

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM
CONTROLADOR DE ADMISSÃO DE CHAMADAS PARA
INTEGRAÇÃO DE REDES SEM FIO WIMAX E WIFI**

WELLINGTON DE ARAÚJO GABLER

DM 014/2009

UFPA / CT / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

WELLINGTON DE ARAÚJO GABLER

**MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM
CONTROLADOR DE ADMISSÃO DE CHAMADAS PARA
INTEGRAÇÃO DE REDES SEM FIO WIMAX E WIFI**

DM 014/2009

UFPA / CT / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

WELLINGTON DE ARAÚJO GABLER

**MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM
CONTROLADOR DE ADMISSÃO DE CHAMADAS PARA
INTEGRAÇÃO DE REDES SEM FIO WIMAX E WIFI**

Dissertação submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da UFPA para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica com ênfase em Computação Aplicada, elaborada sob a orientação do Prof. Dr. Glaucio Haroldo Silva de Carvalho.

UFPA / CT / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém-Pará-Brasil
2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**MODELAGEM E AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM
CONTROLADOR DE ADMISSÃO DE CHAMADAS PARA
INTEGRAÇÃO DE REDES SEM FIO WIMAX E WIFI**

AUTOR: WELLINGTON DE ARAÚJO GABLER

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE COMPUTAÇÃO APLICADA.

APROVADA EM 28/08/2009

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. Glaucio Haroldo Silva de Carvalho
(ORIENTADOR - UFPA)

Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa
(CO-ORIENTADOR - UFPA)

Prof. Dr. Antônio Jorge Gomes Abelém
(MEMBRO - UFPA)

Prof. Dr. Mauro Margalho Coutinho
(MEMBRO - UNAMA)

VISTO:

Prof. Dr. Marcus Vinícius Alves Nunes
COORDENADOR DO PPGE/ITEC/UFPA

In memoriam

A meus avós:

Gregória Augusta de Sousa

Que me amou incondicionalmente, como a um filho;

Joaquim Félix de Araújo

Que me ensinou, dentre muitas coisas: política, carpintaria e astronomia;

Evaldo Arthur Gabler

Que apesar da distância, mantinha-nos no coração,

Saudades...

Agradecimentos

Inicialmente, e acima de tudo, eu gostaria de agradecer a Deus, que me deu a centelha divina da vida, proteção, confiança e a fé necessária para que eu concluísse esse trabalho. Muito obrigado Senhor.

Ao meu orientador, professor Dr. Glaucio Haroldo Silva de Carvalho, gostaria de fazer um agradecimento muito especial por não desistir desta orientação, quando eu, diante dos obstáculos do caminho, já o havia feito. Obrigado pelas idéias que nortearam a pesquisa e pela sua paciência na revisão dos resultados. Sem seu apoio, orientação, incentivo, às vezes "puxando minha orelha" e me mostrando que seria possível, essa dissertação não teria sido concluída. Acima de tudo, obrigado por ter me dado tarefas, as quais você sabia que estavam dentro das minhas possibilidades. Agradeço principalmente, além da orientação, pela amizade.

Gostaria de agradecer, também, ao meu co-orientador Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl A. Costa, pelas idéias de projetos e conversas sobre tecnologia, as quais guiaram meu interesse por telecomunicações e aos demais professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará por compartilharem um pouco do seu vasto conhecimento conosco durante as aulas do mestrado. Gostaria de agradecer, também, ao professor Dr. Mauro Margalho Coutinho pelas aulas de NS-2, que foram muito importantes para que eu tivesse uma visão mais aprofundada da área de redes.

Aos amigos, Francisco Edson, Marialina Sobrinho, Carlos Araújo, Marla Geller e Paula Cardoso, pelo apoio em momentos difíceis, nos quais a presença de um ombro amigo é fundamental, pelo enorme incentivo, por não me permitirem retroceder e pelos momentos de reflexão. Sem o incentivo e o apoio de vocês eu não teria conseguido. Muito obrigado.

Gostaria de agradecer a meus pais Heraldo Gabler e Aurenice de Araújo Gabler, que sempre se mantiveram firmes no propósito de me proporcionar uma educação de qualidade e que durante a realização do mestrado, sempre me cobraram sua conclusão.

Isso foi muito importante. Obrigado meus pais, já chegamos até aqui. Agora, vamos em frente...

A Pauliane Marques dos Santos (minha baixinha), que esteve ao meu lado durante todo esse tempo, às vezes (sempre) tendo que aturar meu mau humor quando as coisas não davam certo e minha ausência quando eu lia artigos sobre CAC/WiMax e escrevia a Dissertação. Seu sorriso é uma fonte de alegria na qual eu mergulho e esqueço do mundo. Obrigado... meu amor.

Resumo

Um grande desafio, atualmente, consiste em fornecer conectividade a grandes distâncias e com altas taxas de transmissão. A busca de alternativas de conectividade se justifica em muitas regiões, principalmente no norte do Brasil, tendo em vista a falta de infra-estrutura cabeada na maioria das cidades do interior devido ao aspecto geográfico, pois elas situam-se em áreas cercadas por: florestas, regiões alagadas (várzeas) e rios, o que dificulta muito o acesso físico. A tecnologia WiMax se destaca pelas vantagens que oferece nesses cenários e pela possibilidade de ser utilizada como *backbone* para outros tipos de tecnologias, como, por exemplo, o WiFi. Neste trabalho, é apresentada uma análise de desempenho para um Controle de Admissão de Chamadas (CAC) com múltiplos *thresholds*, o qual objetiva integração de redes WiMax e WiFi considerando as classes de serviço do padrão WiMax, assim como o tráfego WiFi de alta e baixa prioridade. Para a análise do modelo, é apresentado um estudo que compara diferentes configurações de *thresholds*. Para a avaliação do esquema proposto é utilizada uma cadeia de Markov a tempo contínuo. As métricas adotadas neste trabalho são: probabilidade de bloqueio, utilização e recompensa do sistema. A partir da análise dos resultados, é possível observar que a política de CAC proposta atende às necessidades de QoS para as classes individuais a partir do ajuste dos valores dos *thresholds*, os quais afetam diretamente a utilização total e a recompensa do sistema.

Palavras-chave: WiMax, WiFi, Cadeias de Markov, Controle de Admissão de Chamadas.

Abstract

Nowadays, a huge challenge consists in providing connectivity at long distances with high data rates. The seek to alternatives of connectivity, justify itself in many regions, mainly in north of Brasil, because of a lack of wired infrastructure in the majors of the region cities, due geographical aspects; cities are surrounded by: forests, rivers etc., what difficult the access. The WiMax technology appears by the advantages offered in that scenarios and the possibility to be used like a backbone to others technologies, for instance WiFi networks. In this work we present a performance analysis for a Call Admission Control (CAC) with multiples thresholds, which goals WiFi and WiMax integration, considering WiMax standard service classes, and WiFi traffic high and low priority. It was presented a study, for model analysis, which compares different thresholds configurations. For proposed scheme evaluation it was used a continuous-time Markov chain. The adopted metrics in this work are: blocking probability, utilization and award. Trough results analysis it is possible to see that proposed CAC policy is according to QoS needs to individual classes of service adjusting the thresholds values, which affect directly utilization and system award.

Keywords: WiMax, WiFi, Markov Chain, Call Admission Control.

Sumário

Introdução	1
0.1 Motivação	3
0.2 Objetivo	3
0.3 Contribuições do trabalho	4
0.4 Trabalhos relacionados	4
0.5 Organização do trabalho	6
0.6 Publicações	6
1 Redes Sem Fio	7
1.1 Preliminares	7
1.2 Redes WiFi	8
1.2.1 Evolução do Padrão	8
1.2.2 Arquitetura de uma rede IEEE 802.11	10
1.2.3 Camadas PHY e MAC	11
1.3 Redes WiMax	13
1.3.1 Evolução do Padrão	13
1.3.2 Arquitetura de uma rede IEEE 802.16	14
1.3.3 Camadas PHY e MAC	16
1.4 Considerações sobre a Integração das Redes Sem Fio WiMax e WiFi	17
2 Modelagem e Avaliação de Desempenho	19
2.1 Preliminares	19
2.2 Princípios da Modelagem	20

	XI
2.3	Processo de avaliação de desempenho 20
2.3.1	Técnicas para avaliação de desempenho 20
2.3.2	Uma abordagem sistemática para a avaliação de desempenho 21
2.4	Cadeias de Markov 22
2.4.1	Cálculo do estado de equilíbrio (Steady-State) 23
3	Modelagem do CAC Proposto 26
3.1	Preliminares 26
3.2	Considerações sobre o Tráfego 27
3.3	Modelagem 28
3.3.1	Probabilidade de Bloqueio de uma chamada de melhor esforço (BE) 28
3.3.2	Probabilidade de Bloqueio de uma chamada PS 29
3.3.3	Probabilidade de Bloqueio de uma chamada UGS 30
3.3.4	Probabilidade de Bloqueio de uma chamada WiFi de alta prioridade 30
3.3.5	Utilização total do sistema 30
3.3.6	Recompensa do sistema 30
4	Resultados 32
4.1	Preliminares 32
4.2	Comparação do CAC Proposto com Compartilhamento Total 33
4.2.1	Probabilidade de bloqueio dos tráfegos para CT e MT 33
4.2.2	Utilização e recompensa do sistema para CT e MT 33
4.3	Análise de sensibilidade do CAC proposto 35
4.3.1	Projeto 1 35
4.3.1.1	Probabilidade de bloqueio do Tráfego WiFi de alta prioridade 35
4.3.1.2	Probabilidade de bloqueio do Tráfego UGS 36
4.3.1.3	Probabilidade de bloqueio do Tráfego PS 36
4.3.1.4	Probabilidade de bloqueio do Tráfego de baixa prioridade 37
4.3.1.5	Utilização total 38

4.3.1.6	Recompensa do sistema	39
4.3.2	Projeto 2	39
4.3.2.1	Probabilidade de bloqueio do Tráfego WiFi de alta prioridade	40
4.3.2.2	Probabilidade de bloqueio do Tráfego UGS	40
4.3.2.3	Probabilidade de bloqueio do tráfego PS	41
4.3.2.4	Probabilidade de bloqueio do tráfego de melhor esforço . .	42
4.3.2.5	Utilização total	43
4.3.2.6	Recompensa do sistema	43
Conclusão		45
Referências Bibliográficas		47

