variável aleatória, o simulador determina se um pacote deve ser descartado ou deve ser recebido pela camada física.

### Modelo de erros de pacotes

Para a modelagem de perda de pacotes, foram utilizadas curvas estatísticas de BER e PER. Devido ao alto processamento necessário para simular a codificação e decodificação dos *bits* durante a simulação de pacotes, os dados de BER e PER geralmente são processados em um passo anterior à simulação dos cenários e carregados como curvas no simulador de pacotes. Para as simulações deste trabalho, foram estudadas duas curvas simuladas em MatLab para a avaliação do desempenho da camada física OFDM. O primeiro trabalho foi desenvolvido por Bustamante *et al.* [26] e o segundo pelo ICRFE [27], da Universidade de Tecnologia de Viena.

Os resultados obtidos por Bustamante *et al.* foram obtidos através de simulações da camada física OFDM desenvolvido em MatLab. O simulador OFDM conta com os seguintes componentes: gerador aleatório de pacotes, codificador Reed Solomon, codificador Convolutional Coder, misturadores (Scrambler e Interleaver), modulador, equalizador e canal sem fio com multipercursos. Com isso, os autores conseguiram os dados de BER para os sete perfis de modulação e codificação do padrão IEEE 802.16 com diferentes valores de SNR. Com os dados de BER, os autores realizaram as simulações para obter os valores de PER. A partir dos resultados apresentado por Bustamante, foi possível realizar simulações para obter os gráficos das curvas de BER e PER que mostrados nas Figuras 3.1 e 3.2.

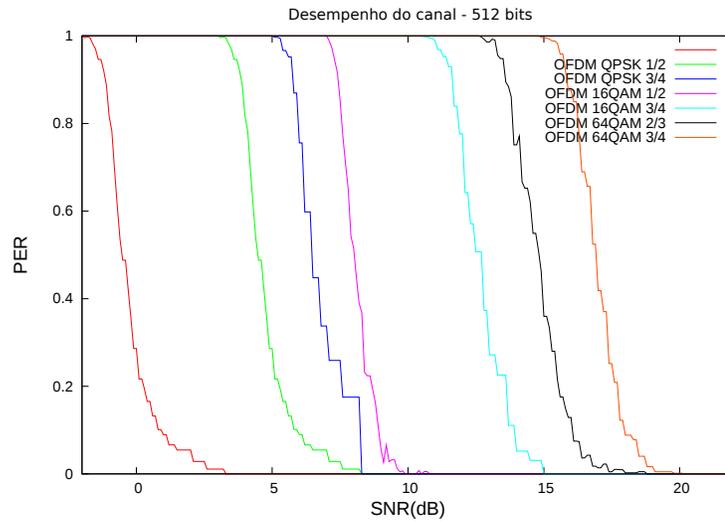


**Figura 3.1:** Curvas de BER pelo SNR

O modelo proposto pelo ICRFE apresenta apenas as estatísticas de BER para os diferentes perfis de modulação e codificação. Para obter as curvas de PER, utiliza-se a equação abaixo.

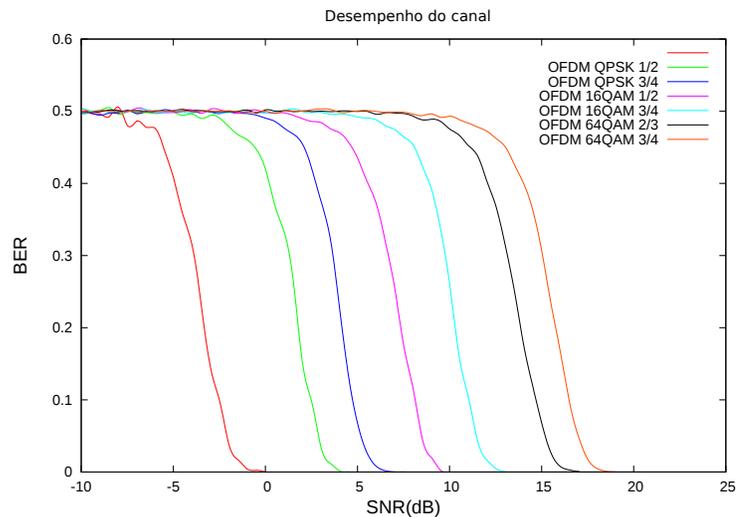
$$PER = 1 - (1 - BER)^L \quad (3.1)$$

Onde  $L$  é o tamanho do pacote em *bits*. Nesta modelagem analítica considera-se que o modelo



**Figura 3.2:** Curvas de PER pelo SNR

de erros do canal segue uma distribuição binomial e que todos os erros de bits são independentes entre si. A Figura 3.3 mostra a curva de BER do modelo proposto pela Universidade de Tecnologia de Vienna.



**Figura 3.3:** Curvas de BER pelo SNR - Universidade de Tecnologia de Vienna

A estratégia de pré-calcular as curvas de erros simplifica a modelagem do simulador de pacotes e diminui a complexidade da simulação. A principal limitação dessa técnica é que os dados cobrem apenas um conjunto de cenários e parâmetros, ou seja, para obter as curvas de BER, é selecionado um conjunto de valores de SNR em um intervalo possível. Para minimizar essa questão e cobrir os valores faltantes entre pontos, é realizada uma interpolação linear para

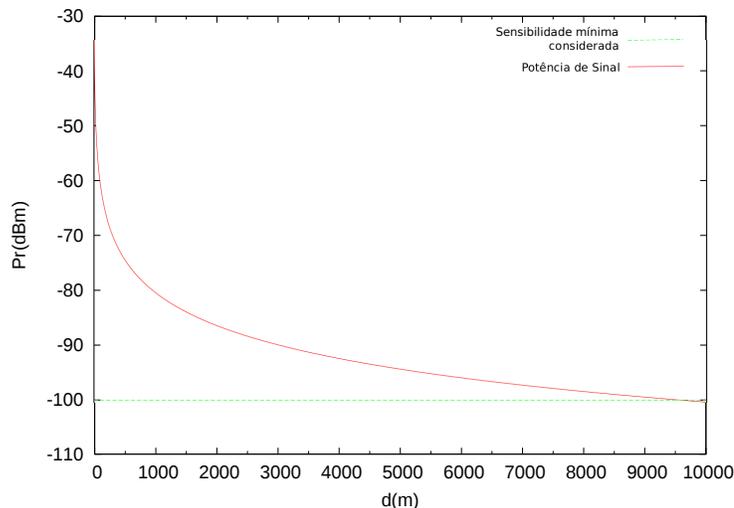
chegar mais próximo possível dos pontos da curva de BER ou PER.

Depois de calcular o PER, que reflete a probabilidade de perda de pacotes, uma variável aleatória uniforme variando de 0 a 1 é utilizada para decidir se o pacote deve ser descartado. Se o valor sorteado for menor que o valor de PER, o pacote é descartado, caso contrário, o pacote é recebido pela camada física.

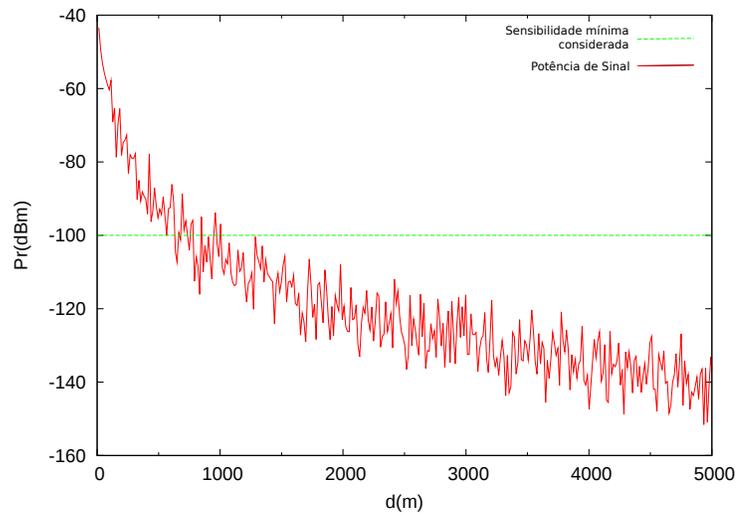
### 3.1.1 Validação do modelo de canal e modelo de erros

Para validar a implementação do modelo de canal, foi simulado um cenário com uma célula com uma estação base central transmitindo, e então foi utilizado uma estação cliente para coletar os valores de SNR em diversos pontos dentro da célula. Os parâmetros de potência da antena, assim como o ganho de cada antena e a figura de ruído são aqueles recomendados pelo grupo WiMAX [24].

Como base de comparação, uma simulação no espaço livre, que é um meio ideal sem nenhum tipo de interferência, mostra a queda de potência de sinal com o aumento da distância entre o transmissor e o receptor, como mostra a Figura 3.4. Uma simulação utilizando o modelo SUI mostrada na Figura 3.5 mostra o impacto de um modelo realista. Ao considerar uma sensibilidade mínima de -100dBm, o cenário montanhoso com grande densidade urbana simulado não consegue transmitir para uma estação cliente a mais de 1 Km de distância usando os parâmetros padrão. Na prática, outras técnicas são utilizadas para obter distâncias maiores, como MIMO (*multiple-input and multiple-output*) e antenas direcionais, essas técnicas não estão no escopo de estudo deste trabalho. Nota-se que a curva para o modelo de Erceg segue o formato da curva do espaço livre, exceto pela distância alcançada e o fator que adiciona aleatoriedade ao modelo.

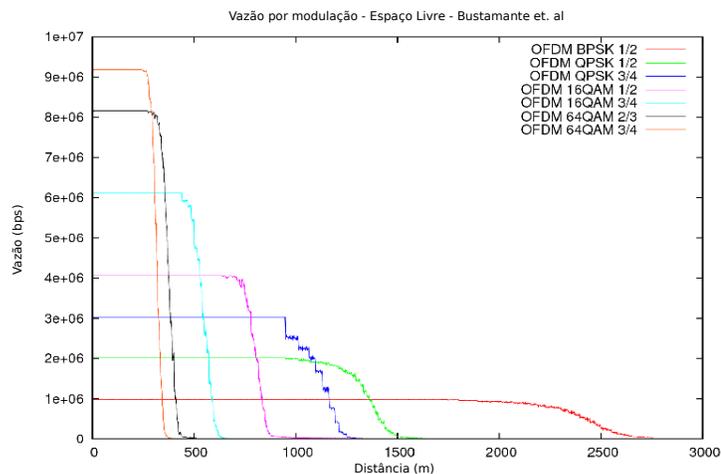


**Figura 3.4:** Modelo de Espaço Livre



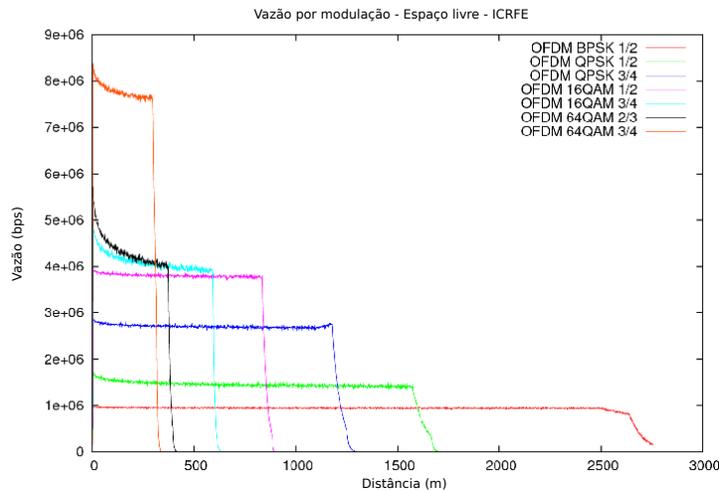
**Figura 3.5:** Modelo de Erceg - cenário montanhoso com grande densidade urbana

Para validar o modelo de erro de pacotes, foram realizadas simulações para medir a vazão dos dados. Em um cenário de uma célula com uma estação base central e uma estação cliente que vai se distanciando, a estação base transmite com a máxima vazão possível, fazendo com que o enlace sem fio fique saturado. Usando os mesmos parâmetros da validação anterior e utilizando o modelo de propagação de Espaço Livre, os resultados podem ser visualizados nas Figuras 3.6 e 3.7, para os modelos de perda de pacotes apresentados por Bustamante *et al.* e pelo ICRFE, respectivamente.



**Figura 3.6:** Vazão - Free Space e Bustamante *et al.*

No caso do modelo de Bustamante *et al.*, a modulação mais eficiente sempre tem maior vazão que a próxima modulação mais robusta, em contrapartida, a modulação mais robusta tem um



**Figura 3.7:** Vazão - Free Space e ICRFE

alcance maior. Há um comportamento parecido no modelo do ICRFE, exceto pela modulação 64-QAM 2/3, que não tem um desempenho muito superior quando comparado com a próxima modulação. Neste modelo, também há uma queda repentina na vazão. Isso se deve ao fato de usar o modelo analítico para obter o PER. O modelo penaliza pacotes com tamanho maiores, então no momento em que começa a ter perda de dados, há uma queda brusca na taxa de vazão.

## 3.2 Considerações Finais

As validações apresentadas neste capítulo foram importantes para escolher um modelo de perda de pacotes a ser utilizado nas simulações deste trabalho. Ambos os modelos são válidos pois apresentaram uma queda esperada na taxa de transmissão para cada perfil de modulação e codificação. Entretanto, o modelo do ICRFE [27] apresenta tem a curva do perfil OFDM 64QAM 2/3 sobrepondo uma outra curva, ou seja, não há distinção na taxa de transmissão e praticamente tem a mesma vazão da curva OFDM 16QAM 3/4. Por esse motivo pode-se concluir que há um certo distanciamento nas simulações e os modelos teóricos. Já no modelo proposto por Bustamente *et al.* isso não acontece, todas as curvas se comportam de forma semelhante aos modelos teóricos. Desta forma, as simulações deste trabalho utilizam o modelo de perda de pacotes de Bustamente *et al.* [26].

## Capítulo 4

# Escalonamento em redes IEEE 802.16

Para atender os requisitos de qualidade de serviço das estações clientes conectadas na rede, uma peça fundamental é o escalonamento de pacotes, que é responsável pela alocação de recursos. O escalonamento é dependente do tipo de camada física utilizada. Na camada física OFDM, múltiplas subportadoras formam um subcanal e a transmissão de/para um cliente, para um conjunto de clientes ou para todos os clientes (broadcast), acontece através de um conjunto de subcanais utilizando-se uma mesma modulação e codificação. Na camada MAC, um conjunto de subcanais OFDM é visto pelo escalonador como um canal lógico no domínio do tempo. Já na camada física OFDMA, a alocação é realizada não apenas no domínio do tempo, mas também no domínio da frequência, uma vez que mais de um usuário pode utilizar o canal ao mesmo tempo, mas em frequências diferentes. A alocação de subcanais para as estações clientes é tarefa do escalonador.

O padrão IEEE 802.16 ainda dá suporte à duplexação por frequência (FDD - Frequency Division Duplex) e à duplexação pelo tempo (TDD - Time Division Duplex). No modo FDD, a transmissão dos dados na direção *uplink* e *downlink* ocorre simultaneamente em subportadoras diferentes, enquanto, no modo TDD, *uplink* e *downlink* utilizam o mesmo conjunto de subportadoras em instantes de tempo diferentes. A duplexação pelo tempo tem como vantagem a possibilidade de se fazer uma alocação dinâmica da banda na razão *uplink* - *downlink* ao longo do tempo. No escopo deste trabalho, o escalonamento será realizado sobre a camada física OFDM com duplexação TDD. Dessa forma, o escalonamento em redes IEEE 802.16 pode ser dividido em escalonamento *downlink* e escalonamento *uplink*. O escalonamento *downlink* conta com um escalonador localizado na estação base e é responsável pela alocação de recursos para transmissão dos pacotes da estação base para as estações cliente. O escalonamento *uplink* é realizado por dois escalonadores, um na estação base e outro na estação cliente. O escalonador *uplink* da estação base é responsável pelo compartilhamento do canal *uplink* entre todas as estações cliente. As estações cliente enviam mensagens de requisição de banda para a estação base, que são usadas pelo escalonador para fazer a alocação de *grants* para as estações cliente. O

escalonador *uplink* das estações cliente decide quais pacotes serão transmitidos em cada *grant* recebido.