Lista de Figuras

1.1	Área de cobertura de diferentes tecnologias sem fio [12].	8
1.2	<i>Extended Service Set (ESS)</i>	12
1.3	Pilha do padrão 802.2.[15]	12
1.4	Rede WiMax ponto-multiponto.[7]	15
2.1	Etapas da Modelagem	21
3.1	Rede WiMax/Wifi fortemente acoplada	27
3.2	Esquema de CAC proposto para integração WiMax/WiFi	27
4.1	Probabilidade de bloqueio CT e MT	34
4.2	Utilização CT e MT	34
4.3	Recompensa CT e MT	35
4.4	Probabilidades de bloqueio WiFi	36
4.5	Probabilidades de bloqueio UGS	37
4.6	Probabilidades de bloqueio PS	37
4.7	Probabilidades de bloqueio BE	38
4.8	Utilização total MT	38
4.9	Recompensa MT	39
4.10	Probabilidade de bloqueio WiFi de alta prioridade	41
4.11	Probabilidade de bloqueio UGS	41
4.12	Probabilidade de bloqueio PS	42
4.13	Probabilidade de bloqueio BE	42
4.14	Utilização do sistema	43

4.15 Recompensa do sistema 44

Lista de Tabelas

1.1	Especificações originais do IEEE 802.11: Características básicas [15].	9
1.2	Alguns padrões da família IEEE 802.11 já publicados[12].	10
1.3	Especificações da Tecnologia WiFi[13].	11
1.4	Especificações da camada PHY.[15]	13
1.5	Comparação de tecnologias WiFi e WiMax [13]	18
2.1	Características das Técnicas de Avaliação de Desempenho	25
3.1	Tabela de Estados $\phi = (i, j)$	29
4.1	Parametrização[34].	33
4.2	<i>Thresholds - Projeto 1</i>	35
4.3	<i>Thresholds - Projeto 2</i>	40

Glossário

AP	-	<i>Access Point</i>
BE	-	<i>Best Efort</i>
BS	-	<i>Base Station</i>
BSS	-	<i>Basic Service Set</i>
CAC	-	<i>Controle de Admissão de Chamadas</i>
CT	-	<i>Compartilhamento Total</i>
CTMC	-	<i>Continuous-Time Markov Chains</i>
CTS	-	<i>Clear to Send</i>
CWC	-	<i>ontention Window</i>
DIFS	-	<i>Distributed Interframe Space</i>
DSL	-	<i>Digital Subscriber Line</i>
DTMC	-	<i>Discrete-Time Markov Chains</i>
DVB-H	-	<i>Digital Video Broadcast-Handheld</i>
EDCF	-	<i>Enhanced Distributed Coordination Function</i>
ESS	-	<i>Extended Service Set</i>
FCC	-	<i>Fuzzy Congestion Controller</i>
FDD	-	<i>Frequency Division Duplex</i>
FQC	-	<i>Fuzzy QoS Controller</i>
HC	-	<i>Hybrid Coordinator</i>
IBSS	-	<i>Independent Basic Service Set</i>
IEEE	-	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
LOS	-	<i>line-of-sight</i>
MAC	-	<i>Medium Access Coontrol</i>

MAN	-	<i>Metropolitan Area Network</i>
MFAC	-	<i>Fuzzy Admission Control for Multimedia Applications</i>
MT	-	<i>Multi-Threshold</i>
NAV	-	<i>Network Allocation Vector</i>
NLOS	-	<i>non-line-of-sight</i>
nrtPS	-	<i>non-real-time Polling Service</i>
OFDM	-	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
OFDMA	-	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>
PC	-	<i>Particionamento Completo</i>
PHY	-	<i>Physical layer</i>
PO	-	<i>Portal</i>
QoS	-	<i>Qualidade de Serviço</i>
QTBR	-	<i>Quadra-Threshold Bandwidth Reservation</i>
rtPS	-	<i>real-time Polling Service</i>
RTS	-	<i>Request to Send</i>
SS	-	<i>Subscriber Station</i>
STA	-	<i>Station</i>
TDD	-	<i>Time Division Duplex</i>
TDMA	-	<i>Time Division Multiple Access</i>
UGS	-	<i>Unsolicited Grant Service</i>
UMTS	-	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
WIFI	-	<i>Wireless Fidelity</i>
WIMAX	-	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>
WLAN	-	<i>Wireless Local Area Network</i>
WMAN	-	<i>Wireless Metropolitan Area Network</i>
WWANs	-	<i>Wireless Wide Area Networks</i>

Introdução

Vive-se a Era da Informação, na qual o domínio do conhecimento, através do acesso à informação consiste em fator fundamental para o desenvolvimento. O papel das telecomunicações, nesse contexto, consiste em oferecer mecanismos para prover o acesso a essa informação que pode ser corporativa, de uso restrito, ou estar disponível na Internet para acesso público.

As redes de comunicação representam um dos pilares da tecnologia da informação. As novas necessidades das instituições de se comunicarem em diversos níveis, operacional, gerencial e estratégico, tornam o estudo de novas tecnologias de telecomunicações um fator imprescindível para o desenvolvimento desses setores. As redes de computadores possibilitam a interconexão de equipamentos a grandes distâncias permitindo a integração de sistemas de informação para diversos fins.

Essas redes podem ser interligadas por fibras ópticas, cabos metálicos, ou através de enlaces de microondas. Especificamente, as redes sem fio, ou seja, as que utilizam o meio aéreo como meio de propagação, oferecem uma série de vantagens dentre as quais estão [1]: rápida instalação, rápida utilização, mobilidade, onipresença e escalabilidade.

Com o advento da Quarta Geração (4G), os conteúdos disponíveis tendem a exigir conexões cada vez mais robustas e, para diversos serviços, requisitos de Qualidade de Serviço (QoS) são fundamentais. Na busca por uma acesso mais justo para a maioria da população, as redes sem fio apresentam-se como uma excelente forma de prover acesso à Internet em locais nos quais não exista uma estrutura cabeada adequada.

A tecnologia de redes sem fio WiMax, que será abordada no Capítulo 1, se destaca pelas vantagens que oferece nesses cenários, dentre eles: seu raio de alcance, que é capaz de abranger completamente uma cidade; sua característica de conexão ponto-multiponto; pode ser com linha de visada (LOS) ou sem linha de visada (NLOS); suas altas taxas de transmissão; e a possibilidade de ser utilizada como *backbone* para outros tipos de tecnologias. As redes WiMax são uma excelente alternativa para implementação

de redes metropolitanas; contudo, ainda não estão acessíveis para a maioria da população, principalmente no Brasil, por diversos motivos, como a demora no processo de licenciamento de frequências e o custo alto para aquisição dos equipamentos.

As redes sem fio locais WiFi, também abordadas no Capítulo 1, são bastante populares hoje, com interfaces encontradas em praticamente todos os computadores portáteis a venda no mercado, e implementam conectividade a altas taxas (54 Mbits/s), a pequenas distâncias. Esta limitação do raio de alcance consiste em um problema para a implantação de redes que demandem uma área de cobertura mais extensa.

Entende-se que a utilização conjunta dessas duas tecnologias, aproveitando as vantagens de cada uma, pode constituir-se em uma boa opção para obter uma rede com uma grande área de alcance e utilizando, como última milha, uma tecnologia já consolidada e de fácil acesso. A rede WiMax pode desempenhar o papel de um *backbone*, com uma área de cobertura maior, atingindo pontos geograficamente distantes dentro de uma área urbana ou rural, enquanto que as redes WiFi, conectadas ao *backbone* WiMax, podem atuar como pontos de acesso para os equipamentos dos usuários finais.

Em relação a Qualidade de Serviço (QoS), é necessário que sejam estudados mecanismos que favoreçam o tráfego proveniente das WLANs. Neste trabalho, é proposto um modelo baseado em Controle de Admissão de Chamadas (CAC) para fornecer QoS para diferentes classes de serviço. Segundo [2], um esquema de CAC objetiva manter QoS para diferentes chamadas (ou usuários) no nível desejado, limitando o número de novas chamadas no sistema. O CAC adotado neste trabalho baseia-se na utilização de *thresholds*, que são limites estabelecidos para restringir o uso dos recursos disponíveis no sistema, sendo que, quando um *threshold* é alcançado, o acesso de um determinado serviço é negado. O modelo de CAC adotado neste trabalho é denominado *multi-threshold*, por utilizar mais de um limite para restringir o uso dos recursos do sistema. Outras aplicações podem ser encontradas em [3], [4] e [5], onde este conceito foi estudado recentemente para aplicações em redes celulares.

Considera-se que a solução de conectividade que utiliza uma rede WiMax associada a redes WiFi ajuda a democratizar o acesso à Internet em determinadas localidades, possibilitando o atendimento de uma grande parte da população que hoje se encontra a margem dessa realidade tecnológica.

0.1 Motivação

O acesso à Internet é altamente dependente das tecnologias utilizadas nas redes de comunicação e ainda é limitado a uma parcela da população, com maior concentração nos grandes centros urbanos. Percebe-se que o acesso ainda não é democrático, uma vez que populações mais isoladas em cidades do interior, principalmente da Amazônia, quando possuem acesso, não dispõem de um serviço de qualidade. A procura por alternativas de conectividade se justifica em muitas regiões, principalmente no norte do Brasil, tendo em vista a falta de infra-estrutura cabeada na maioria das cidades do interior, devido, entre outros fatores, ao aspecto geográfico, uma vez que muitas dessas cidades situam-se em áreas cercadas por florestas, regiões alagadas (várzeas) e rios, o que dificulta muito o acesso físico.

A solução de conectividade que utiliza uma rede WiMax como *backbone* para redes WiFi representa uma alternativa para fornecer acesso à população dessas regiões. Essa solução já é utilizada na prática; contudo, tal como é usada hoje, apresenta um problema decorrente da integração das referidas redes: como garantir QoS para as redes WiFi, observando-se a possibilidade de utilização de diferentes classes de serviço, e a possível presença de outros nós WiMax na rede? Uma solução baseada em CAC pode contribuir para a solução desse problema, uma vez que políticas de admissão de chamadas estabelecem critérios para a utilização dos recursos de um sistema. A partir da proposta de um CAC para a integração da rede, podem ser realizados estudos para avaliar o desempenho dessa proposta verificando sua possível aplicação.