Dentre os três escalonadores existentes em uma rede IEEE 802.16, o mais complexo é o escalonador *uplink* da estação base, por não ter acesso direto às filas de pacotes a serem enviados. Isso faz com que as informações que o escalonador possui sobre os pacotes estejam, por vezes, desatualizadas ficando dependente das mensagens de requisição de banda enviadas pelas estações clientes para estimar o estado da fila de pacotes. Além disso, o escalonador *uplink* ainda é responsável pela alocação de recursos para *ranging* e alocação de banda para o mecanismo de requisição de banda. Garantir os requisitos de QoS de cada estação cliente da rede é o diferencial da nova geração de tecnologia. Do ponto de vista comercial, ainda existe o requisito de realizar um escalonamento eficiente no uso da largura de banda disponível para ter o maior número de usuários conectados na rede, de forma a ter uma alta utilização da rede.

Para que os fabricantes possam diferenciar os seus produtos, o padrão IEEE 802.16 não especifica políticas para o mecanismo de escalonamento atraindo diversos pesquisadores da área a investigar o assunto. A subseção seguinte discute as principais políticas de escalonamento em redes IEEE 802.16 propostas na literatura.

## 4.1 Estado da arte da pesquisa em escalonamento em redes IEEE 802.16

A variabilidade temporal e espacial do enlace sem fio faz com que os algoritmos de escalonamento desenvolvidos para redes cabeadas não sejam adequados para redes sem fio. Para tratar do problema da variabilidade da qualidade de sinal, assim como das restrições de consumo de energia, da provisão de qualidade de serviço e justiça, e utilização eficiente do enlace sem fio, muitos mecanismos de escalonamento foram propostos [10, 11], tais como *Channel State Dependent Packet Scheduling* (CSDPS), *Idealized Wireless Fair Queuing* (IWFQ), *Channel-Condition-Independent Fair Queueing* (CIF-Q), *Server-Based Fairness Approach* (SBFA) e *Wireless Fair Service* (WFS). Entretanto, esses algoritmos são de propósito geral e nenhum deles é capaz de dar suporte aos requisitos de qualidade de serviço das cinco classes de serviço definidas no padrão IEEE 802.16-2005 [16].

Existem propostas de escalonadores *cross-layer downlink*, como por exemplo o trabalho de Triantafyllopoulou *et al* [8] com foco em tráfego multimídia, ou Mehrjoo *et al* [9] que tira vantagem da variação do desvanecimento (*fading*) para melhorar a vazão total da rede.

Com o objetivo de garantir os requisitos de latência para aplicações de tempo real, o mecanismo de escalonamento *downlink* proposto por Ho *et al* [4] utiliza um histórico de atrasos de pacotes. O trabalho une os mecanismos *Delay-Margin-based Scheduling* (DMS) e *User-Channel-based Scheduling* e então classifica os pacotes em quatro classes: extremamente urgente,

moderadamente urgente, não urgente e *best-effort*. O escalonador também dá maior prioridade à pacotes destinados a usuários com melhores condições instantâneas de canal para promover o uso mais eficiente do enlace sem fio, entretanto, a proposta não leva em consideração aplicações não sensíveis ao atraso e também não é direcionado à tecnologia IEEE 802.16.

Iera *et al* [28] propuseram um escalonador *downlink* baseado no mecanismo *Worst-Case Fair Weighted Fair Queueing* (WF<sup>2</sup>Q+) [29] para dar suporte as quatro classes de serviço definidas no padrão IEEE 802.16-2004. No esquema proposto, é utilizado um mecanismo de compensação de taxa, onde um pacote pode ser bloqueado se as condições de canal do usuário não forem satisfatórias e um contador de crédito é atualizado a cada vez que um fluxo não pode ser transmitido. O fluxo pode ser compensado posteriormente por esse déficit. A principal desvantagem do escalonador está em basear-se em uma abordagem de relógio virtual, que é conhecida por ser computacionalmente complexa.

Uma abordagem com controladores *fuzzy* para provisão de justiça e qualidade de serviço nas redes IEEE 802.16 com a camada física OFDMA é proposto por Chen *et al* [30], entretanto, o serviço *ertPS* e o requisito de taxa mínima para os fluxos do tipo *rtPS* não são considerados.

Lu e Ma [31] propõem um *framework* para um mecanismo de escalonamento *uplink cross-layer* de dois estágios que suporta qualidade de serviço. O escalonador inclui a garantia de latência e um mecanismo para evitar inanição. A prioridade no escalonamento é realizada por quatro índices chamados de *Dynamical Priority Index* (DPI), *Channel Specification Index* (CSI), *Normalized Delay Satisfaction Index* (NDSI) e *Normalized Predictive Starvation Index* (NPSI). O primeiro índice trata a prioridade entre as diferentes classes de serviço, o segundo, dá maior prioridade à estações clientes com maior qualidade de sinal. O terceiro, visa garantir os requisitos de banda e latência e o último índice evita que uma conexão entre num estado de inanição.

O algoritmo *Adaptive Credit-Based Fair Queuing* (ACFQ)[7], baseado no algoritmo *Credit-Based Fair Queuing* (CBFQ) usa um sistema de crédito. Sempre que um fluxo está em más condições de canal, um contador é incrementado. Quando um pacote é escalonado, o contador é decrementado. O algoritmo é baseado em dois escalonadores *downlink*, um escalonador de classe e um escalonador de fluxo. O escalonador de fluxo escolhe o pacote baseado no tamanho dos pacotes, na quantidade de crédito, na taxa de dados do fluxo e num certo peso para cada fluxo. O escalonador de classe escolhe qual classe será servida de maneira semelhante ao escalonador de fluxo. O requisito de latência pode ser garantido limitando a quantidade de crédito, mas o requisito de taxa mínima não é garantido.

Rath *et al* [32] apresentam um escalonador *uplink* justo baseado no mecanismo de controle de congestionamento do protocolo TCP e nas condições do canal, entretanto, não são considerados os serviços com aplicações de tempo real. O escalonador *cross-layer* proposto por Lai e Chen [33] trabalha em conjunto com um mecanismo que ajusta dinamicamente a proporção dos *subframes uplink* e *downlink*, de acordo com as necessidades da rede. A avaliação do mecanismo proposto é deficiente por não considerar aplicações realistas.

Belghith e Nuaymi[2] introduzem um escalonador *uplink* que tem como objetivo reduzir o tempo médio gasto pelo pacote desde a sua geração até a sua entrega no seu destino para os fluxos do tipo rtPS. O algoritmo de escalonamento realiza, primeiro, a alocação para os fluxos das classe UGS, rtPS e, por fim, para os fluxos BE. Para as conexões rtPS, o escalonador aloca os *grants* para transmissão priorizando os clientes com maiores valores de SIR (Signal-to-Interference Ratio), exceto para as conexões que estão recebendo um *grant unicast* para requisição de banda. Os resultados mostram que o algoritmo consegue reduzir o tempo médio de vida do pacote, mas o algoritmo não leva em consideração os parâmetros de QoS da conexão, como a latência máxima de um pacote relacionado ao fluxo de serviço rtPS.

O escalonador *uplink* proposto por Lai *et al* [3] tem como objetivo garantir os requisitos de QoS e aumentar o índice de justiça dos fluxos. A base do escalonamento é realizada pelo algoritmo *Earliest Deadline First* para conexões rtPS, *Weighted Fair Queueing* para conexões nrtPS e *First Come First Serve* para conexões BE, seguindo a prioridade na ordem rtPS, nrtPS e BE. Para fornecer justiça, o escalonador previne que os fluxos de alta prioridade utilizem os recursos além do mínimo solicitado. Os resultados mostram que o fluxo BE sempre é servido, entretanto, há um queda significativa na vazão quanto é utilizado o algoritmo proposto, em comparação com um algoritmo simples de prioridade.

Misra *et al* [34] introduzem um escalonador *uplink* baseado em aprendizagem de autômatos. Os três componentes principais que o escalonador leva em consideração são o próprio autômato, o meio sem fio e a estrutura de recompensa e penalidade. O algoritmo reduz o número de pacotes descartados e previne inanição dos pacotes. Entretanto, o escalonador não leva em consideração o requisito de taxa mínima das conexões.

Chen e Chlamtac [5] propõem um algoritmo *uplink* que visa balancear QoS, justiça e *multiuser diversity gain*. Trabalhando com quatro classes de serviços (UGS, rtPS, nrtPS e BE), inicialmente é feita a alocação para o tráfego UGS. Depois, é feita a garantia de latência para as conexões rtPS e taxa mínima para nrtPS. O restante dos recursos são compartilhados pelos tráfegos rtPS, nrtPS e BE utilizando um sistema de crédito relacionado à qualidade do canal. Os resultados mostraram que o algoritmo é melhor que o algoritmo *Round Robin*, mas levemente inferior ao algoritmo oportunista, quando se está avaliando a vazão.

Um mecanismo de escalonamento *uplink* em duas etapas é proposto por Ahmed e Hamma [35], no qual a primeira etapa distribui a banda disponível entre as diferentes classes de serviço, obedecendo os requisitos de QoS e garantindo justiça para as classes com baixa prioridade. A distribuição de banda entre as conexões da classe rtPS é calculada baseada na porcentagem já servida de cada conexão. Já para a distribuição entre as conexões nrtPS, primeiro é levado em consideração a taxa mínima de cada conexão, e o restante é distribuído de acordo com o *backlog*. O mecanismo de escalonamento leva em consideração as condições do canal apenas para o fluxo BE, sendo que a banda é distribuída priorizando as estações clientes com melhores condições de canal.

O escalonador *uplink* proposto por Teixeira e Guardieiro [36] tem foco na alocação de recursos para *polling*. Enquanto que o tratamento padrão para essas mensagens de sinalização normalmente é a alocação periódica, o mecanismo ajusta a periodicidade do *polling* com o objetivo de melhor aproveitar os recursos. O algoritmo de escalonamento funciona para quatro classes de serviços (UGS, rtPS, nrtPS e BE) e garante os requisitos de QoS. Para o requisito de latência das conexões rtPS, o mecanismo leva em consideração a periodicidade dinâmica do *polling*. Além disso, o cálculo do *deadline* também leva em conta a eficiência do perfil de modulação e codificação utilizada, em outras palavras, as condições do canal. O algoritmo não foi avaliado levando em consideração a mobilidade e constantes trocas de modulação que a adaptação de enlace possa realizar.

O escalonador proposto por Tian e Yuan [37] tem como objetivo satisfazer os requisitos de QoS e encontrar o melhor *tradeoff* entre vazão e justiça através de modelos matemáticos. O modelo considera as condições do meio. A validação desconsiderou as mensagens de sinalização especificadas no padrão IEEE 802.16. Outro trabalho que utiliza modelos matemáticos é proposto por Ali *et al* [38], no qual uma função de prioridade é utilizada levando em consideração a vazão média, a vazão requerida e os parâmetros de QoS.

Os escalonadores podem utilizar diferentes métricas para estimar as condições do canal. Há trabalhos [2, 28] em que a qualidade do canal é medida com valores de SNR, enquanto que em outros [3, 4, 5, 6, 7] a estimativa é feita de acordo com a taxa de transmissão instantânea.

Apesar de existir uma grande variedade de mecanismos de escalonamento *cross-layer*, eles não tratam todas as cinco classes de serviço especificadas no padrão IEEE 802.16 ou validam a eficiência utilizando as aplicações recomendadas para cada classe de serviço. O mecanismo de escalonamento proposto neste trabalho considera todas as cinco classes de serviço e é avaliado com cenários que simulam aplicações reais.

## **4.2 Escalonador uplink para provisão de QoS que considera a camada física**

O primeiro escalonador proposto nesse trabalho estende o mecanismo de escalonamento proposto por Borin e Fonseca [12] levando em consideração a variabilidade do enlace sem fio durante a decisão do escalonamento.

O escalonador proposto em [12] está totalmente de acordo com as especificações do padrão e garante os requisitos de escalonamento das cinco classes de serviço definidas no padrão IEEE 802.16-2005 num ambiente ideal, ou seja, sem perdas durante a transmissão no canal sem fio. O escalonador utiliza três filas: fila de prioridade baixa, prioridade intermediária e alta prioridade. O escalonador serve as filas de acordo com o seu nível de prioridade. A fila de baixa prioridade armazena os pedidos de banda dos fluxos BE. A fila de prioridade

intermediária armazena os pedidos de banda enviados pelas conexões rtPS e nrtPS. Esses pedidos podem migrar para a fila de alta prioridade para que o requisitos de qualidade de serviço sejam garantidos. Além dos pedidos migrados, a fila de alta prioridade também armazena os *grants* periódicos e *grants unicast* para pedido de banda que serão escalonados no próximo *frame*. A estação base executa o escalonador *uplink* a cada *frame* e transmite à todas as estações clientes a mensagem UL-MAP. Esse escalonador é referenciado como *Migration-Based Scheduler for QoS provisioning* (MBQoS).

Em cada *frame*, o escalonador MBQoS gera *grants* periódicos e adiciona-os dentro da fila de alta prioridade em intervalos pré-definidos. Dessa maneira, os *grants* UGS e ertPS para transmissão de dados e *grants unicast* para pedido de banda dos fluxos rtPS e nrtPS são providos como especifica o padrão. O requisito de latência máxima das conexões rtPS é garantido atribuindo-se valores de *deadline* aos pedidos de banda na fila de prioridade intermediária. Requisições com valores de *deadline* a expirar nos próximos dois *frames* e associados à conexões que ainda não receberam a taxa mínima numa janela de duração  $T$  são migrados para a fila de alta prioridade. O requisito de latência máxima é garantido aos fluxos que ainda não excederam a taxa mínima, assim como especifica o padrão. O requisito de taxa mínima das conexões rtPS e nrtPS é garantido numa janela de duração  $T$ . O escalonador calcula um valor de prioridade para cada requisição da fila de prioridade intermediária, considerando por conexão: taxa mínima, requisições em déficit e a taxa já recebida na janela atual. Requisições de conexões que já atingiram a taxa mínima recebem valores de prioridade baixa.

Um mecanismo de duplo balde furado (*leaky bucket*) é usado para o policiamento da rajada máxima e taxa máxima. A capacidade do primeiro balde (*bucket1*) é infinita e a taxa do *leaky* é igual à taxa máxima sustentada. O segundo balde (*bucket2*) tem capacidade igual à rajada máxima, portanto, antes de alocar um *grant*, o escalonador MBQoS verifica se o tamanho do *grant* é menor ou igual ao tamanho do *bucket2*.

Para utilizar os recursos da rede mais eficientemente em um ambiente suburbano, onde a qualidade do canal varia de acordo com a posição da estação cliente, o escalonador *uplink* proposto nessa seção utiliza uma abordagem *cross-layer* para estimar a qualidade do canal que a estação cliente está passando no momento. A qualidade do canal é dada pela relação sinal-ruído (SNR) estimada pela camada física. A qualidade do canal é considerada boa se o valor médio de SNR estiver acima de certo limitante. O valor médio do SNR é calculado através do método *Exponential Weighted Moving Average* (EWMA). O valor do limitante utilizado corresponde ao valor de SNR onde a probabilidade de perda atinge 50%.

Estações clientes com condições de canal ruim são impedidas de transmitir pelo mecanismo de bloqueio com o objetivo de reduzir a taxa de perda de pacotes e, conseqüentemente, evitar o desperdício de largura de banda. Para evitar que as conexões violem o requisito de latência máxima, os fluxos rtPS têm permissão para enviar os pacotes, mesmo se a estação estiver bloqueada. As conexões UGS e ertPS estão sujeitas ao bloqueio do escalonador.

---

**ALGORITMO Escalonamento**

---

1. insira, na fila de alta prioridade, os *grants* periódicos e os *grants* para requisições de banda *unicast* que devem ser escalonados no próximo *frame*;
  2. *CheckDeadline*;
  3. *CheckMinimumBandwidth*;
  4. *DistributeFreeResources*;
  5. escalonar as requisições da fila de alta prioridade começando do início da fila;
- 

O mecanismo de bloqueio pode impactar na justiça de banda provida às conexões, uma vez que as estações clientes podem ser bloqueadas por períodos de diferentes durações. Esse problema é resolvido utilizando um esquema de compensação. No escalonador MBQoS, o requisito de taxa mínima dos serviços rtPS e nrtPS é garantido atribuindo-se um valor de prioridade para cada conexão. Um dos parâmetros utilizados para derivar o valor de prioridade é o número de *bytes* requisitado pela estação cliente que ainda não foi atendido. Conexões desbloqueadas são servidas de acordo com os valores de prioridade. Dessa maneira, quando uma estação cliente é desbloqueada depois de um período de bloqueio, a conexão tem alta prioridade pois tem mais dados a serem servidos do que as outras estações que estavam transmitindo. Esse esquema provê a compensação esperada entre as conexões.

O algoritmo *Escalonamento* apresenta o esquema proposto. Depois de inserir os *grants* periódicos na fila de alta prioridade, o algoritmo verifica quais requisições rtPS e nrtPS devem migrar da fila de prioridade intermediária para a fila de alta prioridade (linhas 2 e 3). Na linha 4, o escalonador distribui a banda restante para as conexões BE. Na etapa final, todas as requisições da fila de alta prioridade são servidas.

No procedimento *CheckDeadline* o escalonador tenta migrar as requisições rtPS da fila de prioridade intermediária para a fila de alta prioridade utilizando o procedimento *MigrateBWRequest* para garantir o requisito de latência máxima. Embora a abordagem proposta seja baseada na ideia de atrasar as transmissões de clientes com baixa qualidade de canal, as requisições rtPS com *deadline* a expirar podem ser servidas mesmo se a média do valor de SNR da estação cliente correspondente é mais baixo que o limitante.

O procedimento *CheckMinimumBandwidth* verifica as condições de canal das estações clientes com fluxos rtPS e nrtPS e, marca aquelas com baixa condição de canal (linhas 12-15). Calcula-se posteriormente o valor de prioridade para cada uma das requisições da fila de prioridade intermediária (linha 24). Finalmente, o escalonador tenta migrar as requisições enviadas pelas estações cliente desbloqueadas para a fila de alta prioridade, utilizando o procedimento *MigrateBWRequest*.

O procedimento *DistributeFreeResources* distribui a banda disponível restante entre as requisições BE migrando as requisições de clientes que estão passando por boas condições de canal para a fila de alta prioridade. Caso haja banda remanescente, ela é distribuída entre as estações clientes com conexões TCP com objetivo de reduzir o impacto do mecanismo de

---

**PROCEDIMENTOS - ESCALONAMENTO**

---

*CheckDeadline:*

1. **Para** cada requisição  $i$  da fila de prioridade intermediária **faça**
2.   **se** availableBw = 0 **então**
3.     parar
4.   **se** service[CID] = rtPS **então**
5.     frame[i] =  $\lfloor (\text{deadline}[i] - \text{currentTime}) \div \text{frameDuration} \rfloor$ ;
6.   **se** frame[i] = 3 and TwndTR[CID] < minTR[CID] **então**
7.     MigrateBWRequest(i)

*CheckMinimumBandwidth:*

8. **Para** cada conexão do tipo rtPS ou nrtPS **faça**
9.   backlogged\_tmp[CID] = backlogged[CID]
10. TwndTR\_tmp[CID] = TwndTR[CID]
11. bucket2\_tmp[CID] = bucket2[CID]
12. **se** not haveGoodQuality(CID) **então**
13.   isBlocked[CID] = true
14. **senão**
15.   isBlocked[CID] = false
16. **para** cada requisição  $i$  da fila de prioridade intermediária **faça**
17.   **se** minTR[CID]  $\leq$  TwndTR\_tmp[CID] or bucket2\_tmp[CID] = 0 **então**
18.     priority[i] = 0
19.   **senão**
20.     priority[i] = backlogged\_tmp[CID] - (TwndTR\_tmp[CID] - minTR[CID]);
21.     TwndTR\_tmp[CID] = TwndTR\_tmp[CID] + BR[i]
22.     bucket2\_tmp[CID] = bucket2\_tmp[CID] - BR[i]
23.     backlogged\_tmp[CID] = backlogged\_tmp[CID] - BR[i]
24. ordene a fila de prioridade intermediária
25. **para** cada requisição  $i$  da fila de prioridade intermediária **faça**
26.   **se** availableBw = 0 **então**
27.     break
28.   **se** isBlocked[CID] = false **então**
29.     MigrateBWRequest(i)

*DistributeFreeResources:*

30. **para** cada conexão do tipo BE **faça**
31.   **se** not haveGoodQuality(CID) **então**
32.     isBlocked[CID] = true
33.   **senão**
34.     isBlocked[CID] = false
35. **para** cada requisição  $i$  da fila de baixa prioridade **faça**
36.   **se** availableBw = 0 **então**
37.     break
38.   **se** isBlocked[CID] = false **então**
39.     MigrateBWRequest(i)
40. **para** cada requisição  $i$  da fila de prioridade intermediária e da fila de baixa prioridade **faça**
41.   **se** availableBw = 0 **então**
42.     break
43.   **se** isBlocked[CID] = true **and** protocol = TCP **então**
44.     MigrateBWRequest(i)

*MigrateBWRequest(i):*

45. **se** BR[i] > availableBw **então**
  46.   grantSize = availableBw
  47. **senão**
  48.   grantSize = BR[i]
  49. **se** grantSize > bucket2[CID] **então**
  50.   grantSize = bucket2[CID]
  51. **se** 0 < grantSize < BR[i] **então**
  52.   crie uma nova requisição  $j$  para conexão CID com  
BR[j] = BR[i] - grantSize
  53.   insira requisição  $j$  no fim da fila de prioridade intermediária
  54. BR[i] = grantSize
  55. mova requisição  $i$  para fila de alta prioridade
  56. TwndTR[CID] = TwndTR[CID] + grantSize
  57. bucket2[CID] = bucket2[CID] - grantSize
  58. backlogged[CID] = backlogged[CID] - grantSize
  59. availableBw = availableBw - grantSize
-

Perfil de Modulação e Codificação	Eficiência (bits/símbolo)	Limiar (dB)
BPSK 1/2	0.5	1.0
QPSK 1/2	1.0	5.9
QPSK 3/4	1.5	12.2
16QAM 1/2	2.0	17.6
16QAM 3/4	3.0	21.8
64QAM 2/3	4.0	51.7
64QAM 3/4	4.5	68.2

**Tabela 4.1:** Perfis OFDM

controle de congestionamento na taxa de transmissão.

### 4.3 Escalonador uplink para provisão de QoS que considera as modulações

Para melhorar o desempenho espectral do sistema e conseguir altas taxas de transmissões, a camada física OFDM do padrão IEEE 802.16 suporta sete perfis de modulação e codificação para adaptar e ajustar os parâmetros baseado na qualidade do enlace. Técnicas de adaptação de enlace, também referenciadas como *Adaptive Modulation and Coding* (AMC), podem melhorar o desempenho da taxa de erro de bit (BER) em um canal sem fio, quando a estação estiver em uma área de sombra (*shadowing*) ou a grandes distâncias do transmissor.

A adaptação de enlace faz com que a rede IEEE 802.16 otimize a vazão baseada nas condições de propagação do sinal. Ao utilizar o AMC, a estação base pode escolher modulações mais eficientes quando as condições de canal estiverem boas. Como o SNR é muito alto perto da estação base, um esquema de modulação e codificação mais alta é utilizado nessa área para aumentar a vazão. O padrão não define o mecanismo de adaptação de enlace a ser utilizado. Por simplicidade, o escalonador proposto nesta seção utiliza uma técnica comum de adaptação de enlace, que é encontrar o melhor esquema de modulação e codificação baseado no valor médio de SNR que a camada física vem medindo nos últimos instantes. Quando o valor médio do SNR alcança um certo limitante, o perfil de modulação e codificação é alterado. O esquemas de modulação e codificação, assim como a eficiência apresentada pelo padrão, e os valores de troca de modulação então descritos na Tabela 4.1. Através da medição da perda de pacotes em simulações quando as estações clientes são posicionadas em diferentes distâncias da estação base, o limiar foi calculado extraindo um valor médio no momento em que se inicia a perda de pacotes.

O algoritmo *Escalonamento AMC* descreve os passos do mecanismo proposto. Primeiro, os

---

**ALGORITMO Escalonamento AMC**

---

1. insira, na fila de alta prioridade, os *grants* periódicos e os *grants* para requisições de banda *unicast* que devem ser escalonados no próximo *frame*;
  2. *CheckDeadline*;
  3. *CheckMinimumBandwidth*;
  4. *DistributeFreeResources*;
  5. escalonar as requisições da fila de alta prioridade começando do início da fila;
- 

*grants* periódicos são enfileirados na fila de alta prioridade. Depois, as requisições dos fluxos nrtPS e rtPS são servidos de acordo com suas prioridades e então a classe BE é servida.

No procedimento *CheckDeadline*, as requisições com deadline a expirar dois *frames* adiantes são migrados para a fila de maior prioridade. O procedimento migra as requisições rtPS e nrtPS da fila de prioridade intermediária. Para o cálculo da prioridade, são levados em consideração o déficit para atingir a taxa mínima e a eficiência da modulação da estação cliente que está ajustada no momento. Dessa forma, as conexões com alta qualidade de canal e com maior déficit ganham valores de prioridade maior.

O procedimento *DistributeFreeResources* distribui a banda para as conexões BE no modo *First-Come First-Served* (FCFS), o que evita a inanição de banda no caso de uma estação cliente ficar com baixa qualidade de sinal por um período muito longo.

## 4.4 Avaliação das políticas de escalonamento

### 4.4.1 Escalonador uplink para provisão de QoS que considera a camada física

#### Cenários de simulação

A rede simulada utiliza uma topologia ponto-multiponto com uma estação base centralizada e as estações clientes distribuídas ao redor dela. A distância inicial entre as estações clientes e a estação base varia de 1600 metros a 1800 metros. É nessa faixa de alcance onde o sinal começa a se deteriorar para o esquema de modulação e codificação utilizada. A variação do sinal é dada pela movimentação aleatória dentro dessa faixa de alcance.

A camada física utiliza a tecnologia OFDM com o esquema de modulação e codificação QPSK 1/2 para as transmissões dos pacotes de dados e o esquema de modulação e codificação BPSK 1/2 para as transmissões dos pacotes de sinalização. A distância entre as estações clientes e a estação base garante que os pacotes de gerenciamento não serão perdidos (ou seja, a conexão nunca é interrompida). A duração do *frame* é de 5 ms com a proporção *downlink/uplink* de 1:1.

Para eliminar o impacto do escalonamento de pacotes da estação cliente no mecanismo proposto, cada estação cliente tem apenas um fluxo de serviço *uplink*.

---

 PROCEDIMENTOS - ESCALONAMENTO AMC
 

---

*CheckDeadline:*

1. **para** cada requisição  $i$  da fila de prioridade intermediária **faça**
2.   **se** availableBw = 0 **então**
3.     break
4.   **se** service[CID] = rtPS **então**
5.     frame[i] =  $\lfloor (\text{deadline}[i] - \text{currentTime}) \div \text{frameDuration} \rfloor$ ;
6.   **se** frame[i] = 3 and TwndTR[CID] < minTR[CID] **então**
7.     MigrateBWRequest(i)

*CheckMinimumBandwidth:*

8. **para** cada conexão **faça**
9.   efficiency[CID] = obtenha a eficiência física da conexão CID
10. **para** cada conexão do tipo rtPS ou nrtPS **faça**
11.   backlogged\_tmp[CID] = backlogged[CID]
12.   TwndTR\_tmp[CID] = TwndTR[CID]
13.   bucket2\_tmp[CID] = bucket2[CID]
14. **para** cada requisição  $i$  da fila de prioridade intermediária **faça**
15.   **se** minTR[CID] ≤ TwndTR\_tmp[CID] **ou** bucket2\_tmp[CID] = 0 **então**
16.     priority[i] = 0
17.   **senão**
18.     priority[i] =  $(\text{backlogged\_tmp}[CID] - (\text{TwndTR\_tmp}[CID] - \text{minTR}[CID])) * \text{efficiency}[CID]$ ;
19.     TwndTR\_tmp[CID] = TwndTR\_tmp[CID] + BR[i]
20.     bucket2\_tmp[CID] = bucket2\_tmp[CID] - BR[i]
21.     backlogged\_tmp[CID] = backlogged\_tmp[CID] - BR[i]
22.   ordene a fila de prioridade intermediária
23. **para** cada requisição  $i$  da fila de prioridade intermediária **faça**
24.   **se** availableBw = 0 **então**
25.     break
26.   MigrateBWRequest(i)

*DistributeFreeResources:*

27. **para** cada requisição  $i$  da fila de baixa prioridade **faça**
28.   **se** availableBw = 0 **então**
29.     break

*MigrateBWRequest(i):*

30. **se** BR[i] > availableBw **então**
  31.   grantSize = availableBw
  32. **senão**
  33.   grantSize = BR[i]
  34. **se** grantSize > bucket2[CID] **então**
  35.   grantSize = bucket2[CID]
  36. **se** 0 < grantSize < BR[i] **então**
  37.   crie uma nova requisição  $j$  para a conexão CID com  
BR[j] = BR[i] - grantSize
  38.   insira requisição  $j$  na fim da fila de prioridade intermediária
  39. BR[i] = grantSize
  40. mova a requisição  $i$  para a fila de alta prioridade
  41. TwndTR[CID] = TwndTR[CID] + grantSize
  42. bucket2[CID] = bucket2[CID] - grantSize
  43. backlogged[CID] = backlogged[CID] - grantSize
  44. availableBw = availableBw - grantSize
-

O primeiro cenário simulado inclui três fluxos rtPS, três fluxos nrtPS e três fluxos BE. Os pacotes são gerados com tamanho de 540 bytes por fontes CBR. No segundo cenário, diferentes tipos de tráfegos são considerados: voz, voz com supressão de silêncio e vídeo, que são associados com os serviços UGS, ertPS e rtPS, respectivamente, e o tráfego FTP para os serviços nrtPS e BE.

O modelo de voz utilizado é um modelo “on/off” com duração média dos períodos de “on” e de “off” iguais a 1,2 s e 1,8 s, respectivamente. Durante o período de “on”, pacotes de 66 bytes são gerados a cada 20 ms [39]. O modelo de voz com supressão de silêncio utiliza o *Enhanced Variable Rate Codec* (EVRC) [40], com pacotes gerados a cada 20 ms empregando as taxas: Rate 1 (171 bits/packet), Rate 1/2 (80 bits/packet), Rate 1/4 (40 bits/packet) e Rate 1/8 (16 bits/packet). O tráfego de vídeo é gerado por *traces* de vídeo MPEG-4 [41] codificados num nível de qualidade baixo, com duração de 20 minutos e taxa de 200 Kbps. O tráfego FTP é gerado com uma fonte on-off com tempo infinito no estado “on”, taxa de transmissão de 1000 Kbps e pacotes de tamanho 512 bytes.

O intervalo dos *grants* periódicos para os serviços UGS e ertPS é de 20 ms e o intervalo dos *grants* para *polling unicast* é de 20 ms para o serviço rtPS e 1 s para o serviço nrtPS.

O requisito de latência máxima do serviço rtPS é de 400 ms e cada conexão tem seus próprios requisitos de taxa mínima e taxa máxima, que varia de acordo com o taxa do vídeo. O serviço nrtPS tem a taxa mínima de 800 Kbps e taxa máxima de 1500 Kbps. O serviço BE não tem nenhum requisito de QoS.

O modelo de propagação *COST 231 Hata* [23] é utilizado para o canal realista e o modelo *Free-space* é utilizado para simular um canal ideal.