0.2 Objetivo

Esse trabalho objetiva estudar a integração de redes WiMax e WiFi, propondo um CAC que possibilite definir QoS para classes de serviços previstas no padrão IEEE 802.16, que especifica redes metropolitanas sem fio, juntamente com o tráfego proveniente de uma rede IEEE 802.11, padrão para redes WiFi. É proposto um CAC no qual são levadas em consideração as classes de serviço estabelecidas no WiMax (UGS, rtPS, nrtPS, BE), que serão abordadas no Capítulo 1, juntamente com tráfego WiFi em tempo real e melhor esforço.

O CAC proposto atribui uma maior prioridade ao tráfego da rede sem fio local e atende às diferentes classes de serviço na seguinte ordem de prioridade: WiFi em tempo real, UGS, PS (rtPS e nrtPS), WiFi e WiMax de melhor esforço. Esse modelo privilegia

o tráfego em tempo real, partindo da rede local no sentido de compensar a ausência de um suporte de QoS no padrão IEEE 802.11.

Para essa integração, considera-se crucial a utilização do CAC, pois esse permite estabelecer mecanismos de QoS para as diferentes classes de serviço, observando-se os requisitos de tráfego da rede WiFi.

0.3 Contribuições do trabalho

Propõe-se um controle de admissão de chamadas (CAC), o qual utiliza múltiplos *thresholds* para alocação de recursos para as classes de serviço do padrão WiMax, juntamente com o tráfego WiFi de alta e baixa prioridade, garantindo níveis de prioridade na alocação desses recursos. Para a viabilização da avaliação de desempenho do esquema proposto, é utilizada uma cadeia de Markov a tempo contínuo como abordagem para modelagem de sua dinâmica, tendo em vista as especificidades do problema, como exposto no Capítulo 2. São realizados estudos utilizando valores diferentes de *thresholds*, bem como uma comparação entre o modelo proposto e um modelo de compartilhamento total, no qual todos os recursos do sistema estão disponíveis para todas as classes de serviço.

0.4 Trabalhos relacionados

Em [3], é proposta uma política de CAC e um esquema de alocação de recursos que permite que provedores de serviço gerenciem a largura de banda de uma célula WiMax entre redes WiFi e a sua *Subscriber Station* (SS). Esse esquema segue a idéia de *multi-threshold*, que tem sido estudada recentemente em redes celulares [3], [4] e [5]. A política de CAC proposta leva em consideração tráfego de voz e dados, dividindo o número total de canais C , reservando T_1 canais exclusivamente para tráfego WiMax e WiFi de voz (área somente de voz) e T_2 canais exclusivamente para tráfego WiMax e WiFi de dados (área somente de dados). Os demais canais ($C - T_1 - T_2$) são compartilhados por ambos tipos de tráfego e redes. O CAC proposto nessa dissertação, que será apresentado em detalhes no Capítulo 2, diferentemente do trabalho acima referido, atribui uma maior prioridade ao tráfego da rede sem fio local e visa a atender às diferentes classes de serviço da rede WiMax na seguinte ordem de prioridade, da mais alta para a mais baixa: WiFi em tempo real, UGS, PS (rtPS e nrtPS), WiFi e WiMax de melhor esforço, utilizando três *thresholds* e dividindo o número de canais em quatro áreas de admissão.

Em [6], são discutidas questões relacionadas à adaptação de protocolos, quali-

dade de serviços (QoS) e alocação de recursos em uma rede integrada WiMax/WiFi. Tais questões consistem no fato de as redes WiFi e WiMax possuírem diferentes arquiteturas de protocolos e mecanismos de suporte a QoS, o que exige uma adaptação para interconexão dessas redes. Em relação especificamente à QoS e alocação de recursos, vale ressaltar as diferenças entre as tecnologias WiMax e WiFi. Enquanto WiMax possui esse recurso implementado em classes de serviço como: *UGS*, *rtPS*, *nrtPS* e *BE*, definidas no padrão IEEE 802.16, e, ainda, *ertPS*, padrão IEEE 802.16e, que serão abordadas no Capítulo 1; o WiFi suporta dois tipos de tráfego: de alta e baixa prioridade, padrão IEEE 802.11e.

Um esquema de CAC é proposto em [7] para redes WiMax móveis, baseado em classes de serviço, para suportar requisitos diferenciados de QoS, denominado QTBR. São utilizados quatro *thresholds* que dividem o número total de canais disponíveis em cinco áreas e são empregados para limitar o número de canais disponíveis nos quais uma chamada de determinada classe de serviço pode ser aceita. O esquema privilegia *handover* de chamadas de qualquer classe, seguido de novas chamadas UGS, rtPS, nrtPS e BE, em ordem descendente devido aos seus requisitos originais de QoS. A diferença entre o CAC proposto nesta dissertação e o apresentado no artigo supracitado reside na não diferenciação do tráfego de alta e baixa prioridade. As classes de serviço utilizadas também diferem, haja visto que é definida uma classe de serviço *Mixed On-going Service (MOgS)* para tratar *handover* das demais classes.

Em [8], é proposto um CAC para redes sem fio móveis que integram voz e dados, baseado na política de canal de guarda (GC), o qual reserva uma quantidade de recursos para uma determinada classe de serviço. São adotadas como classes de serviço: nova chamada de voz, nova chamada de dados, *handoff* de voz e *handoff* de dados. O CAC referido baseia-se na utilização de três *thresholds*, os quais são usados para reservar canais de rádio. Direcionado a redes celulares, como diferença do CAC proposto nesta dissertação, ele não define tráfego de alta e baixa prioridade, mas visa a reduzir o bloqueio de *handoff* de voz através da reserva de recursos para essa classe de serviço.

O CAC é um assunto largamente estudado na literatura. Várias soluções e abordagens computacionais têm sido usadas para resolver o controle de admissão, como: Lógica Fuzzy [9, 11], Algoritmos Genéticos [9], Redes Neurais [11], *buffers* e *thresholds* [10].

0.5 Organização do trabalho

Esse trabalho foi organizado como segue. No Capítulo 1, são apresentadas as redes sem fio WiMax e WiFi, destacando-se suas arquiteturas e camadas. No Capítulo 2, é apresentada uma visão geral da Avaliação de Desempenho, são discutidas técnicas e métodos, assim como, é abordado o CAC objeto desse trabalho bem como sua modelagem analítica. Os resultados são dissecados no capítulo 3, no qual é apresentada uma comparação das políticas *multi-threshold* e de compartilhamento total, bem como uma comparação com alguns conjuntos de valores para os *thresholds*. Finalizando o trabalho, são apresentadas as conclusões e considerações finais.

0.6 Publicações

Parte dos resultados mostrados nesta Dissertação foram previamente publicados ou aceitos para publicação em conferências nacionais e internacionais. Eles podem ser encontrados nos seguintes artigos:

- Conferências:

1. W. A. Gabler, G. H.S. Carvalho, C. R. L. Francês, J. C. W. A. Costa, S. V. Carvalho. Análise de Tráfego para a Integração de Redes Sem Fio WiMax/WiFi: uma Abordagem Usando Cadeia de Markov. XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT'08, 02-05 de Setembro de 2008, Rio de Janeiro, RJ.
2. W. A. Gabler, G. H.S. Carvalho, J. C. W. A. Costa. Controle de Admissão para Integração de Redes Sem Fio WiMax/WiFi: uma Abordagem com Múltiplos *Thresholds*. 7th International Information and Telecommunication Technologies Symposium (I2TS 2008), 03-05 de Dezembro de 2008, Foz do Iguaçu, PR.

Capítulo 1

Redes Sem Fio

Neste capítulo são apresentadas as tecnologias de redes alvo deste trabalho. É feita uma breve classificação das redes sem fio quanto a sua área de cobertura e quanto a forma de conexão e compartilhamento. A seguir, são abordadas as redes WiFi e WiMax, considerando sua evolução, seus principais padrões e suas características. Também são feitas considerações acerca da integração dessas duas tecnologias.

1.1 Preliminares

O termo redes sem fio refere-se a uma vasta área de padrões e aplicações que envolvem desde recepção de TV por assinatura a comunicação entre um *notebook* e uma impressora. Uma tecnologia de redes sem fio que evoluiu bastante nas últimas décadas foi a de telefonia celular, que passou de analógica para digital; de transmissão de voz, depois incorporando transmissão de dados e, agora, para a nova geração (4G) com transmissão em banda larga.

As redes de satélites, como GPS, TVs por assinatura e internet rural, dentre outros, fornecem um bom panorama de como as tecnologias de redes sem fio estão presentes em nosso dia a dia e como ocupam cada vez mais espaço. Tais redes podem ser consideradas WWANs - *Wireless Wide Área Network*, já que rompem as barreiras geográficas, interligando dispositivos a distâncias que muitas vezes são superiores a cidades e países. Esses tipos de redes não serão abordados nesse trabalho e, sim, as tecnologias direcionadas a uma área geográfica mais limitada.

Segundo [12], as redes de dados sem fio podem ser categorizadas de acordo com sua área de cobertura, Figura 1.1.

- *Wireless Local Area Networks* (WLANs) - projetadas para prover acesso sem fio em áreas com raio de cerca de centenas de metros, sendo usadas em ambientes domésticos ou no escritório;
- *Wireless Metropolitan Area Networks* (WMANs) - cobrem áreas maiores, como uma cidade;
- *Wireless Wide Area Networks* (WWANs) - cobrem áreas maiores do que cidades.