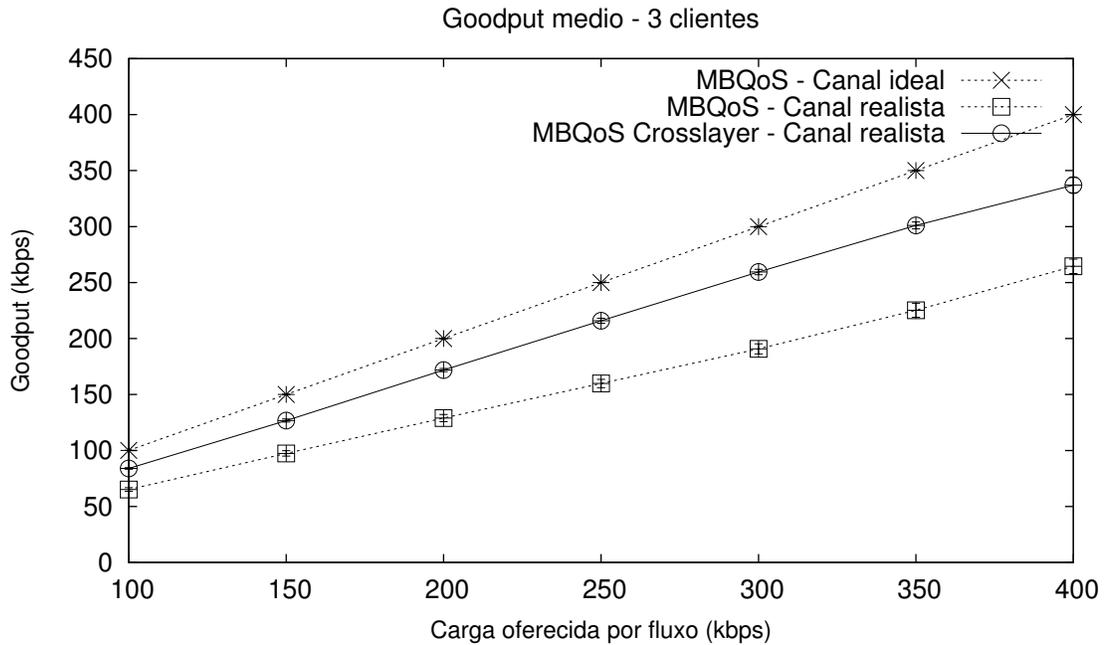
Cada resultado foi produzido simulando o cenário descrito com cinco sementes diferentes. Os valores médios e o intervalo com 95% de confiança são apresentados nos gráficos.

### **Avaliação dos resultados**

A seguir, são apresentados os resultados das simulações para os dois cenários descritos. Espera-se que o escalonador proposto melhore a utilização do canal, evitando a perda de pacotes e, ainda, seja capaz de prover qualidade de serviço. Os fluxos UGS e ertPS recebem *grants* periódicos e, por isso, não têm sua qualidade melhorada pelo escalonador.

**Cenário 1** No primeiro cenário, há nove estações clientes, sendo três de cada classe: rtPS, nrtPS e BE. A taxa de transmissão varia de 100 Kbps a 400 Kbps. Para evitar o impacto da janela de congestionamento do TCP na avaliação do escalonador, foi utilizado o protocolo UDP.

As Figuras 4.1 e 4.2 mostram o *goodput* médio para as classes nrtPS e BE, respectivamente. As Figuras comparam o *goodput* dado pelo escalonador *cross-layer* MBQoS com o *goodput* dado pelo escalonador MBQoS operando num canal ideal e num canal realista. A diferença do

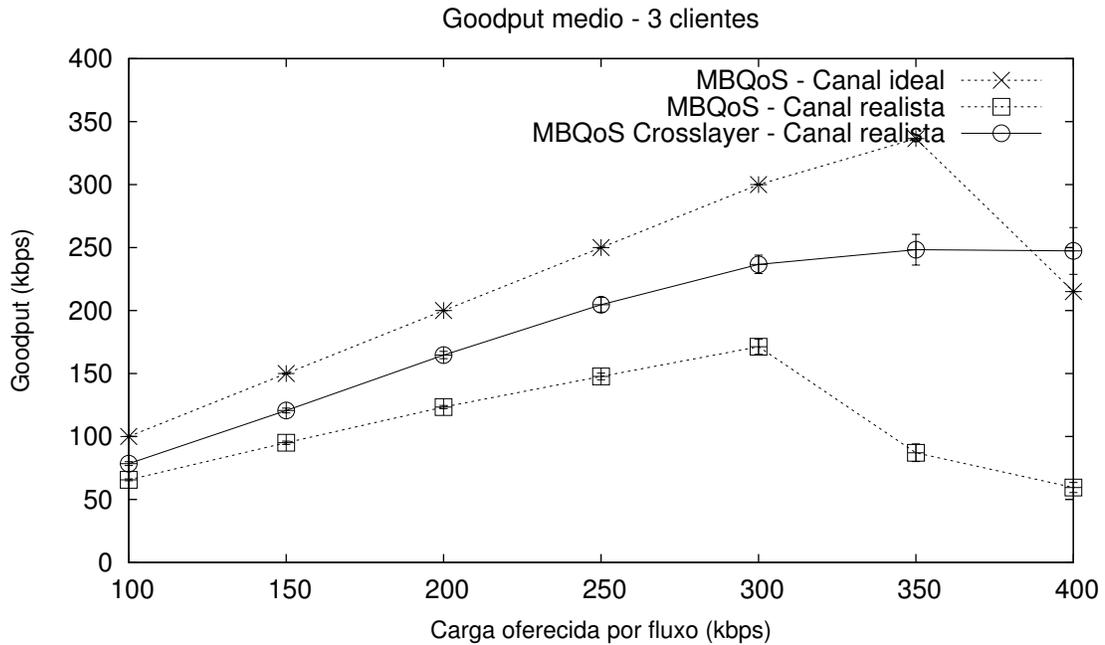


**Figura 4.1:** Goodput médio para o fluxo de serviço nrtPS

*goodput* dado pelo mecanismo MBQoS *cross-layer* e pelo mecanismo MBQoS operando no canal realista mostra o benefício de se adotar a abordagem *cross-layer*. Tal diferença chega a ser de até 25%. Além disso, a diferença entre o *goodput* dado pelo escalonador *cross-layer* e o *goodput* dado pelo escalonador MBQoS operando em um canal ideal, pode ser interpretada como a transmissão que provavelmente seria perdida devido à má qualidade do sinal do receptor. A diferença entre esses valores de *goodput* mostra que o escalonador *cross-layer* é capaz de produzir um *goodput* que se aproxima do *goodput* ideal. A Figura 4.2 mostra que o escalonador *cross-layer* melhora o *goodput* da classe BE que tira vantagem da banda não utilizada por classes com requisitos de atraso.

**Cenário 2** No segundo cenário, o número de estações clientes aumenta de 5 a 25 em passos de 5 unidades (um para cada tipo de serviço). Esse experimento tem como objetivo verificar o impacto da janela de congestionamento do TCP nos resultados do *goodput* das classes nrtPS e BE, assim como verificar se o escalonador proposto é capaz de garantir os requisitos de latência máxima das conexões rtPS.

As Figuras 4.3 e 4.4 mostram o *goodput* médio para as classes nrtPS e BE, respectivamente. As figuras comparam o *goodput* dado pelo escalonador *cross-layer* com o escalonador MBQoS operando num canal realista. Em ambos os mecanismos, é possível notar uma queda no desempenho da vazão. Isso é devido ao impacto do mecanismo de controle de congestionamento



**Figura 4.2:** Goodput médio para o fluxo de serviço BE

do TCP. Uma vez que os *timeouts* do protocolo TCP indicam que os pacotes estão sendo descartados devido a um congestionamento na rede, usuários bloqueados têm suas taxas de transmissões reduzidas pelo mecanismo de controle de congestionamento. Para o escalonador MBQoS, o baixo desempenho era esperado, já que são permitidas transmissões de usuários com baixas condições de canal, resultando em alta taxa de perda de pacotes.

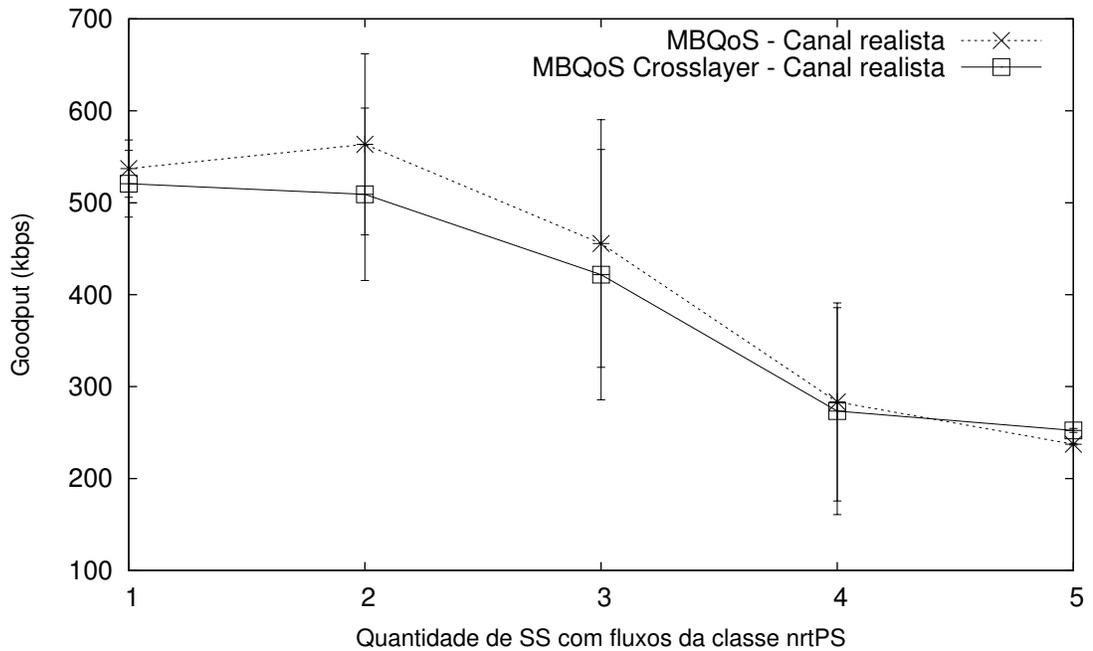
A Figura 4.5 mostra que o escalonador proposto é capaz de garantir o requisito de latência máxima para as conexões rtPS.

#### 4.4.2 Escalonador *uplink* para provisão de QoS que considera as modulações

##### Cenário de simulação

A rede simulada utiliza a topologia ponto-multiponto com uma estação base centralizada e as estações clientes distribuídas dentro de um círculo de raio de 1600 metros.

A camada física OFDM utiliza os sete esquemas de modulação e codificação apresentados na Tabela 4.1. As mensagens de sinalização utilizam o perfil BPSK 1/2. A distância entre as estações clientes e a estação base garante que os pacotes de gerenciamento nunca sejam perdidos. A duração do frame é de 5 ms, com a proporção 1:1 na divisão dos *subframes uplink* e *downlink*. Para eliminar o impacto do escalonamento dos pacotes da estação cliente, cada estação cliente



**Figura 4.3:** Goodput médio para o fluxo de serviço nrtPS

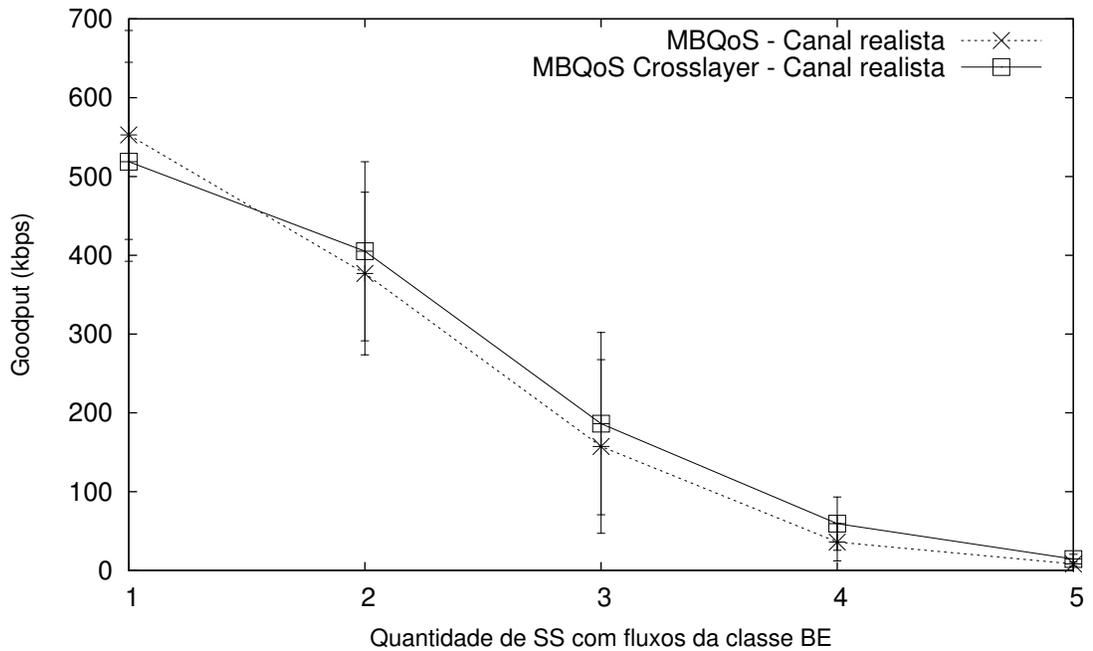
tem apenas um fluxo *uplink*.

No cenário simulado, foram considerados quatro tipos de tráfegos: FTP para os serviços BE e nrtPS. Voz e voz com supressão de silêncio são associados aos serviços UGS e ertPS, respectivamente, e tráfego de vídeo ao serviço rtPS.

O modelo de voz utilizado é um modelo “on/off” com duração média dos períodos de “on” e de “off” iguais a 1,2 s e 1,8 s, respectivamente. Durante o período de “on”, pacotes de 66 bytes são gerados a cada 20 ms[39]. O modelo de voz com supressão de silêncio utiliza o *Enhanced Variable Rate Codec* (EVRC) [40], com pacotes gerados a cada 20 ms empregando as taxas: Rate 1 (171 bits/packet), Rate 1/2 (80 bits/packet), Rate 1/4 (40 bits/packet) e Rate 1/8 (16 bits/packet). O tráfego de vídeo é gerado por *traces* de vídeo MPEG-4 [41] codificados num nível de qualidade baixo, com duração de 60 minutos e taxas que variam de 35 Kbps a 188 Kbps. O tráfego FTP é gerado com uma fonte on-off com tempo infinito no estado “on”, taxa de transmissão de 500 Kbps e pacotes de tamanho 512 bytes.

O intervalo dos *grants* periódicos para os serviços UGS e ertPS é de 20 ms e o intervalo dos *grants* para *polling unicast* é de 100 ms para o serviço rtPS e 1 s para o serviço nrtPS.

O requisito de latência máxima do serviço rtPS é de 400 ms e cada conexão tem seus próprios requisitos de taxa mínima e taxa máxima, que variam de acordo com o taxa do vídeo. O serviço nrtPS tem a taxa mínima de 250 Kbps, e taxa máxima de 750 Kbps. O serviço BE não tem nenhum requisito de QoS.



**Figura 4.4:** Goodput médio para o fluxo de serviço BE

O modelo de propagação *COST 231 Hata* [23] é utilizado para o canal realista e o modelo *Free-space* é utilizado para simular um canal ideal.

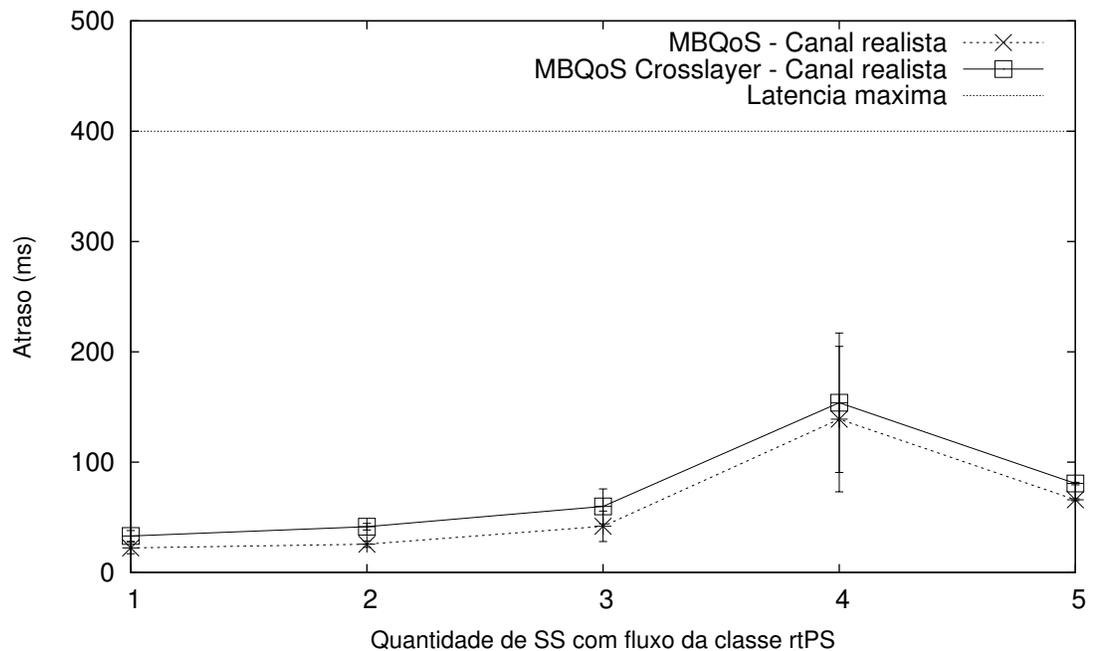
Cada simulação teve a duração de 3600 segundos e cada resultado foi produzido a partir de dez rodadas executadas com sementes diferentes. Os valores médios e os intervalos com 95% de confiança são apresentados nos gráficos.

### Avaliação dos resultados

O escalonador proposto dá maior prioridade a estações clientes com modulações mais eficientes, uma vez que elas ocupam o canal por um período menor do que aquelas com modulação mais robusta.

No cenário simulado, o número de estações clientes aumenta de 5 a 75 em passos de 5 unidades (um de cada tipo de serviço). Os experimentos tem como objetivo mostrar os benefícios de utilizar uma abordagem *cross-layer*, e também, verificar se o escalonador proposto consegue garantir os requisitos de qualidade de serviço.

A Figuras 4.6, 4.7 e 4.8 mostram o *goodput* médio para as classes nrtPS, rtPS e BE, respectivamente. Em baixas cargas da rede, o escalonador oportunista proposto e o escalonador MBQoS produzem um valor de *goodput* próximos para as conexões nrtPS, uma vez que todas as requisições são atendidas. Sob altas cargas, o tamanho da fila de prioridade intermediária aumenta e o escalonador consegue servir apenas as requisições de maior prioridade. Quando é



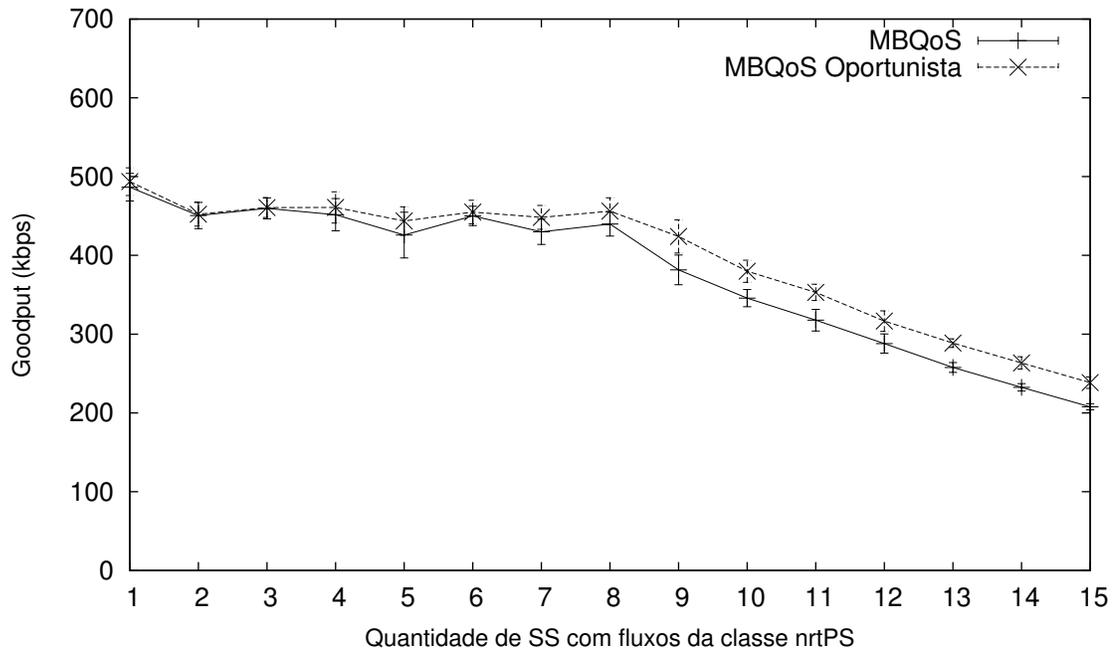
**Figura 4.5:** Atraso médio para os serviço rtPS

considerada não apenas a demanda de banda, mas também a qualidade do canal das conexões quando os valores de prioridades são atribuídos, o escalonador oportunista *cross-layer* proposto é capaz de reduzir o desperdício de banda a cada *frame*, e então, produz melhores valores de *goodput* para as conexões nrtPS do que o escalonador MBQoS. Quando a rede se sobrecarrega e o número de conexões nrtPS chega a 15, o escalonador MBQoS não é capaz de prover a taxa mínima de 250 Kbps.

Uma vez que para aplicações de tempo real os pacotes que ultrapassam o atraso estipulado são inúteis, o escalonador *cross-layer* oportunista sempre migra as requisições rtPS que tem o *deadline* se aproximando, independente das condições de canal da estação cliente correspondente, portanto, as conexões tem resultados de *goodput* similares para ambos os escalonadores avaliados, como pode ser visto na Figura 4.7.

O serviço BE não tem requisito de qualidade de serviço, o que explica a queda no *goodput* das conexões associadas a esse tipo de serviço, como mostra a Figura 4.8. Não há muita diferença entre os dois escalonadores, o que indica que o escalonador oportunista não penaliza as conexões BE mais que o escalonador não-oportunista.

A Figura 4.9 mostra que ambos os escalonadores foram capazes de prover o requisito de latência máxima de 400 ms para as conexões rtPS. Como mencionado anteriormente, o escalonador oportunista serve as requisições rtPS que tem o *deadline* próximo a se esgotar mesmo se a qualidade de canal da estação cliente não for boa, consequentemente, a latência



**Figura 4.6:** Goodput médio para os serviços nrtPS

média é similar para ambos os escalonadores.

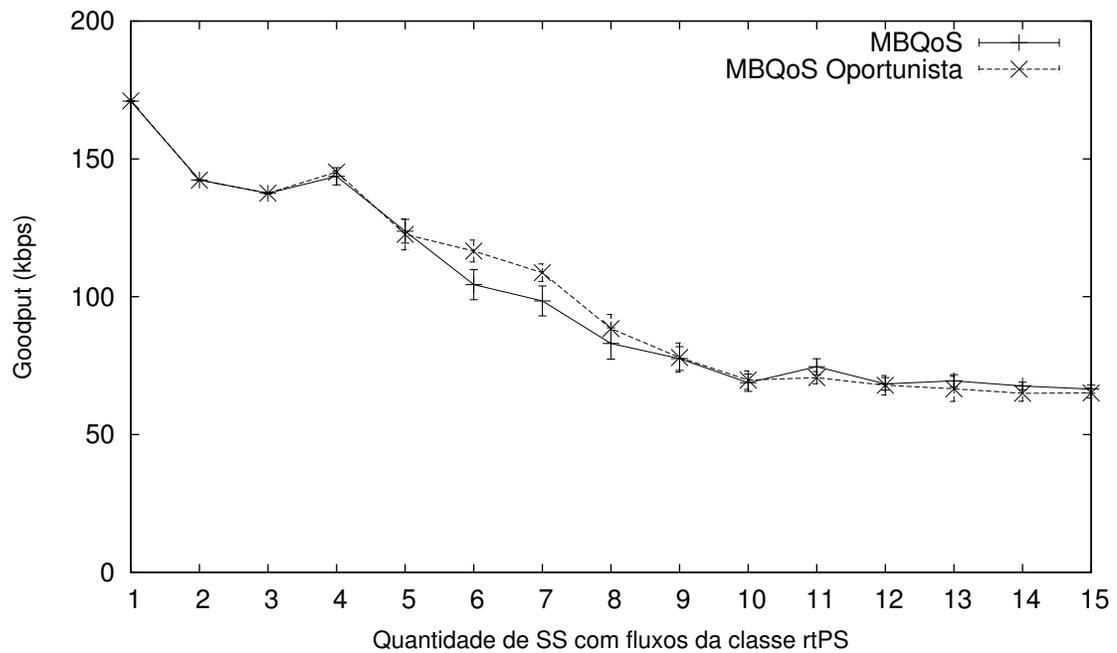
Os valores de *goodput* das conexões UGS e ertPS não foram afetadas pelo aumento do número de estações clientes na rede, como pode ser visto na Figura 4.10, o que mostra que o escalonador *uplink* proposto provê *grants* periódicos, assim como requer o padrão IEEE 802.16. Uma vez que os *grants* periódicos são alocados independentemente das condições de canal, o escalonador oportunista não melhora os resultados obtidos como o escalonador MBQoS.

A Figura 4.11 mostra o *goodput* total da rede e evidencia que a abordagem *cross-layer* oportunista provê uma utilização 10% mais alta do que o escalonador MBQoS. Em outras palavras, com a mesma quantidade de símbolos da camada física, o escalonador proposto é capaz de melhorar o *goodput* no canal *uplink* da rede, o que decorre de se atribuir altos valores de prioridade a estações clientes que estão passando por um perfil de modulação e codificação mais eficiente.

## 4.5 Considerações Finais

Este capítulo discutiu o escalonamento em redes baseadas no padrão IEEE 802.16, descrevendo o estado da arte do escalonamento *cross-layer* que utiliza informações de qualidade do canal sem fio e propõe dois mecanismos de escalonamento *cross-layer*.

Os mecanismos propostos estendem o escalonador baseado em migração de filas proposto por



**Figura 4.7:** Goodput médio para os serviços rtPS

Borin e Fonseca [12] e estão totalmente de acordo com as especificações do padrão IEEE 802.16. O primeiro mecanismo proposto utiliza as informações do canal através de uma abordagem *cross-layer* para realizar o escalonamento. Através das simulações, o mecanismo conseguiu obter uma melhor taxa de vazão para os tráfegos nrtPS e BE em relação a um mecanismo que não utiliza a abordagem *cross-layer*. Além disso, os requisitos de QoS de todas as classes são respeitados.

O segundo mecanismo proposto considera os sete esquemas de modulação e codificação definidos no padrão IEEE 802.16. O escalonador proposto utiliza uma estratégia gulosa para atribuir altos valores de prioridades para as estações clientes que estão passando pelos esquemas de modulação e codificação mais eficientes. Os resultados das simulações mostraram que o mecanismo aumenta a utilização da rede para os fluxos com classe de serviço rtPS e nrtPS, enquanto que para os serviços UGS, ertPS e BE não há ganhos quando comparado a um mecanismo simples. Nesta comparação, ambos os mecanismos apresentam praticamente os mesmos valores de vazão.