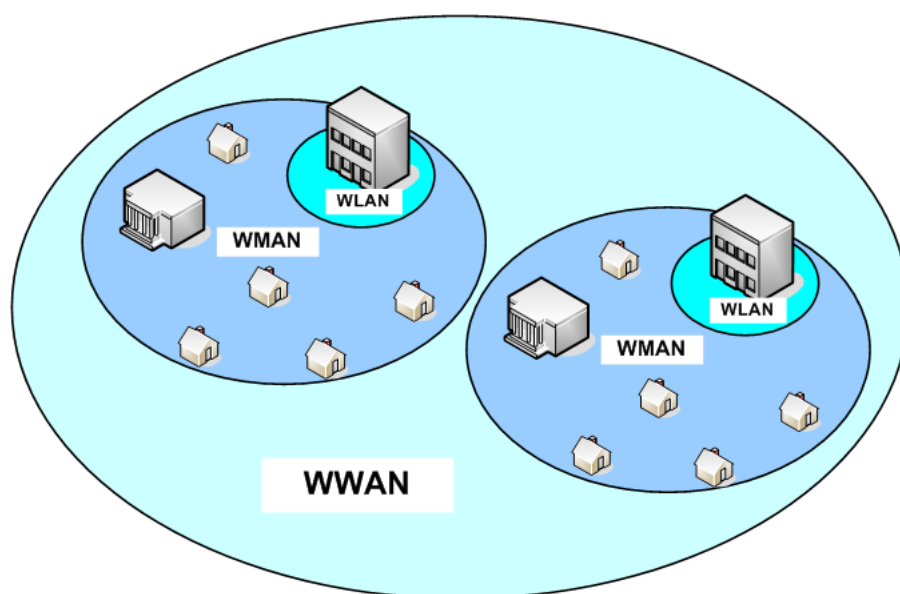


Figura 1.1: Área de cobertura de diferentes tecnologias sem fio [12].

Com base nesses conceitos, serão abordados dois padrões que implementam conectividade para redes locais e metropolitanas.

1.2 Redes WiFi

1.2.1 Evolução do Padrão

Uma rede sem fio local é um sistema de transmissão de dados projetado para fornecer acesso de rede, independente da localização entre dispositivos computacionais, usando ondas de rádio [13]. O termo WiFi é utilizado para referenciar o padrão IEEE 802.11, o qual apresenta algumas variações que serão abordadas a seguir. O padrão IEEE 802.11 surgiu em 1990,[1], de um comitê formado pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE), com o objetivo de padronizar redes sem fio locais. Na

tabela 1.1, pode-se observar as especificações originais do padrão IEEE 802.11 com suas características básicas.

Tabela 1.1: Especificações originais do IEEE 802.11: Características básicas [15].

Espectro	2.4GHz
Taxa física máxima	2 Mbps
Taxa máxima de dados	1.5 Mbps
MAC	CSMA/CA
Suporte de rede	Redes locais IEEE 802 e outras

O padrão IEEE 802.11b ficou popularmente conhecido como WiFi proveniente de *Wireless Fidelity*, nome dado pela *WiFi Alliance*. O padrão IEEE 802.11b é projetado para taxas de transmissão até 11 Mbits/s. Os padrões IEEE 802.11a, baseado em OFDM na banda de 5 GHz, e IEEE 802.11g, que utiliza a banda de 2.4 GHz [14] ambos suportam taxas máximas de 54 Mbits/s. Já do padrão IEEE 802.11n espera-se que alcance taxas de 108 Mbits/s [13]. O padrão IEEE 802.11e implementa dois mecanismos para suporte de aplicações com Qualidade de Serviço (QoS). O primeiro, projetado com uma função de coordenação (EDCF), é baseado em prioridades diferenciadas nas quais o tráfego é entregue. No segundo, é reservada a oportunidade de transmissão através do mecanismo de coordenação (HC)[1]. O IEEE 802.11i implementa melhorias na segurança do padrão e o IEEE 802.11s apresenta suporte para topologia de redes *Mesh* [12]. Na Tabela 1.2, são listados alguns padrões já publicados.

Com relação a transmissão das redes WiFi, pode-se dizer que varia de acordo com a distância, quanto mais distante da estação de base, menor a qualidade do sinal; além disso o uso *indoor* ou *outdoor* e outros fatores, como obstáculos, condições meteorológicas e interferências causadas por outros aparelhos que utilizam microondas, também interferem na qualidade do sinal. O alcance do conjunto pode ser aprimorado com o posicionamento da estação base, a utilização de antenas externas (*outdoor*) direcionais, que correspondem a várias vezes o alcance de antenas omnidirecionais; no entanto, restringem a mobilidade.

Na tabela 1.3, são apresentados requisitos para os equipamentos WiFi.

Tabela 1.2: Alguns padrões da família IEEE 802.11 já publicados[12].

Padrão	Propósito	Data de Publicação
802.11	2Mbps, 2,4 GHz standard (padrão original)	1999
802.11a	54 Mbps, 5 GHz phy layer standard	1999
802.11b	11 Mbps, 2,4 GHz phy layer standard	1999
802.11d	<i>International roaming extensions</i> para banda de 5 GHz	2001
802.11e	Aprimoramentos de QoS	2005
802.11g	54 Mbps, 2,4 GHz PHY layer standard (padrão atual)	2003
802.11h	<i>Spectrum managed</i> 802.11a para compatibilidade de satélite e radar	2004
802.11i	Aprimoramentos de segurança	2004
802.11j	Extensão para Japão	2004

1.2.2 Arquitetura de uma rede IEEE 802.11

Segundo [15], as entidades de uma rede IEEE 802.11 consistem em: estação (*Station - STA*) que, em geral, pode ser uma estação móvel que utilizará a conexão; ponto de acesso (*Access Point - AP*), que consiste em uma estação de retransmissão de tráfego central que pode atuar como coordenador de um grupo de estações; e Portal (PO), que é um tipo de ponto de acesso especial que conecta a rede sem fio a outro tipo de rede 802.x, como, por exemplo, uma rede Ethernet.

Pode-se considerar como arquiteturas para uma rede sem fio IEEE 802.11 as definições a seguir: um *Basic Service Set* (BSS), bloco básico de uma rede sem fio IEEE 802.11, que consiste em um conjunto de estações (STA); e, eventualmente, um ponto de acesso (AP). Quando, em um BSS, tem-se duas estações (STA) que podem se comunicar diretamente, denominamos esse modo de operação de rede *ad hoc*. Nesse sentido, as STA podem se conectar para troca de arquivos, ou outro tipo de comunicação, sem a necessidade de uma estruturação *a priori*. Por esse motivo, é denominada *Independent BSS* (IBSS)[15, 1]. Uma *Infrastructure BSS*, ou um conjunto de serviço básico estruturado, consiste na utilização de um AP para coordenar o BSS.

Tabela 1.3: Especificações da Tecnologia WiFi[13].

No.	Requisitos para tecnologia WiFi
1.	Laptop/Desktop/PDA
2.	Adaptador 802.11a para Desktop/Laptop
3.	Adaptador 802.11b para Desktop/Laptop
4.	Adaptador 802.11g para Desktop/Laptop
5.	<i>Access Point</i> 802.11a/b/g (ambiente interno)
6.	<i>Access Point</i> 802.11a/b/g (ambiente externo)
7.	<i>Switch</i> sem fio 802.11a/b/g
8.	<i>Dongle USB Port</i> 802.11a/b/g
9.	<i>Media Player</i> sem fio
10.	<i>Gateway</i> sem fio
11.	Antena para ambientes internos e antena para exterior
12.	<i>Bridge</i> sem fio
13.	Câmera sem fio
14.	<i>Range Booster</i>

Outro conceito importante é o de *Distribution System* (DS) [15, 1] o qual se refere a um tipo de *backbone* que interliga dois ou mais BSS. Uma WLAN toda interconectada (alguns BSS e um DS) é identificada pelo IEEE 802.11 como uma simples rede sem fio, chamada *Extended Service Set* (ESS).

Na Fig. 1.2 observa-se um exemplo de arquitetura 802.11.

1.2.3 Camadas PHY e MAC

No padrão original, a camada PHY pode ser implementada escolhendo-se entre três possibilidades: *Frequency hopping (FH) spread spectrum*, *Direct sequence (DS) spread spectrum* e Infrared (IR); como mostra a Fig. 1.3. Na Tabela 1.4, são apresentadas especificações da camada PHY para os três tipos de implementação: FH, DS e IR.

O padrão IEEE 802.11 tem como método fundamental de acesso do MAC a *Distributed Coordination Function (DCF)* conhecida como *Carrier-sense Multiple Access with Collision Avoidance (CSMA/CA)*. Um nó da rede, antes de transmitir, verifica o

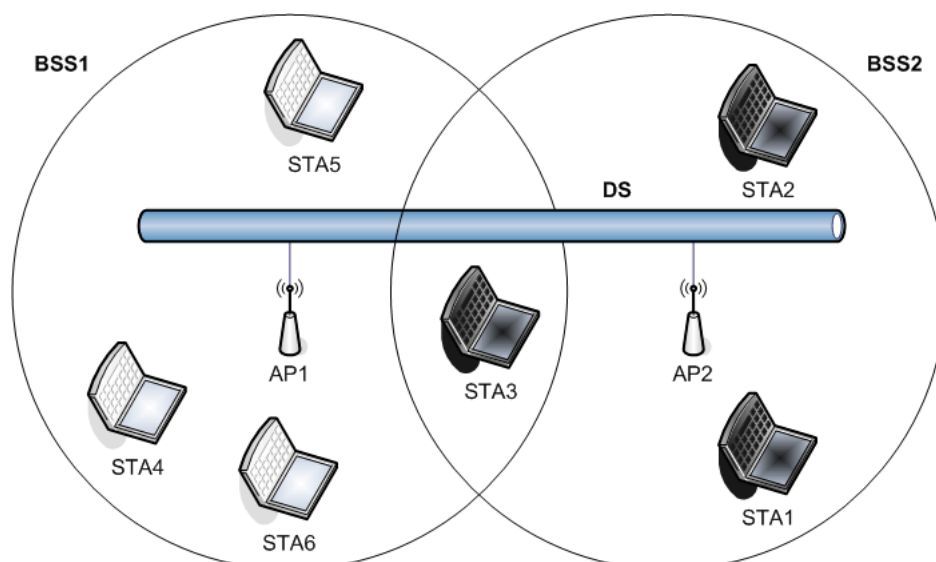


Figura 1.2: *Extended Service Set (ESS)*.

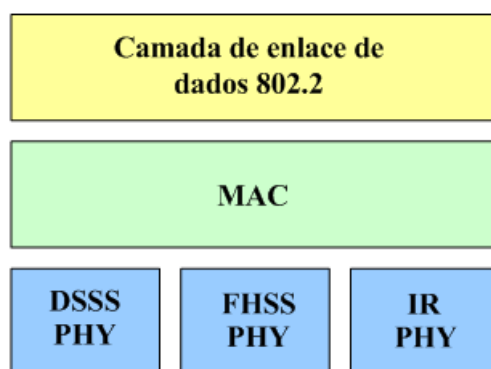


Figura 1.3: Pilha do padrão 802.2.[15]

meio. Se o meio estiver livre por um determinado intervalo de tempo, chamado *Distributed Interframe Space (DIFS)*, ele realiza a transmissão. Se o meio estiver ocupado devido a uma transmissão de outro nó da rede, é executado um algoritmo de *backoff* dentro de uma *Contention Window (CW)*.

Os DIFS são divididos em *slots* temporais, cuja duração depende do meio físico usado. Para cada transmissão, os valores dos intervalos são gerados aleatoriamente, seguindo uma distribuição uniforme na faixa $[0, CW]$. A CW começa com um valor mínimo e é incrementada em potência de dois até seu valor máximo. O algoritmo de *backoff* é executado sempre que: a STA percebe que o meio está ocupado, depois de cada transmissão e depois de cada retransmissão. Após o recebimento do pacote no destino, o protocolo solicita confirmação através de um *frame ACK*. Os *frames Request to Send (RTS)* e *Clear*

Tabela 1.4: Especificações da camada PHY.[15]

	FH	DS	IR
Espectro	2.4 GHz Primeiro canal a 2.402	2.4 GHz	<i>Diffuse infrared</i> (comprimento de onda de 850 a 950 nm)
<i>Subcarrier</i>	1 MHz de amplitude	11, 13, ou 14 subcanais, cada um de 22 MHz	
Taxa física	1 e 2 Mbps	1, 2, 5.5, e 11 Mbps	1 e 2 Mbps
Modulação	2GFSK, 4GFSK	DBPSK, DQPSK, CCK (IEEE 802.11b)	16 <i>pulse position modulation</i> (PPM) e 4 PPM
Outro	<i>Hop</i> de 79 canais	<i>11-chip Barker sequence</i>	Transmissão não direcional

to Send (CTS) contém informação sobre o período em que o meio ficará reservado para a transmissão atual. O *Network Allocation Vector (NAV)* mantém uma previsão do tráfego futuro na rede, baseado nas informações colhidas da rede.

1.3 Redes WiMax

1.3.1 Evolução do Padrão

Em 1998, o IEEE formou um grupo chamado 802.16 para desenvolver um padrão para redes metropolitanas sem fio, que foi aprovado em dezembro de 2001 [16]. O padrão IEEE 802.16 aborda redes metropolitanas sem fio (*Wireless MAN*) e ficou mundialmente conhecido como WiMax (*Worldwide Interoperability for Microwave Access*). As redes WiMax visam fornecer acesso sem fio a prédios e estações móveis, comunicando-se

com uma estação base central através de enlace de rádio. O padrão objetiva fornecer um alcance maior para as estações móveis, além de ampliar a largura de banda, permitindo que diversos tipos de aplicações sejam implementadas. Além de permitir benefícios [16], como navegação rápida na Web e *downloads* rápidos, possibilita, também, diversas aplicações multimídia, como *stream* de áudio e vídeo em tempo real, conferências multimídia, jogos interativos, telefonia IP, TV de alta definição e vídeo sob demanda[17], dentre outras.

Segundo [19], a primeira versão, IEEE 802.16-2001, foi lançada em abril de 2002 com o objetivo de operar na faixa de frequência de 10-66 GHz. A versão ativa atualmente, IEEE 802.16-2004, foi lançada em outubro de 2004 e opera nas frequências entre 2 e 11 GHz. Em dezembro de 2005, foi aprovado pelo IEEE o padrão 802.16e, adicionando mobilidade ao 802.16-2004.

1.3.2 Arquitetura de uma rede IEEE 802.16

A arquitetura de uma rede WiMax consiste em uma estação base (base station - BS) comunicando-se com as estações de assinante (subscriber station - SS), as quais podem estar distribuídas dentro de uma área geográfica como uma cidade ou zona rural, e podem atender prédios comerciais, residências, pequenas e médias indústrias, campus universitários, escolas, hospitais, etc. A BS pode estar conectada a rede pública no sentido de oferecer acesso a Internet às SSs que fazem parte da rede. Para que o tráfego chegue às SSs ele deve passar pela BS. Na Fig. 1.4 é possível visualizar a arquitetura de uma rede WiMax.

O padrão permite três modos de operação [22]: ponto multiponto (PMP), *Mesh* distribuído e *Mesh* centralizado. No modo PMP o link opera com uma BS central e uma antena setorial a qual é capaz de atender a múltiplos setores independentes simultaneamente [24], o tráfego somente ocorre entre a BS e as SSs. Nos modos *Mesh* o tráfego pode ser roteado através de outra SS, e pode ocorrer diretamente entre SSs. Dentro de uma rede *Mesh* um sistema que tem uma conexão direta com uma rede externa é denominado *Mesh BS*, todos os demais são denominados *Mesh SS*.

O suporte a QoS é um dos pontos fortes dessa tecnologia. O padrão IEEE 802.16 é implementado através de classes de serviço, nas quais o tráfego da rede é classificado de acordo com parâmetros de QoS que devem ser negociados no estabelecimento da conexão entre a SS e a BS. No padrão são suportadas quatro classes de serviço [17]:

- *Unsolicited Grant Service (UGS)* - projetado para suportar tráfego de dados de

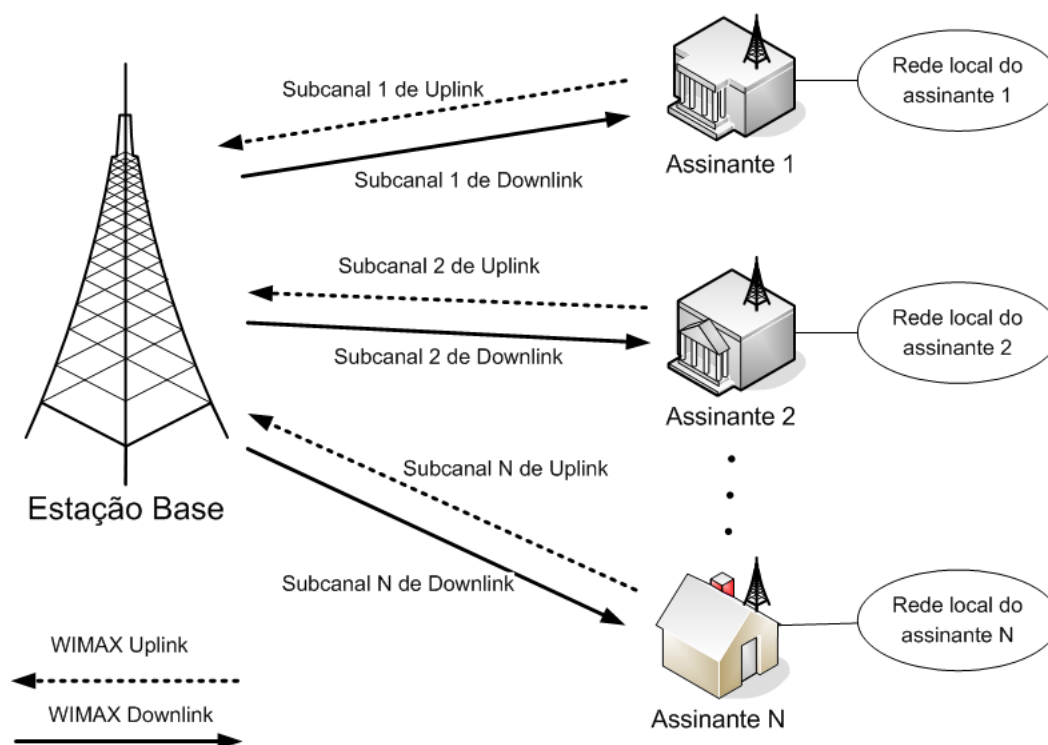


Figura 1.4: Rede WiMax ponto-multiponto.[7]

tempo real, no qual os pacotes de dados são de tamanho fixo e produzidos a intervalos periódicos;

- *real-time Polling Service (rtPS)* - projetado para suportar tráfego de dados de tempo real, no qual os pacotes de dados são de tamanho variável e produzidos a intervalos periódicos;
- *non-real-time Polling Service (nrtPS)* - projetado para suportar tráfego de dados tolerante a atraso, no qual os pacotes de dados são variáveis e para os quais o mínimo de taxa de dados é requerida;
- *Best Effort (BE)* - projetado para suportar tráfego de dados para os quais o mínimo de garantia de serviço é requerida e pode ser atendido pelos recursos restantes disponíveis.

Segundo [20], os requisitos das classes de serviço são: UGS - banda garantida, sem a necessidade de solicitações periódicas; rtPS - a SS recebe, em intervalos fixos, a oportunidade de solicitar banda à BS; nrtPS - a SS recebe, em intervalos variáveis, a oportunidade de solicitar banda à BS; e, BE - utiliza a banda restante.

Um novo serviço, denominado *enhanced rtPS (ertPS)*, foi definido no padrão IEEE 802.16e para suportar melhor o tráfego em tempo real, o qual gera pacotes de dados

de tamanho variado de forma periódica [22, 17].

1.3.3 Camadas PHY e MAC

O padrão IEEE 802.16 [24] especifica como frequências de operação a faixa 10-66 GHz e 2-11 GHz IEEE 802.16e [25], sendo que os perfis de certificação definidos inicialmente pelo Forum WiMax foram na faixa de frequências de 3.5 GHz (licenciada) e 5.8 GHz (não licenciada) [26]. As taxas de dados definidas para o padrão estão entre 32 e 130 Mbps, dependendo da amplitude de frequência do canal e o esquema de modulação utilizados [22]. Já a transmissão, pode ocorrer com linha de visada (LOS), com alcance em tese de até 50 km, ou sem linha de visada (NLOS), no caso das versões 802.16a/d/e [19], o que consiste em uma grande vantagem tendo em vista possíveis obstruções entre os pontos da rede.