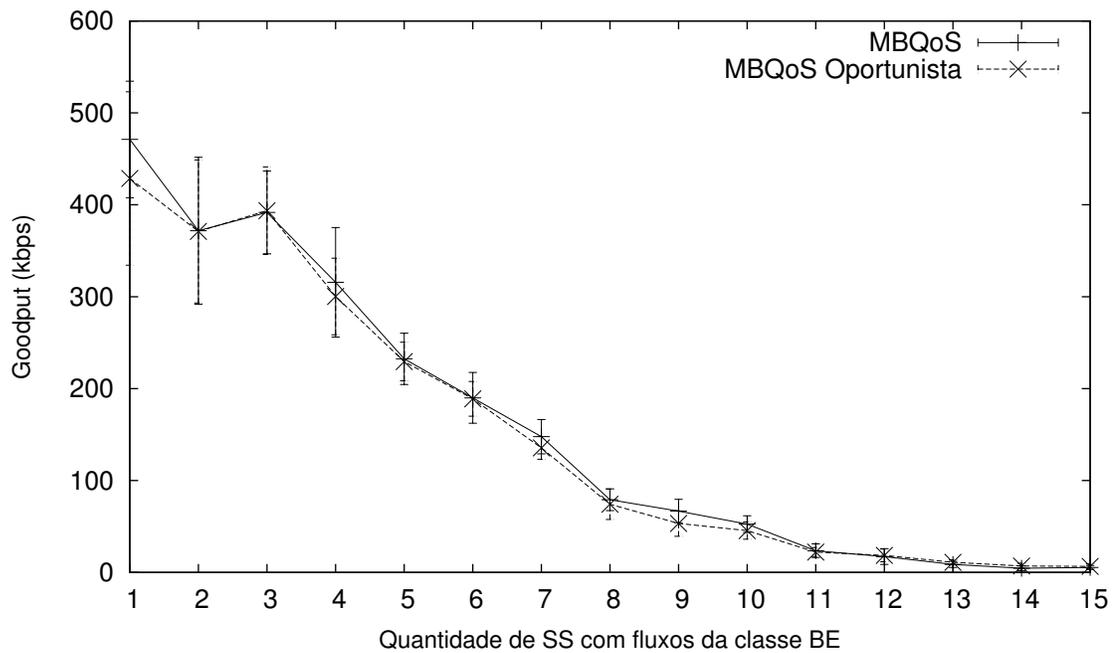


Figura 4.8: Goodput médio para os serviços BE

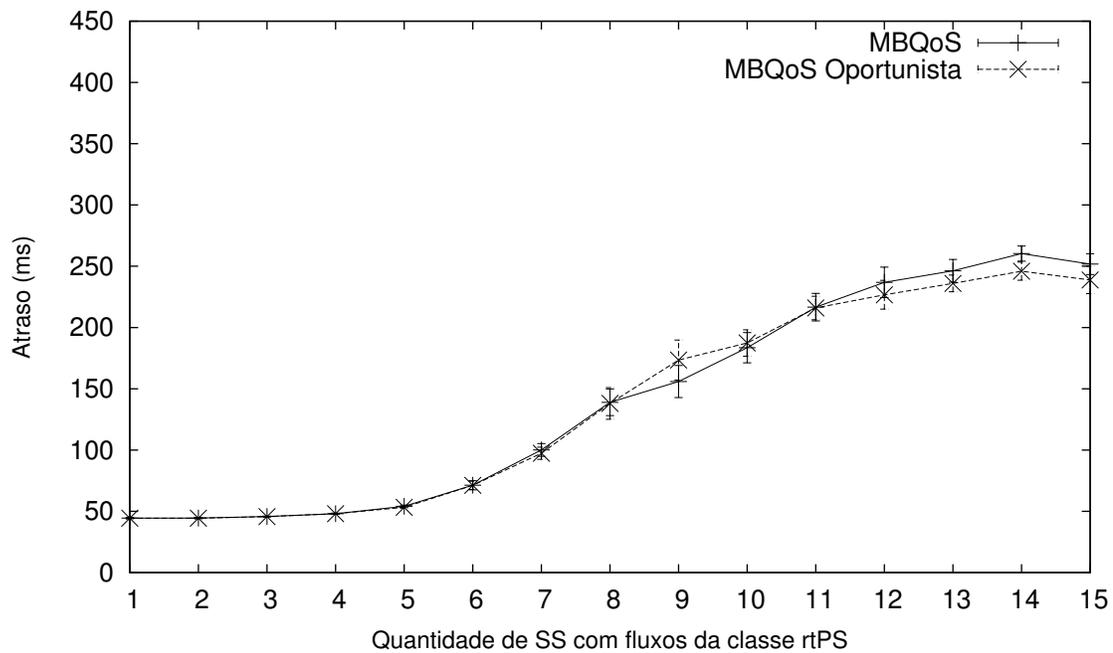
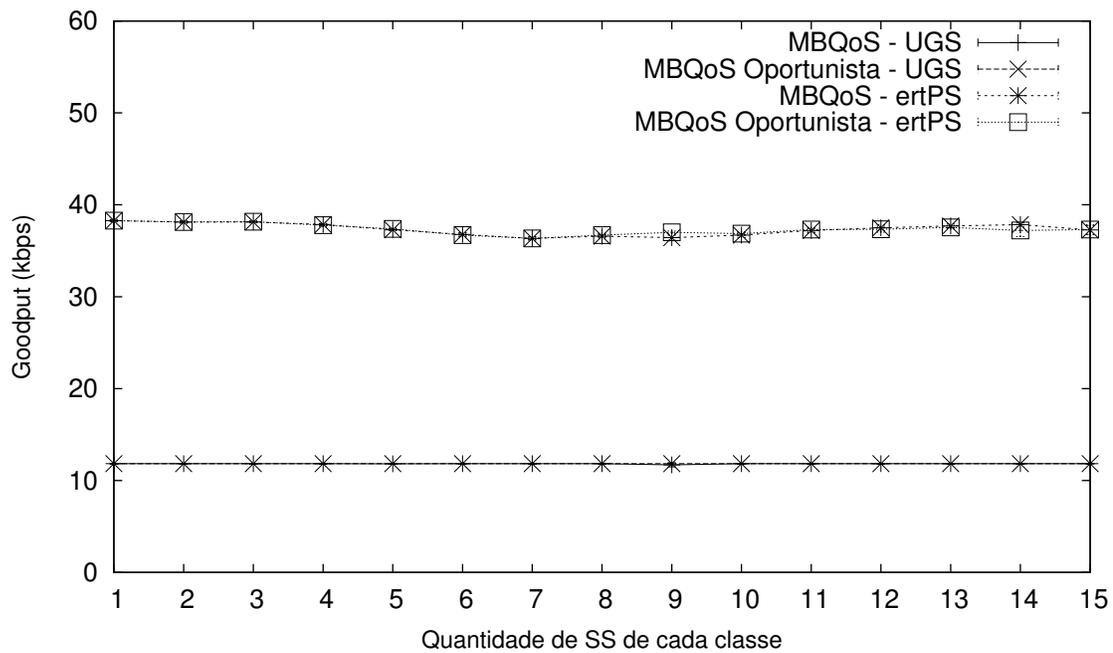
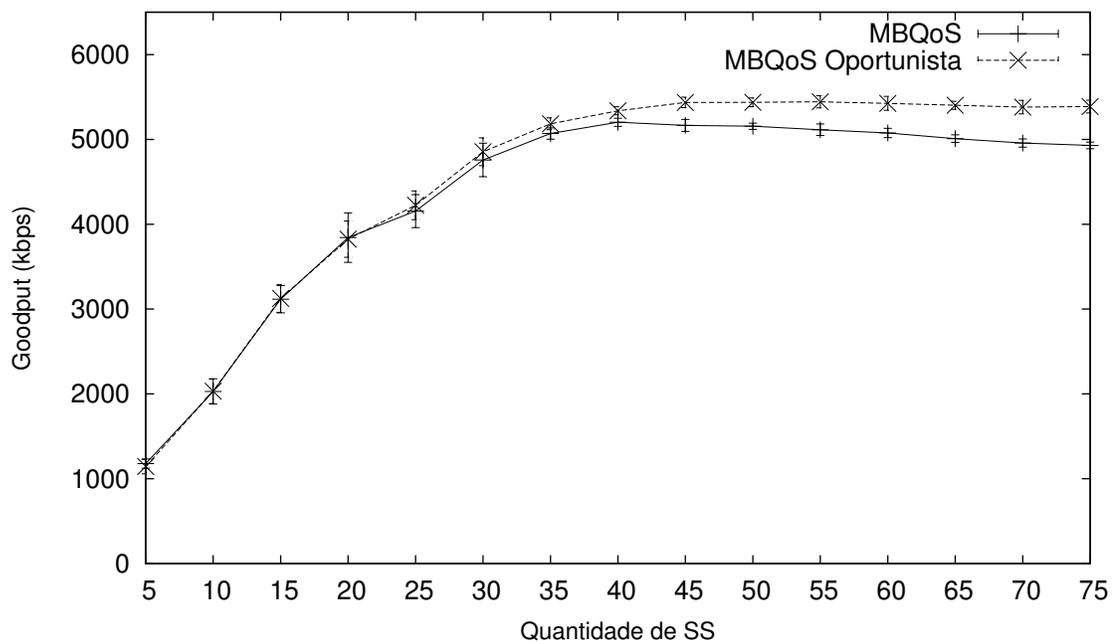


Figura 4.9: Atraso médio para os fluxos rtPS



**Figura 4.10:** Goodput médio para os serviços UGS e ertPS



**Figura 4.11:** Agregação do goodput médio de todos os fluxos

# Capítulo 5

## Controle de admissão em redes IEEE 802.16

Um componente importante do *framework* para provisão de qualidade de serviço para redes IEEE 802.16 é o controle de admissão, que é responsável por evitar a sobrecarga na rede rejeitando a admissão de novas conexões. Antes de estabelecer uma conexão, a estação cliente envia para a estação base uma requisição (DSA-REQ) com os parâmetros de qualidade de serviço para que o mecanismo de controle de admissão possa decidir se admite ou não a nova conexão.

O padrão IEEE 802.16 não especifica um mecanismo de controle de admissão, deixando o problema em aberto para oportunidades de pesquisa pela indústria e pela academia. A Seção 5.1 traz alguns trabalhos relacionados existentes na literatura. A Seção 5.2 propõe um mecanismo de controle de admissão para redes IEEE 802.16 e a Seção 5.3 apresenta a avaliação do desempenho do mecanismo proposto a partir de resultados obtidos através de experimentos de simulação.

### 5.1 Estado da arte da pesquisa em controle de admissão

Jianfeng *et al* [42] propõem um algoritmo de controle de admissão simples que se baseia no requisito de taxa mínima para aceitar uma nova conexão na rede WiMAX. O algoritmo soma a taxa mínima requisitada pelos clientes já admitidos e compara com a capacidade total da rede. Entretanto, o trabalho não considera a variação da capacidade da rede dada pela troca de modulação.

Preocupado em atender as especificações do padrão, o trabalho proposto por Chandra e Sahoo[43], além de levar em consideração a banda mínima requisitada pelos clientes, também contabiliza a banda utilizada pelo mecanismo de pedido de banda.

Um controle de admissão baseado na teoria dos jogos é proposto por Niyato e Hossain[44]. A partir do tipo de conexão, dos parâmetros do tráfego e dos requisitos de qualidade de serviço é definido um conjunto de estratégias e é calculado o *payoff* de cada estratégia. Na formulação do

jogo, é verificado se a qualidade de serviço pode ser fornecida e se o desempenho das conexões já admitidas não será degradado abaixo de certo nível. Por fim, o jogo é resolvido para encontrar o equilíbrio de Nash e então é decidido se a conexão pode ser aceita ou rejeitada.

Rong *et al* [45] se preocupam com a visão do provedor de serviços e do cliente que contrata o serviço e tentam balancear o valor ótimo de lucro e o valor ótimo de utilidade do cliente. Na mesma perspectiva, um segundo trabalho dos autores [46] tem o objetivo de maximizar o lucro, utilidade e justiça da rede, apresentando não só uma solução ótima, mas também uma solução aproximada. O controle de admissão deve maximizar a banda disponibilizada para cada usuário e manter taxas de bloqueio uniformes para os diferentes tipos de serviços para maximizar a utilidade e a justiça, respectivamente. O algoritmo proposto tem duas fases, na primeira fase, a banda disponível é dividida em  $M$  partes para um usuário utilizando a técnica de partição completa (CP - *Complete Partition*), visando alcançar justiça, sendo  $M$  o número de classes de serviço que compartilham a banda. A maximização do lucro e da utilidade é feita na segunda fase do algoritmo e de uma forma geral, o mecanismo consegue atender os requisitos dos provedores de serviço e dos clientes.

Na perspectiva do usuário, ter uma conexão bloqueada no *handoff* tem um impacto mais negativo do que não conseguir uma nova conexão. Com base nesta afirmação, Kim *et al* [47] propõem um mecanismo de controle de admissão que dá maior prioridade às conexões em *handoffs*. No trabalho, a BS classifica duas zonas admissíveis com diferentes valores de SNR médio e cada região utiliza um modo de transmissão diferente. Uma região é para *handoffs* ( $R_v$ ) e outra para novas chamadas ( $R_u$ ), onde  $R_v \supseteq R_u$ . Dessa forma, a rede garante os requisitos de latência e probabilidade de descarte para aplicações VOIP, utilizando a classe de serviço *ertPS*. Preocupados com a probabilidade de bloqueio e o atraso para UGS, *rtPS* e *nrtPS*, Ghazal *et al* [48] dão diferentes prioridades aos tipos fluxos. O objetivo é manter valores de atraso e probabilidade de bloqueio mais baixos para conexões UGS.

Na proposta de Kwon *et al* [49], três tipos de chamadas (*calls*) são levadas em consideração: entrada na rede, *handoff* e mudança de modulação, assim como o requisito de banda mínima de cada cliente. Propõe-se um mecanismo de CAC que utiliza reserva de banda para as trocas de modulações e *handoffs* para evitar que clientes com troca de modulação e *handoff* sejam desconectados da rede, sendo que a mudança de modulação tem maior prioridade sobre *handoffs*, que, por sua vez, tem precedência sobre as novas chamadas. O artigo avalia a probabilidade de bloqueio para diferentes valores de reserva de banda. Entretanto, são utilizados apenas 3 esquemas de modulação e codificação diferentes, enquanto que o padrão define 7 esquemas diferentes. Considera-se que todas as conexões requerem a mesma quantidade de banda mínima, o que não acontece num ambiente realista.

No mecanismo proposto por Lu e Ma [31], a prioridade é diferenciada pelas cinco classes de serviço definidas no padrão. Além disso, para garantir os requisitos de qualidade de serviço, são calculados valores de *threshold* de limite de banda para cada tipo de serviço baseado no algoritmo

Optimal Revenue com diferentes probabilidades de bloqueio para classes de serviço diferentes, e também, considerada as diferentes modulações que o cliente pode assumir. O mecanismo proposto utiliza uma abordagem de empréstimo de banda, na qual os valores estipulados de *threshold* são ignorados e se faz empréstimos de banda de classes com prioridade mais baixa. Ao operar em conjunto com o mecanismo de escalonamento, o trabalho se mostrou mais eficiente em comparação com outros mecanismos, porém, os autores deixam de avaliar todos os tipos de serviços do padrão.

De maneira similar, no trabalho de Khemiri *et al* [50], são utilizados 2 limitantes para cada tipo de serviço. O limitante superior é a quantidade de banda máxima reservada para a classe, enquanto que o limitante inferior define a reserva mínima abaixo da qual não pode mais haver empréstimo de banda. O problema é resolvido através programação linear com relaxação utilizando multiplicador de Lagrange, entretanto, em grandes escalas o algoritmo se torna ineficiente.

No trabalho proposto por Wang *et al* [51] emprega-se também os limitantes para as diferentes classes de serviço especificadas no padrão, enfatiza-se o *handoff* dos clientes, dando maior prioridade para *handoff* de UGS e de rtPS, do que para as novas conexões.

## 5.2 Proposta de um mecanismo de controle de admissão

### 5.2.1 Controle de admissão baseado na Taxa Mínima

O mecanismo de controle de admissão descrito nesta seção se baseia em garantir o requisito mínimo de banda. Uma nova conexão só será aceita se a rede tiver a capacidade de suportar os requisitos de banda dela.

Para as conexões dos tipos rtPS e nrtPS, o requisito de banda é definido pelo parâmetro *Minimun Reserved Traffic Rate*. Além disso, para estas classes de serviço também é considerado uma taxa mínima para o pedido de banda. Já para as conexões do tipos UGS e ertPS que são baseadas em *grants* periódicos, a taxa é calculada em função dos parâmetros *SDU Size* e *Unsolicited Grant Interval*. As conexões do tipo BE são sempre aceitas pois não necessitam de um requisito de banda mínima.

Embora simples, este controle de admissão atende às especificações do padrão IEEE 802.16 e por tanto, será usado como base de comparação para o mecanismo de controle de admissão proposto neste trabalho.

### 5.2.2 Controle de admissão *Cross-layer*

O mecanismo de controle de admissão proposto neste trabalho baseia-se no mecanismo apresentado na Seção 5.2.1, mas utiliza informações da qualidade do canal para realizar o aceite

das conexões. Assim como o mecanismo apresentado na Seção 5.2.1, a decisão do controle de admissão também é baseada na capacidade da rede suportar os requisitos de banda de cada estação cliente. A principal diferença entre os dois mecanismos está na priorização dos clientes que serão aceitos.

O procedimento de controle de admissão atua no final do processo de entrada de inicialização e entrada na rede apresentado na Seção 2.5.3 e o esquema de troca de mensagens é mostrado na Figura 2.7. Assim que a estação base recebe uma mensagem DSA-REQ, ela responde com um mensagem confirmando o recebimento do pedido de criação do fluxo com uma mensagem DSX-RVD. Desta forma, a estação base não precisa responder imediatamente se aceitou ou negou o pedido. Este mecanismo de controle de admissão *cross-layer* realiza a decisão periodicamente; a ideia é formar uma fila de conexões e priorizar aquelas que estiverem em melhores condições de canal, de forma a usar a rede de maneira mais eficiente. Para consumir a fila de conexões, o mecanismo ordena a fila baseado no SNR medido de cada estação cliente e vai aceitando as estações clientes com maior valor de SNR. Um cliente é aceito se for possível garantir seus requisitos de qualidade de serviço, caso contrário, é enviada uma resposta negando a criação do fluxo.

Como o cliente está no processo de entrada na rede, a estação base possui poucas informações de qualidade de cada estação cliente. As informações de SNR são obtidas medindo os pacotes de pedido de conexão de cada cliente.

O mecanismo de controle de admissão proposto é um mecanismo guloso para escolher as estações clientes que utilizarão um esquema de modulação e codificação mais eficiente e, conseqüentemente, terão um melhor desempenho e aproveitamento da rede.

## 5.3 Avaliação da política de controle de admissão

### Cenários de simulação

A rede simulada utiliza uma topologia ponto-multiponto com um estação base centralizada e as estações clientes distribuídas ao redor dela num raio máximo de 2500 metros.

A camada física utiliza a tecnologia OFDM envolvendo os 7 esquemas de modulação e codificação para as transmissões dos pacotes de dados e o esquema de modulação e codificação BPSK 1/2 para as transmissões dos pacotes de sinalização. A duração do *frame* é de 5 ms com a proporção *downlink/uplink* de 1:1.

O cenário simulado inclui as cinco classes de serviços (rtPS, nrtPS, ertPS, UGS e BE) com diferentes tipos de tráfegos: voz, voz com supressão de silêncio e vídeo, que são associados com UGS, ertPS e rtPS, respectivamente, e o tráfego FTP para os serviços nrtPS e BE.

O modelo de voz utilizado é um modelo “on/off” com duração média dos períodos de “on” e de “off” iguais a 1,2 s e 1,8 s, respectivamente. Durante o período de “on”, pacotes de 66 bytes

são gerados a cada 20 ms[39]. O modelo de voz com supressão de silêncio utiliza o *Enhanced Variable Rate Codec* (EVRC) [40], com pacotes gerados a cada 20 ms empregando as taxas: Rate 1 (171 bits/packet), Rate 1/2 (80 bits/packet), Rate 1/4 (40 bits/packet) e Rate 1/8 (16 bits/packet). O tráfego de vídeo é gerado por *traces* de vídeo MPEG-4 [41] codificados num nível de qualidade baixo, com duração de 20 minutos e taxa de 200 Kbps. O tráfego FTP é gerado com uma fonte on-off com tempo infinito no estado “on”, taxa de transmissão de 120 Kbps e pacotes de tamanho 238 bytes.

O intervalo dos *grants* periódicos para os serviços UGS e ertPS é de 20 ms e o intervalo dos *grants* para *polling unicast* é de 20 ms para o serviço rtPS e 1 s para o serviço nrtPS.

O requisito de latência máxima do serviço rtPS é de 400 ms e cada conexão tem seus próprios requisitos de taxa mínima e taxa máxima, que variam de acordo com o taxa do vídeo. O serviço nrtPS tem a taxa mínima de 100 Kbps, e taxa máxima de 150 Kbps. O serviço BE não tem nenhum requisito de QoS.