Para as bandas na faixa de 10-66 GHz, o padrão define uma interface aérea com portadora simples chamada WirelessMAN-SC, já para o PHY projetado para a faixa de frequências de 2-11 GHz são especificadas três interfaces aéreas [26]:

- *WirelessMAN-SCa* - a qual utiliza modulação para portadora simples;
- *WirelessMAN-OFDM (orthogonal-frequency division multiplexing)* - a qual utiliza OFDM de 256 portadoras. Essa interface aérea fornece acesso múltiplo para diferentes estações através da acesso múltiplo por divisão de tempo (TDMA);
- *WirelessMAN-OFDMA (orthogonal-frequency division multiple access)* - o qual utiliza um esquema OFDM com 2.048 portadoras. A interface fornece acesso múltiplo, atribuindo um subconjunto de portadoras para um receptor individual.

Segundo [16], a multiplexação por divisão de frequência (OFDM), permite dados em alta velocidade, vídeo, e comunicações multimídia e é usada por uma variedade de sistemas de banda larga comerciais como: DSL, WiFi, DVB-H, além do WiMax . Esse esquema consiste na divisão de um *stream* de dados de alta taxa de bits, em vários *streams* paralelos, sendo que cada um é modulando em portadoras separadas, também chamadas de *subcarriers*.

Em relação a camada MAC, segundo [26], é projetada para servir estações distribuídas de forma dispersa com altas taxas de dados, sendo que, uma estação base pode atender uma grande quantidade de clientes. O sistema utiliza duplexação, que consiste na transmissão e recepção concorrentes, e pode ser implementada como: duplexação por

divisão do tempo (TDD) e duplexação por divisão de frequência (FDD). Na TDD, a estação transmite então recebe (ou vice-versa) mas não ao mesmo tempo. Na FDD, a estação transmite e recebe simultaneamente em diferentes canais.

1.4 Considerações sobre a Integração das Redes Sem Fio WiMax e WiFi

A grande vantagem na integração WiMax/WiFi reside em combinar seus pontos fortes e possibilitar uma estrutura de comunicação de dados a um custo aceitável, oferecendo QoS ao usuário. Na tabela 1.5 é apresentado um resumo das características de cada tecnologia, a qual nos permite compará-las. Na literatura, observam-se duas abordagens para a integração das redes WLAN/WMAN: fracamente e fortemente acoplada [23]. Na arquitetura fracamente acoplada, poucas mudanças são necessárias em ambas as redes. Estas são ligadas em nível de camada IP, permanecendo o tráfego de ambas separado e as redes interligadas por meio de *gateways*. Na arquitetura fortemente acoplada, uma rede tenta emular o funcionamento da outra. O tráfego da rede WiFi passa pela rede WiMax que atua como uma rede de distribuição. Nesse caso, a QoS se torna um fator crítico, pois o tráfego da WLAN concorre com as demais estações da WMAN.

Na presente Dissertação, é considerado um sistema fortemente acoplado, tendo em vista que sua integração possibilita diversos tipos de aplicações, dentre as quais podemos citar: a utilização de uma rede WiMax, interligando diversas redes WiFi, no intuito de oferecer acesso à Internet para a população das cidades isoladas, principalmente no interior da Amazônia. Outro fator importante consiste no uso dos recursos das redes em sistemas fortemente acoplados, nos quais o controle dos recursos pode ser realizado pela BS WiMax, nesse caso, existirá uma disputa pelos recursos entre o tráfego proveniente das WLANs e das SSs. Nesse contexto, o uso do CAC, para disciplinar o acesso aos recursos da rede, é fundamental, no sentido de oferecer QoS para os usuários da rede, tendo em vista que o tráfego das redes WiFi que atendem a várias estações deve ver favorecido.

Duas políticas para controle de acesso podem ser: Compartilhamento Total (CT), o qual permite que todos os tipos de tráfego tenham o mesmo acesso a largura de banda disponível na BS; e Particionamento Completo (PC), o qual divide a largura de banda em partições, cada uma reservada para um tipo de tráfego. Neste trabalho, adotamos uma política que consiste no meio termo entre as apresentadas, denominada Multi-Threshold (MT), [3, 4, 6, 7, 5, 8], que será descrita no Capítulo 2.

Tabela 1.5: Comparação de tecnologias WiFi e WiMax [13]

Tecnologia	WiFi 802.11n	WiMax
Aplicação	Rede local sem fio, Internet	Conectividade para Internet em Banda Larga
Alcance típico	100m	50km
Faixa de Frequência	2.4 Ghz	2-11 GHz
Taxa de Dados	54-108Mbps	75Mbps
Modulação	DSSS	QAM
Rede	IP e P2P	IP
Topologia	Infraestruturada e (<i>Ad-hoc</i> também possível)	Infraestruturada
Protocolo de Acesso	CSMA/CA	Request/Grant
Atributos chave	Maior largura de banda, flexibilidade	Vasão e cobertura

Capítulo 2

Modelagem e Avaliação de Desempenho

Neste capítulo, são abordados aspectos genéricos relacionados à modelagem e avaliação de desempenho de sistemas, e a seguir é apresentada a modelagem do CAC proposto no trabalho. Inicialmente, é discutido o processo de modelagem de sistemas, fundamental para a realização do estudo. Na seqüência, são apresentadas as técnicas e é introduzida uma abordagem sistemática para a avaliação de desempenho. A seguir, são feitas considerações sobre a política de CAC objeto do trabalho destacando-se as condições de admissão para as classes de serviço. Em seguida, são feitas considerações acerca do tráfego do sistema. Finalmente, é apresentada a modelagem e são destacadas as métricas adotadas para a avaliação de desempenho.

2.1 Preliminares

Este trabalho é focado em uma política de Controle de Admissão de Chamadas, baseado em classes de serviço distintas, destinada à integração de redes WiFi e WiMax, visando prover QoS para o tráfego proveniente de ambas as redes e, como a simples definição da política de CAC não garante sua eficácia, é necessário que o modelo seja investigado através do estudo de cenários, utilizando-se a técnica mais adequada, no sentido de observar se este atende aos requisitos propostos.

2.2 Princípios da Modelagem

Segundo [28], pode-se entender um modelo, dentro de um contexto de avaliação de desempenho, “como uma abstração do sistema a ser analisado, o qual inclui, em diferentes níveis de detalhes, dependendo da solução a ser empregada, os principais elementos e eventos condizentes ao comportamento do sistema, e que ao mesmo tempo são relevantes na sua análise”.

O processo de modelagem pode seguir as seguintes etapas [28, 29]:

1. **Especificação** : cria-se uma representação condizente com o sistema real, com os principais componentes e relações entre eles, relevantes para a avaliação de desempenho.
2. **Parametrização**: consiste em fornecer os valores de entrada para as variáveis do modelo apresentado.
3. **Solução**: aplicação de uma técnica de avaliação de desempenho para obtenção dos resultados.
4. **Apresentação dos resultados**: através de textos explicativos, gráficos, tabelas, etc.

Neste trabalho, foram seguidas fielmente essas etapas, a fim de se obter resultados confiáveis. Na Fig. 2.1, é apresentado um diagrama de fluxo com as etapas da modelagem seguidas neste trabalho.

2.3 Processo de avaliação de desempenho

A avaliação de desempenho é um processo, na qual se definem métricas a partir das quais, é possível apresentar diagnósticos acerca do comportamento do sistema em questão. Essa avaliação é de suma importância, pois possibilita analisar, comparar e definir parâmetros ótimos para sistemas em desenvolvimento.

2.3.1 Técnicas para avaliação de desempenho

Existem três técnicas de avaliação: modelagem analítica, simulação e aferição. A escolha da técnica a ser utilizada depende de em qual estágio do ciclo de vida do sistema

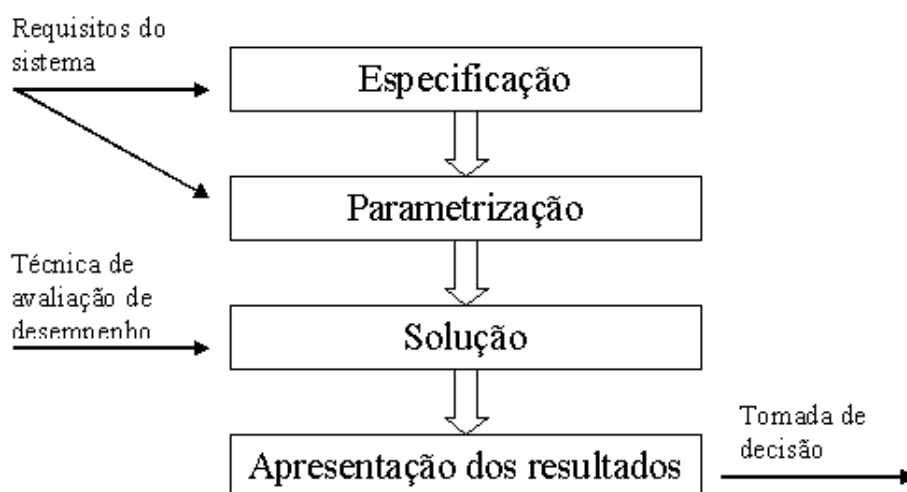


Figura 2.1: Etapas da Modelagem

este se encontra. [27]. O ideal em avaliação de desempenho consiste em poder comparar os resultados obtidos com mais de uma técnica, para, assim, poder investigar os resultados. Como critério para escolha da técnica a ser usada, neste trabalho, optou-se pela técnica de modelagem analítica, tendo em vista que ela permite a obtenção das métricas desejadas e porque vem sendo empregada com sucesso no estudo de CAC, como pode ser consultado em [2, 3, 4, 10].

2.3.2 Uma abordagem sistemática para a avaliação de desempenho

Em [27], são apresentados passos que podem ser seguidos, a fim de se realizar uma avaliação de desempenho de maneira sistemática. São eles:

1. *Estabelecer os objetivos e definir o sistema:* O primeiro passo deve ser estabelecer os objetivos do estudo e definir o que faz parte do sistema a partir do delineamento de seus limites.
2. *Listar os serviços e as saídas:* Cada sistema pode prover uma série de serviços, os quais, quando requeridos por um usuário, podem produzir várias saídas possíveis. Identificar os serviços e as saídas possíveis é útil para que se possa determinar as métricas e cargas de trabalho apropriadas.

3. *Selecionar as métricas:* O termo métrica se refere ao critério usado para avaliar o desempenho do sistema.
4. *Listar os parâmetros:* É importante identificar e manter uma lista dos parâmetros que afetam o sistema. Pode-se classificá-los como: parâmetros do sistema e parâmetros da carga de trabalho.
5. *Selecionar os fatores para o estudo:* Os parâmetros podem ser divididos em duas partes: aqueles que irão variar durante a avaliação e aqueles que permanecerão constantes. Os parâmetros que variam são chamados de fatores e seus valores são chamados de níveis.
6. *Selecionar a técnica de avaliação:* A decisão de que técnica de avaliação utilizar depende do tempo e recursos disponíveis e do nível desejado de exatidão. Basicamente existem três principais técnicas para a avaliação de desempenho: modelagem analítica, simulação e medição de um sistema real.
7. *Selecionar a carga de trabalho:* Consiste em definir quais requisições serão feitas ao sistema. Deve representar a utilização do sistema no mundo real.
8. *Projetar experimentos:* Decidir quais serão os experimentos que serão executados no sistema.
9. *Analisar e interpretar os dados:* Interpretar os resultados é o ponto chave do processo de análise. Os resultados fornecem a base com a qual os analistas podem tecer conclusões.
10. *Apresentar os resultados:* É o passo final dos projetos e consiste na comunicação dos resultados para os demais interessados.

2.4 Cadeias de Markov

Para a avaliação do CAC proposto optou-se pela modelagem analítica, considerando uma simplificação do sistema, através de uma cadeia de Markov. Segundo [30], o termo cadeia de Markov surgiu em homenagem ao professor Andrei A. Markov (1858-1922), nascido em Ryazan, Rússia, que foi o primeiro a publicar resultados em 1906 nessa área. Sua pesquisa deu origem as cadeias de Markov que favoreceram o estudo de processos estocásticos com uma grande quantidade de aplicações.

Para [31], um processo estocástico é definido como uma família de variáveis aleatórias $\{X_t : t \in T\}$ onde cada variável aleatória X_t é indexada por parâmetro $t \in T$,

o qual é geralmente chamado de *parâmetro de tempo* se $T \subseteq \mathbb{R}_+ = [0, \infty)$. O conjunto de todos os possíveis valores de X_t (para cada $t \in T$) é conhecido como o espaço de estados S do processo estocástico.

Segundo essa linha de raciocínio, segundo [32], um processo estocástico $\{X(t), t \in T\}$ é um processo de Markov se o estado futuro do processo depende somente do estado presente não importando seus estados passados. Formalmente, um processo estocástico $\{X(t), t \in T\}$ é um processo de Markov a tempo contínuo se para todos $t_0 < t_1 < \dots < t_{n+1}$ do conjunto de índices T e para qualquer conjunto $\{x_0, x_1, \dots, x_{n+1}\}$ do espaço de estados

$$Pr[X(t_{n+1} = x_{n+1} | X(t_0) = x_0, \dots, X(t_n) = x_n] = Pr[X(t_{n+1} = x_{n+1} | X(t_n) = x_n] \quad (2.1)$$

Um processo de Markov é chamado de Cadeia de Markov se seu espaço de estados é discreto [32]. Uma cadeia de Markov a tempo discreto (DTMC) definida por $\{X_k, k \in T\}$ é um processo estocástico o qual o tempo é um conjunto finito ou infinito contável com o conjunto de índices $T = \{0, 1, 2, \dots\}$ obedecendo

$$Pr[X_{k+1} = x_{k+1} | X_0 = x_0, \dots, X_k = x_k] = Pr[X_{k+1} = x_{k+1} | X_k = x_k] \quad (2.2)$$

Para uma cadeia de Markov a tempo contínuo (CTMC) definida por $\{X(t), t \geq 0\}$ com N estados, a propriedade de Markov pode ser escrita como

$$Pr[X(t + \tau) = j | X(\tau) = i, X(u) = x(u), 0 \leq u < \tau] = Pr[X(t + \tau) = j | X(\tau) = i] \quad (2.3)$$

Segundo [28], no caso do tempo discreto, as probabilidades de transição da cadeia de Markov são normalmente dispostas na forma matricial, a qual é chamada de *matriz de transição*, e na cadeia de Markov a tempo contínuo, a representação matricial é chamada de *matriz de taxas ou gerador infinitesimal*, na qual as entradas da matriz são as taxas de transição entre os estados.

Em outras palavras, uma cadeia de Markov pode ser definida como uma sequência de variáveis aleatórias, as quais correspondem a estados de um certo sistema.

2.4.1 Cálculo do estado de equilíbrio (Steady-State)

Cadeias de Markov a tempo discreto e contínuo fornecem paradigmas diferentes de modelagem, cada um com seus próprios domínios de aplicação. O que diferencia uma

CTMC de uma DTMC são as transições de estado que podem ocorrer em momentos aleatórios de tempo, no caso das CTMCs, e não somente em pontos discretos de tempo fixados, no caso das DTMCs.

Segundo [31], as probabilidades do estado de equilíbrio $\nu_i > 0, i \in S$ de uma DTMC podem ser obtidas resolvendo o sistema de equações lineares 2.4.

$$\nu = \nu P, \quad \sum_{i \in S} \nu_i = 1. \quad (2.4)$$

Para CTMC o vetor de probabilidade do estado de equilíbrio π , se existir, pode ser calculado pela solução do sistema linear, Eq.(2.5) limitado pela condição de normalização, Eq.(2.6). Onde a matriz Q contém as taxas de transição.

$$0 = \pi Q. \quad (2.5)$$

$$\pi \mathbf{1} = \sum_{i \in S} \pi_i = 1. \quad (2.6)$$

Tabela 2.1: Características das Técnicas de Avaliação de Desempenho

	Aferição	Modelagem Analítica	Simulação
<i>Disponibilidade do sistema</i>	Só é possível se alguma coisa similar ao proposto já existe. Situações onde é possível medição.	Recomendada se é um novo conceito. Situações onde não é possível medição.	Recomendada é um novo conceito. Situações onde não é possível medição.
<i>Tempo para a análise de desempenho</i>	Levam mais tempo que modelagem analítica e menos do que simulação.	Menos tempo.	Levam muito tempo.
<i>Disponibilidade de ferramentas</i>	Necessitam de ferramentas de medição.	Necessitam de conhecimento de Teoria de Filas, Cadeias de Markov, etc.	Necessitam de conhecimento de linguagens e/ou ferramentas de simulação.
<i>Nível de precisão dos resultados</i>	A precisão pode variar devido à influência de parâmetros ambientais do sistema.	Requer muitas simplificações e suposições o que pode interferir a precisão dos resultados.	Frequentemente mais próximo da realidade por incorporar mais detalhes do sistema.
<i>Custo</i>	Maior custo	Menor custo	Intermediário

Capítulo 3

Modelagem do CAC Proposto

3.1 Preliminares

Neste trabalho, considera-se que a rede WiMax provê o acesso sem fio através de sua BS, como pode ser observado na Fig.3.1. Toda a largura de banda do enlace WiMax é compartilhada entre as suas SS e as redes locais sem fio WiFi. Nesse sentido, o sistema em análise consiste do enlace de rádio WiMax, no qual seus C canais de rádio são, de acordo com a Fig.3.2, divididos em quatro zonas de admissão através do uso de *thresholds*.

Um *threshold*, ou limiar, consiste em um limite estabelecido para restringir o uso ou reservar recursos de um sistema. Quando limite é atingido o acesso a determinado recurso pode ser negado para determinada(s) classe(s) de serviço. Dessa forma os *thresholds* possibilitam a criação de zonas de admissão, mantendo as probabilidades de bloqueio dessas classes dentro de níveis aceitáveis através da reserva dos recursos. Nesse trabalho, adota-se um modelo denominado *multi-threshold*, o qual utiliza três valores: K_{ugs} , K_{ps} e K_{be} , para criação de quatro zonas de admissão de serviços, Fig.3.2. Assim, uma chamada da classe de melhor esforço (WiMax ou WiFi) somente é aceita pelo CAC se a ocupação dos recursos de rádio no enlace for menor que o *threshold* K_{be} . Analogamente, uma chamada da classe PS (rtPS ou nrtPS) somente será aceita se a ocupação dos recursos de rádio for menor que o *threshold* K_{ps} . Uma chamada da classe de serviço UGS será aceita somente se a ocupação dos recursos de rádio for menor que o *threshold* K_{ugs} . Por fim, uma chamada em tempo real oriunda de uma rede local WiFi será aceita enquanto houverem recursos disponíveis. Nota-se que a política adotada pelo CAC privilegia as chamadas em tempo real WiFi em relação às demais classes de serviço da rede. Essa política se justifica pelo fato do padrão IEEE 802.11 (*a*, *b* e *g*) não suportar QoS.

Desse modo, ao liberar todos os canais de rádio para a chamada em tempo real WiFi, o CAC tenta mitigar a ausência de um suporte à QoS dentro da rede local WiFi.