O modelo de propagação *COST 231 Hata* [23] é utilizado para o canal realista. A rede simulada compreende um área quadrada de 5 km de largura com a estação base no centro desta área.

O tempo de vida das conexões UGS é determinado por uma distribuição exponencial com média de 200s e o tempo de vida das conexões rtPS, nrtPS e ertPS são determinados por uma distribuição exponencial com média de 400s.

A taxa de chegada das estações clientes varia de 1 a 7 conexões por minuto para cada tipo de serviço, exceto o serviço BE. Em toda a simulação, há apenas um cliente com tipo de serviço BE, uma vez que este tipo de serviço não passa pelo processo de controle de admissão.

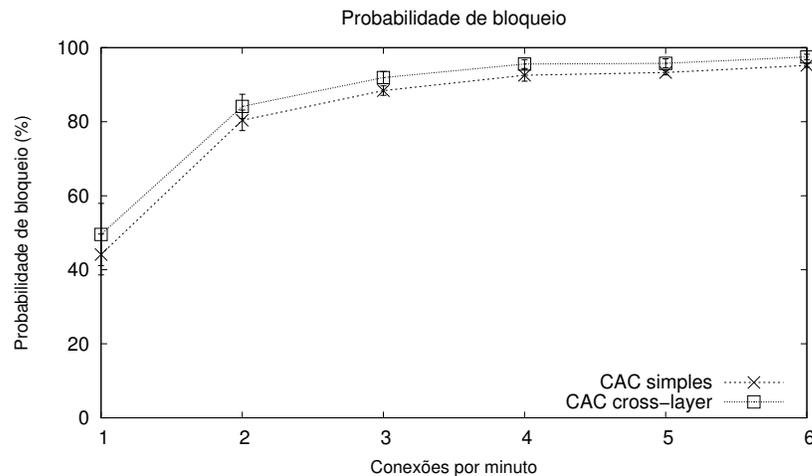
Foram realizadas 10 simulações com diferentes sementes para cada valor de taxa de chegada, e os resultados mostram um intervalo de confiança de 95%. Cada simulação tem um tempo de duração de 3600s.

### **Avaliação dos resultados**

O mesmo cenário foi simulado utilizando o controle de admissão mais simples descrito na Seção 5.2.1 e também utilizando o controle de admissão proposto na Seção 5.2.2.

A Figura 5.1 apresenta a taxa de bloqueio do serviço UGS para o mecanismo baseado na Taxa Mínima e para o mecanismo *cross-layer*. Considerando o intervalo de confiança, ambos os mecanismos têm a mesma taxa de bloqueio. A Figura 5.2 mostra a vazão para as estações cliente UGS. A vazão dos fluxos UGS tanto para o mecanismo de Taxa Mínima, quanto para o mecanismo *cross-layer* é praticamente constante. Isso acontece por que o mecanismo de escalonamento envia *grants* periódicos para esse tipo de serviço, tornando o *goodput* estável.

As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam, respectivamente, a taxa de bloqueio e a vazão para o fluxo rtPS. Não há uma diferença significativa na taxa de bloqueio para o fluxo de serviço rtPS. Quando a taxa de chegada é de três conexões por minuto, o mecanismo *cross-layer* tem uma taxa de



**Figura 5.1:** Taxa de bloqueio para o fluxo de serviço UGS

bloqueio maior, entretanto, quando é relacionado com a vazão média, o algoritmo *cross-layer* não apresenta desempenho superior. Isso acontece porque há cinco tipos de serviços simultaneamente na rede, cada um com uma demanda de banda diferente, dessa forma, com uma taxa de bloqueio maior para o rtPS, o ganho de banda é diluído em um outro tipo de tráfego com uma demanda bem maior, assim, não é possível ter ganhos significativos.

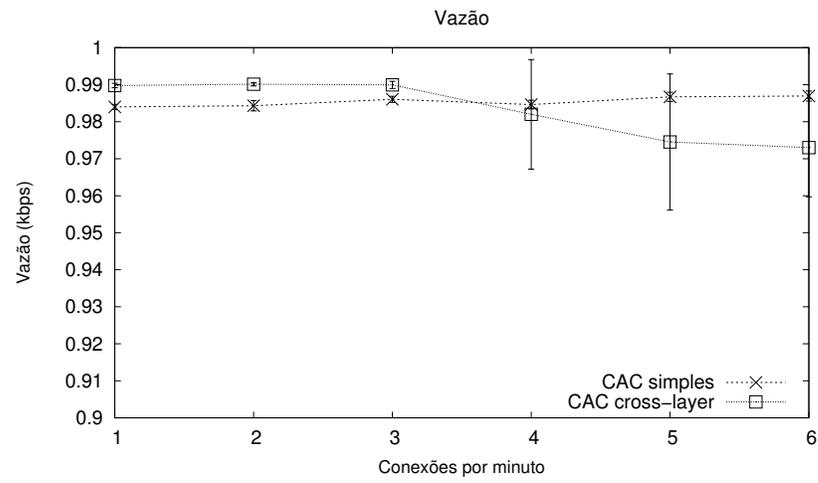
Assim como os fluxos de serviço UGS e rtPS, as Figuras 5.5 e 5.7 mostram resultados de probabilidade de bloqueio muito semelhantes para os fluxos de serviços nrtPS e ertPS. Na Figura 5.6 pode-se observar que houve pouca variação na vazão e se torna constante a medida em que novas conexões são aceitas. Isso mostra que a quantidade de estações clientes que foram aceitas na rede não impactou esta classe de serviço. Já para a classe de serviço ertPS, houve uma pequena perda de desempenho quando a taxa de conexões era de quatro conexões por minuto, como mostra a Figura 5.8.

## 5.4 Considerações Finais

Este capítulo discutiu o mecanismo de controle de admissão em redes baseados no padrão IEEE 802.16, descrevendo o estado da arte e propõe um mecanismo de controle de admissão *cross-layer* que utiliza as informações do canal para realizar o aceite das conexões.

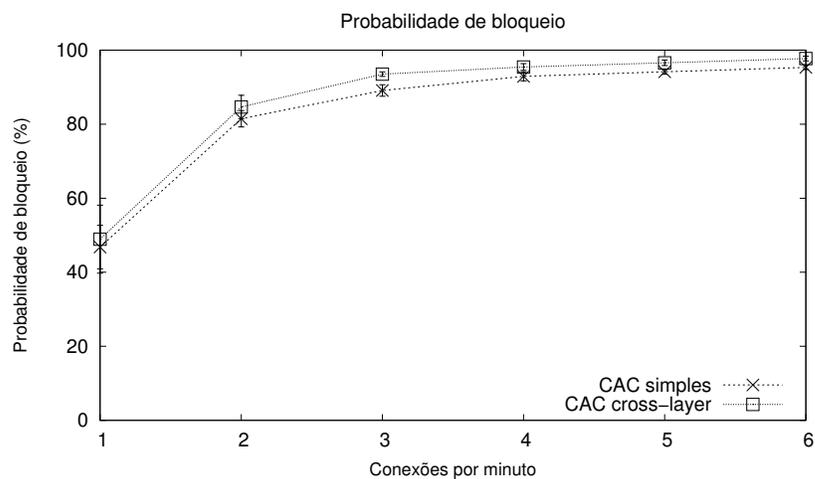
O mecanismo utiliza uma estratégia gulosa para dar preferência a estações clientes que enviam pacotes com maiores valores de SNR no momento de sua conexão. Os pedidos de conexão são armazenados em uma fila de conexões e o mecanismo é executado periodicamente tratando primeiro as estações que têm melhor qualidade de sinal.

Os resultados das simulações mostraram que não há um ganho significativo no desempenho

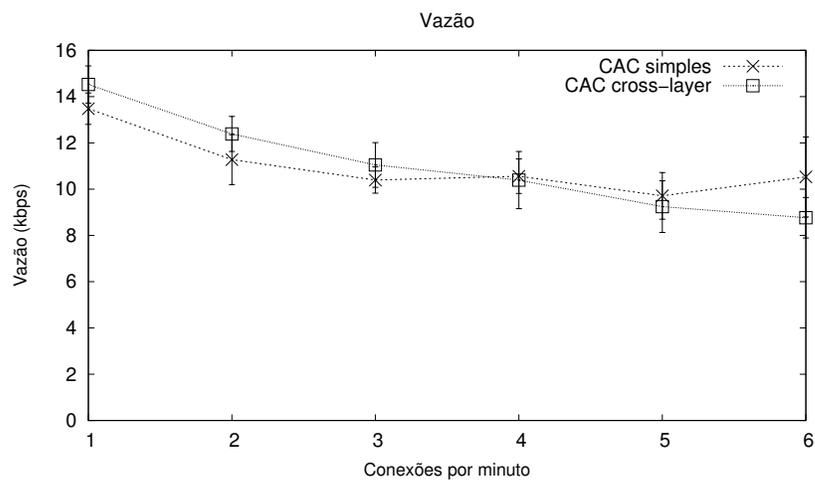


**Figura 5.2:** Goodput médio para o fluxo de serviço UGS

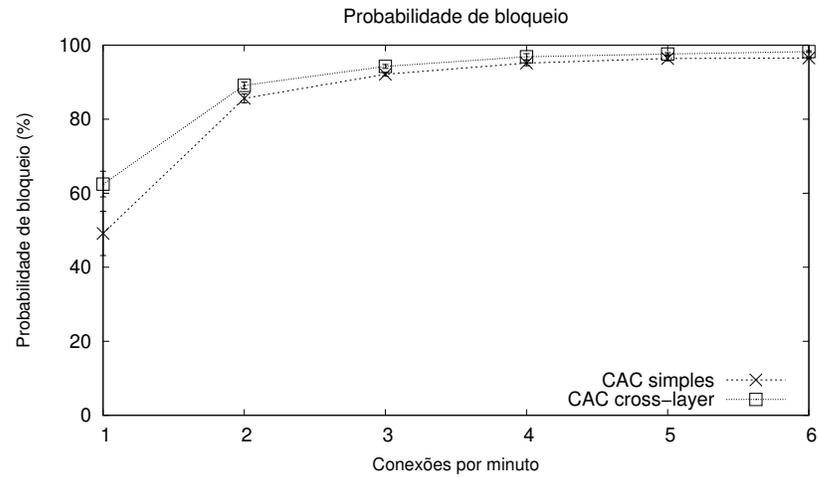
da rede ao adotar a estratégia gulosa.



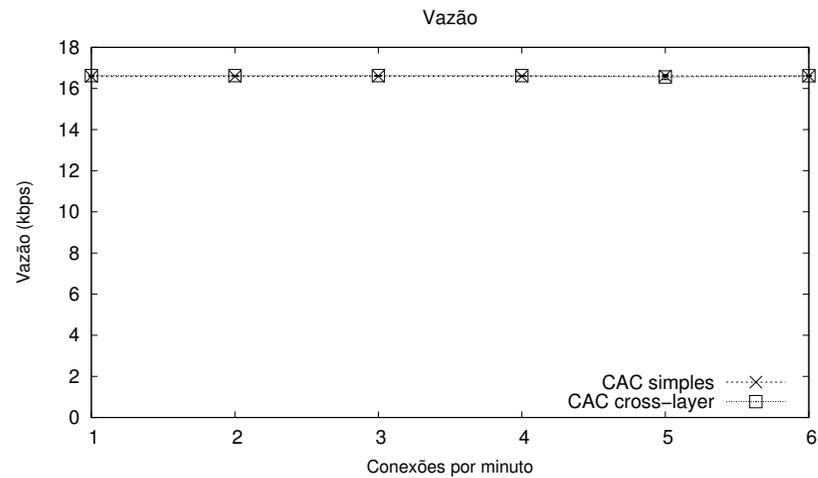
**Figura 5.3:** Taxa de bloqueio para o fluxo de serviço rtPS



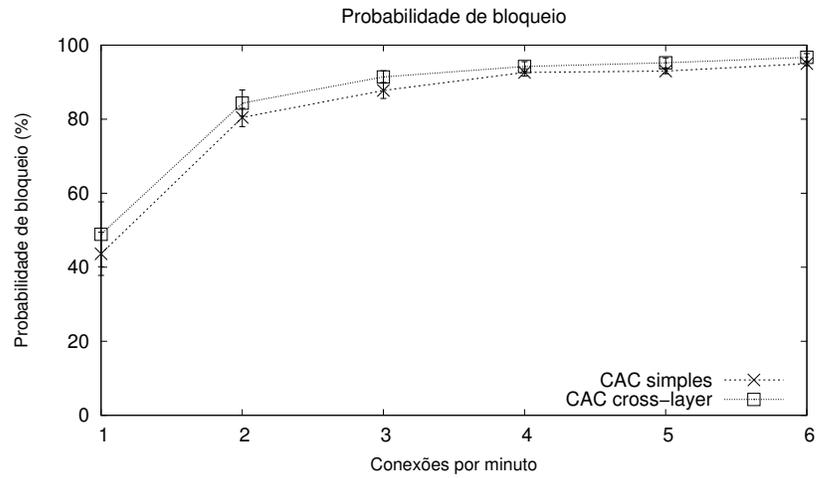
**Figura 5.4:** Goodput médio para o fluxo de serviço rtPS



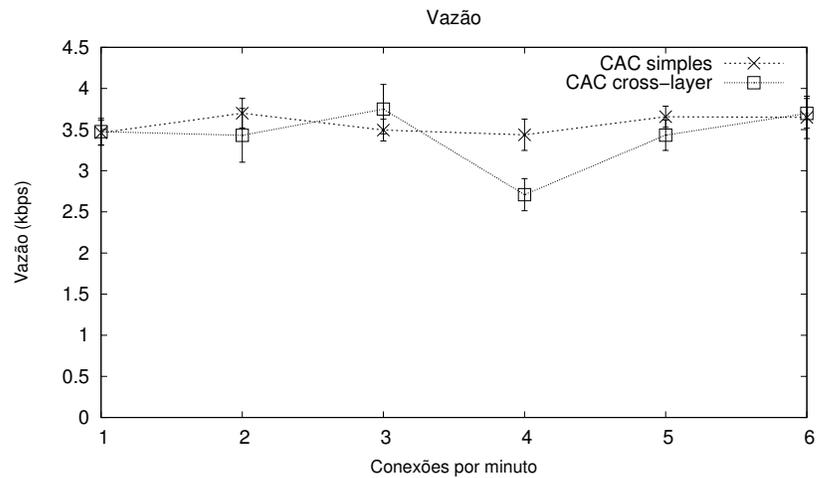
**Figura 5.5:** Taxa de bloqueio para o fluxo de serviço nrtPS



**Figura 5.6:** Goodput médio para o fluxo de serviço nrtPS



**Figura 5.7:** Taxa de bloqueio para o fluxo de serviço ertPS



**Figura 5.8:** Goodput médio para o fluxo de serviço ertPS

# Capítulo 6

## Conclusões e Trabalhos Futuros

### 6.1 Conclusões

Devido à alta popularização de dispositivos móveis, novas tecnologias vem sendo desenvolvidas para prover altas taxas, alto nível de escalabilidade e baixo custo de instalação para suprir as demandas da população que requer cada vez mais ficar conectada. O IEEE 802.16 é uma destas tecnologias que chama a atenção da comunidade científica por deixar vários pontos em aberto para os fabricantes diferenciarem seus produtos, além de deixar em aberto para a pesquisa.

O Capítulo 2 descreveu as principais características da camada física e a camada de acesso ao meio (MAC) do padrão IEEE 802.16. A camada física OFDM possui sete esquemas de codificação e modulação para permitir um bom desempenho nas transmissões de estações clientes em diferentes localizações. Além disso, a camada física possui uma estrutura de *frames* para uma arquitetura ponto-multiponto. A especificação da camada MAC inclui cinco tipos de serviço para possibilitar diferentes prioridades nas políticas de escalonamento e controle de admissão.

O Capítulo 3 descreveu o simulador de redes WiMAX utilizado neste trabalho focando a implementação do canal de rede sem fio no simulador. Dois modelos de perda de pacotes foram estudados para selecionar aquele que seria utilizado nas simulações. O primeiro, proposto por Bustamante *et al.*[26], e o segundo, pelo ICRFE[27], da Universidade de Tecnologia de Vienna. Ambos os modelos se mostraram válidos, mas o modelo de Bustamante *et al.* foi escolhido para ser utilizado nas simulações por se mostrar mais próximo dos modelos teóricos.

O Capítulo 4 descreveu o escalonamento nas redes IEEE 802.16. Neste trabalho, foi estudado o escalonador *uplink* localizado na estação base. Por não ter acesso direto às filas de pacotes a serem transmitidos pelas estações clientes e ainda ter objetivo de garantir os requisitos de qualidade de serviço, o estudo deste escalonador é bastante desafiador. No Capítulo 4 foi descrito o estado da arte para o escalonamento *cross-layer* que utiliza informações de qualidade do canal e dois novos mecanismos de escalonamento foram propostos.

O primeiro mecanismo de escalonamento proposto é uma extensão do escalonador baseado em migração de filas proposto por Borin e Fonseca [12]. O mecanismo proposto está totalmente de acordo com as especificações do padrão IEEE 802.16 e, através de uma abordagem *cross-layer*, utiliza informações das condições do canal para fazer o escalonamento. Os resultados das simulações mostram que o escalonamento *cross-layer* melhora o goodput da rede para os tráfegos nrtPS e BE. A classe de serviço rtPS não apresentou melhora significativa no goodput mas consegue prover o requisito de latência. Eliminando o impacto da janela de congestionamento, os experimentos mostraram que o escalonador oferece a taxa mínima requisitada pelos fluxos nrtPS. Os serviços UGS e ertPS também têm seus requisitos de qualidade de serviço respeitados. Mesmo com as condições adversas do meio sem fio, o mecanismo proposto foi capaz de prover os requisitos mínimos de qualidade de serviço para cada classe de serviço definidos no padrão IEEE 802.16.

O segundo mecanismo de escalonamento proposto é uma extensão do mecanismo de escalonamento anterior para considerar os sete esquemas de modulação e codificação definidos no padrão IEEE 802.16. Com o objetivo de melhorar o uso da banda, o escalonador proposto atribui altos valores de prioridades para as estações clientes que estão utilizando os esquemas de modulação e codificação mais eficientes. Os resultados das simulações mostraram que a abordagem proposta aumenta a utilização do *subframe uplink* quando comparado com uma abordagem simples para os fluxos com classe de serviço rtPS e nrtPS. Para as conexões com classe de serviço UGS, ertPS e BE, não há um ganho significativo.

O Capítulo 5 descreveu um mecanismo de controle de admissão simples e a proposta de um mecanismo de controle de admissão *cross-layer* que considera as informações da qualidade de canal para tomar a decisão de aceitar ou rejeitar uma nova conexão. Os resultados mostraram que não há um ganho no mecanismo *cross-layer* quando comparado com um algoritmo que considera a taxa mínima sem nenhuma otimização.

## 6.2 Trabalhos Futuros

Esta seção traz assuntos que não foram abordados nesta dissertação mas que podem trazer resultados relevantes, assim como direcionamentos para trabalhos futuros.

### 6.2.1 Extensão do mecanismo de escalonamento para redes IEEE 802.16m

Um novo adendo ao IEEE 802.16 foi lançado em maio de 2011, conhecido como IEEE 802.16m[17]. A nova especificação traz várias modificações e melhorias. Uma delas, é uma nova estrutura de *frame*, conhecida como *superframe*, que pode ser composta por outros quatro *frames*. Além disso, um mecanismo baseado em GPS ou baseado em triangulação de antenas oferece à estação base informações de localização de cada estação cliente.

Assim, os mecanismos estudados nesta dissertação poderiam ser estendidos para aproveitar a estrutura de *superframes* e ao invés de utilizar apenas as estimativas baseadas em SNR, a localização das estações clientes poderia dar ao escalonador mais informações para o escalonamento.

### **6.2.2 Extensão do mecanismo de escalonamento para redes LTE**

Novas tecnologias estão ganhando mercado, entre elas, o LTE. Um extensão do mecanismo de escalonamento poderia ser estudado para estar de acordo com as características da tecnologia LTE.

Desta forma, seria interessante estender os mecanismos de escalonamento baseados em migração de fila para provisão de QoS na tecnologia LTE, de forma a considerar a qualidade do sinal para realizar o escalonamento.

### **6.2.3 Extensão do mecanismo de controle de admissão para considerar lucro e utilidade**

O mecanismo de controle de admissão proposto procura garantir os requisitos mínimos de banda. O mecanismo *cross-layer* poderia ser estendido visando obter lucro e/ou utilidade combinados com uma abordagem que utiliza informações de qualidade de canal.

A utilidade pode estar relacionada com a qualidade de canal, uma vez que quanto maior a qualidade, melhor será o aproveitamento do enlace sem fio. Propõe-se então, como trabalhos futuros, o estudo de mecanismos de controle de admissão que visam a otimização do lucro ou utilidade.

# Bibliografia

- [1] IEEE Standard 802.16-2004, Part 16. “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems”. Em: (2004).
- [2] Aymen Belghith e Loutfi Nuaymi. “Comparison of WiMAX scheduling algorithms and proposals for the rtPS QoS class”. Em: *Wireless Conference, 2008. EW 2008. 14th European*. IEEE. 2008, pp. 1–6.
- [3] Da-Nung Lai, Tsung-Chuan Huang e Hung-Yi Chi. “Efficient bandwidth allocation with QoS guarantee for IEEE 802.16 systems”. Em: *Parallel Processing (ICPP), 2011 International Conference on*. IEEE. 2011, pp. 115–119.
- [4] Quang-Dung Ho, Mohamed Ashour e Tho Le-Ngoc. “Delay-sensitive and channel-aware scheduling in next generation wireless networks”. Em: *Electrical and Computer Engineering, 2008. CCECE 2008. Canadian Conference on*. IEEE. 2008, pp. 1801–1804.
- [5] Tao Chen e Imrich Chlamtac. “A channel state aware uplink bandwidth allocation algorithm for wireless networks”. Em: *Mobile and Wireless Communications Summit, 2007. 16th IST*. IEEE. 2007, pp. 1–5.
- [6] Qingwen Liu, Xin Wang e Georgios B Giannakis. “Cross-layer scheduler design with QoS support for wireless access networks”. Em: *Quality of Service in Heterogeneous Wired/Wireless Networks, 2005. Second International Conference on*. IEEE. 2005, pp. 8–21.
- [7] R Ghazizadeh, P Fan e Y Pan. “A two-layer channel-aware scheduling algorithm for IEEE 802.16 broadband wireless access systems”. Em: *Journal of Applied Sciences* 9.3 (2009), pp. 449–458.
- [8] Dionysia-Katerina Triantafyllou, Nikos Passas e Alexandros Kalokylos. “A cross-layer optimization mechanism for multimedia traffic over IEEE 802.16 networks”. Em: *European Wireless*. 2007.

- [9] Mehri Mehrjoo, Xuemin Shen e Kshirasagar Naik. “A joint channel and queue-aware scheduling for IEEE 802.16 wireless metropolitan area networks”. Em: *Wireless Communications and Networking Conference, 2007. WCNC 2007. IEEE*. IEEE. 2007, pp. 1549–1553.
- [10] Yaxin Cao e Victor OK Li. “Scheduling algorithms in broadband wireless networks”. Em: *Proceedings of the IEEE* 89.1 (2001), pp. 76–87.
- [11] Hossam Fattah e Cyril Leung. “An overview of scheduling algorithms in wireless multimedia networks”. Em: *Wireless Communications, IEEE* 9.5 (2002), pp. 76–83.
- [12] Juliana Freitag Borin e Nelson LS da Fonseca. “Uplink scheduler and admission control for the IEEE 802.16 standard”. Em: *Global Telecommunications Conference, 2009. GLOBECOM 2009. IEEE*. IEEE. 2009, pp. 1–6.
- [13] *The ns-3 network simulator*. <http://www.nsnam.org>.
- [14] Juliana Freitag e Nelson LS da Fonseca. “Uplink scheduling with quality of service in IEEE 802.16 networks”. Em: *Global Telecommunications Conference, 2007. GLOBECOM'07. IEEE*. IEEE. 2007, pp. 2503–2508.
- [15] IEEE Standard 802.16-2001, Part 16. “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems”. Em: (2002).
- [16] IEEE Standard 802.16-2005, Part 16. “IEEE Standard for Local and metropolitan area network Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems”. Em: (2005).
- [17] IEEE Standard 802.16-2011, Part 16. “IEEE Standard for Local and metropolitan area network Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems Amendment 3: Advanced Air Interface”. Em: (2011).
- [18] *The Network Simulator - ns-2*. <http://www.isi.edu/nsnam/ns/>.
- [19] Juliana Freitag Borin e Nelson LS da Fonseca. “Simulator for WiMAX networks”. Em: *Simulation Modelling Practice and Theory* 16.7 (2008), pp. 817–833.
- [20] *The Network Simulator NS-2 NIST add-on - IEEE 802.16 model (MAC+PHY)*. Rel. téc. National Institute of Standarts e Technology, 2007.
- [21] Jahanzeb Farooq e Thierry Turetletti. “An IEEE 802.16 WiMAX Module for the NS-3 Simulator”. Em: *Proceedings of the 2nd International Conference on Simulation Tools and Techniques*. ICST (Institute for Computer Sciences, Social-Informatics e Telecommunications Engineering). 2009, p. 8.
- [22] Mohamed Amine Ismail et al. “An Improved IEEE 802.16 WiMAX Module for the ns-3 Simulator”. Em: *Proceedings of SIMUTools Conference, 2010*. 2010.

- [23] Masaharu Hata. “Empirical formula for propagation loss in land mobile radio services”. Em: *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 29.3 (1980), pp. 317–325.
- [24] V. Erceg et al. *IEEE 802.16.3c-01/29r4 - Channel Models for Fixed Wireless Applications - IEEE 802.16 Broadband Wireless Access Working Group*. 2001.
- [25] Vinko Erceg et al. “An empirically based path loss model for wireless channels in suburban environments”. Em: *Selected Areas in Communications, IEEE Journal on* 17.7 (1999), pp. 1205–1211.
- [26] Leonardo Betancur, Roberto C Hincapié e Roberto Bustamante. “WiMAX channel: PHY model in network simulator 2”. Em: *Proceeding from the 2006 workshop on ns-2: the IP network simulator*. ACM. 2006, p. 6.
- [27] Christian Mehlführer, Sebastian Caban e Markus Rupp. “Experimental evaluation of adaptive modulation and coding in MIMO WiMAX with limited feedback”. Em: *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing* 2008.1 (2007), p. 837102.
- [28] Antonio Lera, Antonella Molinaro e Sara Pizzi. “Channel-aware scheduling for QoS and fairness provisioning in IEEE 802.16/WiMAX broadband wireless access systems”. Em: *Network, IEEE* 21.5 (2007), pp. 34–41.
- [29] Jon CR Bennett e Hui Zhang. “Hierarchical packet fair queueing algorithms”. Em: *Networking, IEEE/ACM Transactions on* 5.5 (1997), pp. 675–689.
- [30] Chao-Lieh Chen et al. “Fairness and QoS Guarantees of WiMAX OFDMA Scheduling with Fuzzy Controls”. Em: *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2009 (2008), p. 23.
- [31] Jinchang Lu e Maode Ma. “A cross-layer elastic CAC and holistic opportunistic scheduling for QoS support in WiMAX”. Em: *Computer Networks* 54.7 (2010), pp. 1155–1168.
- [32] Hemant Kumar Rath, Abhay Karandikar e Vishal Sharma. “Adaptive modulation-based tcp-aware uplink scheduling in ieee 802.16 networks”. Em: *Communications, 2008. ICC’08. IEEE International Conference on*. IEEE. 2008, pp. 3230–3236.
- [33] Yuan-Cheng Lai e Yen-Hung Chen. “A channel quality and QoS aware bandwidth allocation algorithm for IEEE 802.16 base stations”. Em: *Advanced Information Networking and Applications, 2008. AINA 2008. 22nd International Conference on*. IEEE. 2008, pp. 472–479.
- [34] Sudip Misra, Bhaswar Banerjee e Bernd E Wolfinger. “A learning automata-based uplink scheduler for supporting real-time multimedia interactive traffic in IEEE 802.16 WiMAX networks”. Em: *Computer Communications* 35.15 (2012), pp. 1871–1881.

- [35] Zeeshan Ahmed e Salima Hamma. “Two-level scheduling algorithm for different classes of traffic in WiMAX networks”. Em: *Performance Evaluation of Computer and Telecommunication Systems (SPECTS), 2012 International Symposium on*. IEEE. 2012, pp. 1–7.
- [36] Marcio Andrey Teixeira e Paulo Roberto Guardieiro. “A new and efficient adaptive scheduling packets for the uplink traffic in WiMAX networks”. Em: *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking* 2011.1 (2011), pp. 1–11.
- [37] Chong Tian e Dongfeng Yuan. “A novel cross-layer scheduling algorithm for IEEE 802.16 WMAN”. Em: *Cross Layer Design, 2007. IWCLD’07. International Workshop on*. IEEE. 2007, pp. 70–73.
- [38] N Abu Ali, Mohammad Hayajneh e Hossam Hassanein. “Cross layer scheduling algorithm for IEEE 802.16”. Em: *Communications, 2008. ICC’08. IEEE International Conference on*. IEEE. 2008, pp. 3858–3862.
- [39] Paul T Brady. “A model for generating on-off speech patterns in two-way conversation”. Em: *Bell System Technical Journal* 48.7 (1969), pp. 2445–2472.
- [40] 3GPP2 C.S0014-0. *Enhanced Variable Rate Codec (EVRC)*.
- [41] Patrick Seeling, Martin Reisslein e Beshan Kulapala. “Network performance evaluation using frame size and quality traces of single-layer and two-layer video: A tutorial”. Em: *Communications Surveys & Tutorials, IEEE* 6.3 (2004), pp. 58–78.
- [42] Jianfeng Chen, Wenhua Jiao e Hongxi Wang. “A service flow management strategy for IEEE 802.16 broadband wireless access systems in TDD mode”. Em: *Communications, 2005. ICC 2005. 2005 IEEE International Conference on*. Vol. 5. IEEE. 2005, pp. 3422–3426.
- [43] Sarat Chandra e Anirudha Sahoo. “An efficient call admission control for IEEE 802.16 networks”. Em: *Local & Metropolitan Area Networks, 2007. LANMAN 2007. 15th IEEE Workshop on*. IEEE. 2007, pp. 188–193.
- [44] Dusit Niyato e Ekram Hossain. “QoS-aware bandwidth allocation and admission control in IEEE 802.16 broadband wireless access networks: A non-cooperative game theoretic approach”. Em: *Computer Networks* 51.11 (2007), pp. 3305–3321.
- [45] Bo Rong, Yi Qian e Hsiao-Hwa Chen. “Adaptive power allocation and call admission control in multiservice WiMAX access networks”. Em: *Wireless Communications, IEEE* 14.1 (2007), pp. 14–19.
- [46] Bo Rong et al. “Call admission control optimization in WiMAX networks”. Em: *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* 57.4 (2008), pp. 2509–2522.

- [47] Kyung Jae Kim, Jin Soo Park e Bong Dae Choi. “Admission control scheme of extended rtPS algorithm for VoIP service in IEEE 802.16 e with adaptive modulation and coding”. Em: *Journal of Industrial and Management Optimization* 6.3 (2010), pp. 641–660.
- [48] Sahar Ghazal, Lynda Mokdad e Jalel Ben-Othman. “Performance analysis of UGS, rtPS, nrtPS admission control in WiMAX networks”. Em: *Communications, 2008. ICC'08. IEEE International Conference on*. IEEE. 2008, pp. 2696–2701.
- [49] Eunhyun Kwon et al. “A performance model for admission control in IEEE 802.16”. Em: *Wired/Wireless Internet Communications*. Springer, 2005, pp. 159–168.
- [50] Sondes Khemiri et al. “Optimal call admission control for an IEEE 802.16 wireless metropolitan area network”. Em: *Network Control and Optimization*. Springer, 2007, pp. 105–114.
- [51] Liping Wang et al. “Admission control for non-preprovisioned service flow in wireless metropolitan area networks”. Em: *Universal Multiservice Networks, 2007. ECUMN'07. Fourth European Conference on*. IEEE. 2007, pp. 243–249.