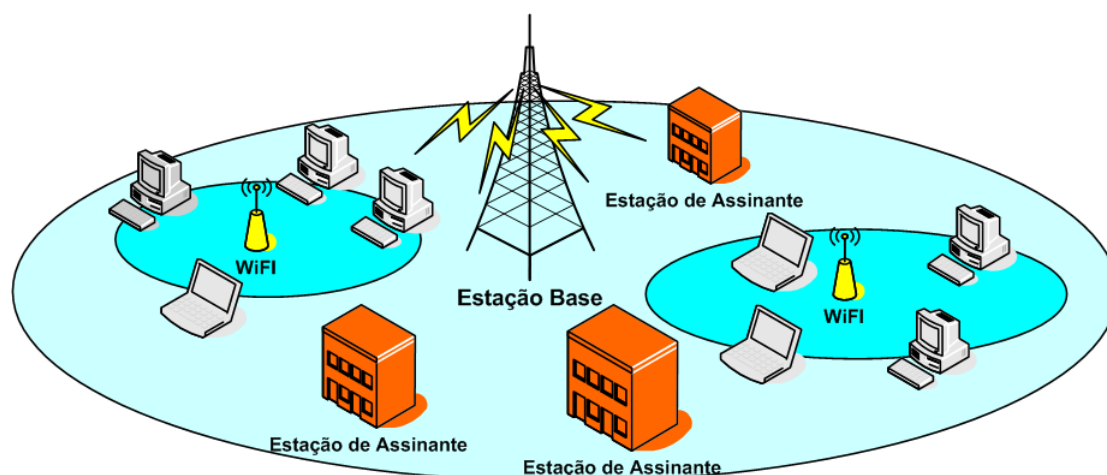


Figura 3.1: Rede WiMax/Wifi fortemente acoplada

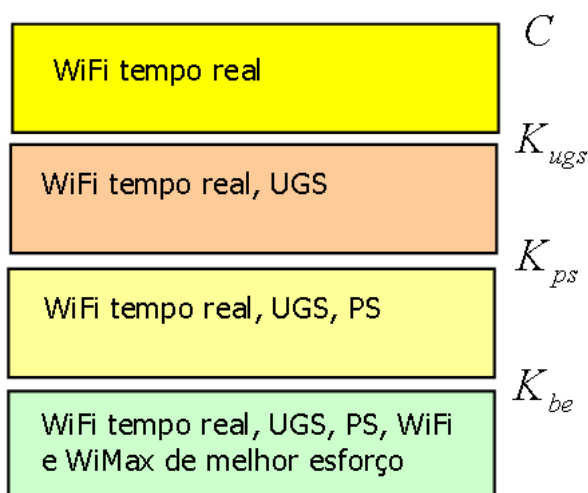


Figura 3.2: Esquema de CAC proposto para integração WiMax/Wifi

3.2 Considerações sobre o Tráfego

Para a confecção do modelo de Markov, utilizado para a avaliação de desempenho da proposta, as classes de serviço foram divididas em dois grandes grupos denominados por: alta e baixa prioridade. Dentro do primeiro grupo, estão as chamadas das classes de serviço: WiFi em tempo real, chamada UGS, chamada PS (rtPS e nrtPS). No segundo grupo, estão presentes as chamadas de melhor esforço WiMax e WiFi. As

chegadas das chamadas WiFi em tempo real, UGS, PS (rtPS e nrtPS), WiFi e WiMax de melhor esforço seguem processos de Poisson mutuamente independentes com taxas média dadas por λ_{wf} , λ_{ugs} , λ_{ps} , λ_{wfbe} e λ_{wxbe} , respectivamente. Por simplicidade, considerou-se que todo fluxo de serviço rtPS e nrtPS está incluído em λ_{ps} .

O tempo de serviço de uma chamada WiFi em tempo real, UGS, rtPS e nrtPS são variáveis aleatórias distribuídas exponencialmente com valores médios dados por $T_{wf} = 1/\mu_{wf}$, $T_{ugs} = 1/\mu_{ugs}$, $T_{rtPS} = 1/\mu_{rtPS}$ e $T_{nrtPS} = 1/\mu_{nrtPS}$. Como resultado, o tempo de retenção de canal para as chamadas desse grupo é também distribuído exponencialmente com média $T_{tr} = 1/\mu_{tr} = 1/(\mu_{wf} + \mu_{ugs} + \mu_{rtPS} + \mu_{nrtPS})$. Para o serviço de melhor esforço, grupo de baixa prioridade, não se faz distinção entre as chamadas vindas de redes locais WiFi ou de SS WiMax, [3], assim, considera-se que o tempo de serviço de uma chamada de melhor esforço é uma variável aleatória exponencialmente distribuída com média $T_{be} = 1/\mu_{be}$.

3.3 Modelagem

Para modelar o esquema de CAC proposto, usou-se uma cadeia de Markov a tempo contínuo com espaço de estados definido como:

$$\phi = \{(i, j) / 0 \leq i \leq C, 0 \leq j \leq K_{be}\} \quad (3.1)$$

onde i é o número de chamadas em tempo real das classes de serviço WiFi em tempo real, UGS e PS; j é o número de chamadas da classe de melhor esforço. A Tabela 3.1 apresenta o modelo markoviano, destacando os eventos que norteiam a dinâmica do sistema, com suas condições e taxas médias.

Segundo [8], a probabilidade de bloqueio de uma nova chamada é a probabilidade de uma nova chamada chegar no sistema e não existirem canais disponíveis para atendê-la, baseado na política de controle de admissão de chamadas proposta.

Para quantificar o desempenho do sistema, utilizaram-se, como critério de avaliação, as métricas apresentadas nas equações de (3.2) até (3.7).

3.3.1 Probabilidade de Bloqueio de uma chamada de melhor esforço (BE)

A probabilidade de bloqueio de uma chamada de melhor esforço, denotada por P_{be} , é definida como a probabilidade de uma chamada dessa classe solicitar acesso à rede

Tabela 3.1: Tabela de Estados $\phi = (i, j)$.

Próximo Estado	Condição	Taxa	Evento
$(i, j + 1)$	$i + j < K_{be}$	$\lambda_{wfbe} + \lambda_{wxbe}$	Chegada de uma chamada da classe de melhor esforço
$(i + 1, j)$	$i + j < K_{ps}$	$\lambda_{wf} + \lambda_{ugs} + \lambda_{ps}$	Chegada de uma chamada da classe WiFi, UGS ou PS
$(i + 1, j)$	$K_{ps} \leq i + j < K_{ugs}$	$\lambda_{wf} + \lambda_{ugs}$	Chegada de uma chamada da classe WiFi ou UGS
$(i + 1, j)$	$K_{ugs} \leq i + j < C$	λ_{wf}	Chegada de uma chamada da classe WiFi
$(i - 1, j)$	$i > 0$	$i\mu_{tr}$	Partida de uma chamada da classe WiFi, UGS ou PS
$(i, j - 1)$	$j > 0$	$j\mu_{be}$	Partida de uma chamada de classe de melhor esforço

e encontrar a ocupação dos recursos de rádio maior ou igual a K_{be} . A probabilidade de bloqueio P_{be} é a soma das probabilidades dos estados nos quais o *threshold* K_{be} é alcançado e excedido. Nesse sentido, temos a Eq.(3.2):

$$P_{be} = \sum_{i+j \geq K_{be}}^C \pi(i, j), \quad (3.2)$$

onde $\pi(i, j)$ é a distribuição do estado de equilíbrio da cadeia de Markov a tempo contínuo.

3.3.2 Probabilidade de Bloqueio de uma chamada PS

A probabilidade de bloqueio de uma chamada da classe de serviço PS, representada por P_{ps} , é definida como a probabilidade de uma chamada dessa classe solicitar acesso à rede e encontrar a ocupação dos recursos de rádio maior ou igual a K_{ps} . A probabilidade de bloqueio P_{ps} é a soma das probabilidades dos estados nos quais o *threshold* K_{ps} é alcançado e excedido, como mostra a Eq.(3.3):

$$P_{ps} = \sum_{i+j \geq K_{ps}}^C \pi(i, j), \quad (3.3)$$

3.3.3 Probabilidade de Bloqueio de uma chamada UGS

A probabilidade de bloqueio UGS, denotada por P_{ugs} , é definida como a probabilidade de uma chamada dessa classe solicitar acesso à rede e encontrar a ocupação dos recursos de rádio maior ou igual a K_{ugs} . P_{ugs} é a soma das probabilidades dos estados nos quais o *threshold* K_{ugs} é alcançado e excedido. Para isso temos a Eq.(3.4):

$$P_{ugs} = \sum_{i+j \geq K_{ugs}}^C \pi(i, j), \quad (3.4)$$

3.3.4 Probabilidade de Bloqueio de uma chamada WiFi de alta prioridade

A probabilidade de bloqueio de uma chamada WiFi de alta prioridade, denotada por P_{wf} , é definida como a probabilidade de uma chamada dessa classe solicitar acesso à rede e encontrar a ocupação dos recursos de rádio igual a C , ou seja, não haver mais canais disponíveis para uma nova chamada. P_{wf} é calculado utilizando-se a Eq.(3.5):

$$P_{wf} = \sum_{i+j=C} \pi(i, j), \quad (3.5)$$

3.3.5 Utilização total do sistema

A utilização total do sistema, denotada por η , é definida como a relação entre o número médio de canais ocupados pelo número total de canais. Na Eq.(3.6) tem-se a utilização total dos recursos de rádio do enlace WiMax.

$$\eta = \frac{\sum_{i>0}^C \sum_{j>0}^{K_{be}} (i+j)\pi(i, j)}{C} \quad (3.6)$$

3.3.6 Recompensa do sistema

O último critério usado neste trabalho é a recompensa do sistema, utilizada em [5, 33] e redefinida na Eq.(3.7). Essa medida tem um papel fundamental na avaliação de

desempenho por possibilitar analisar como o ajuste dos valores dos diferentes *thresholds* impactam no desempenho total do sistema.

A importância da recompensa reside no fato de mesma revelar o ganho do esquema através da ponderação da utilização e das probabilidades de bloqueio. Isso é feito porque a utilização é uma medida do sistema que interessa a operadora, que sempre almeja maximizar o uso dos recursos do sistema, e a probabilidade de bloqueio é a medida do lado do usuário o qual deseja sempre ter sua solicitação atendida, ou seja baixa probabilidade de bloqueio. Nesse sentido, qual critério deve ser usado para indicar qual esquema é mais adequado? A recompensa mostra o ganho do esquema por ponderar a utilização e probabilidade de bloqueio em uma medida única.

São atribuídos pesos para as classes de serviço de acordo com os requisitos de QoS. Os pesos são denotados por: α_{wf} , para o tráfego WiFi de alta prioridade; α_{ugs} , para o tráfego UGS; α_{ps} , para o tráfego PS; e α_{be} , para os tráfegos WiFi e WiMax de baixa prioridade.

$$R = \eta - (\alpha_{wf} \log_{10}^{P_{wf}} + \alpha_{ugs} \log_{10}^{P_{ugs}} + \alpha_{ps} \log_{10}^{P_{ps}} + \alpha_{be} \log_{10}^{P_{be}}) \quad (3.7)$$

Sendo que: $\alpha_{wf} + \alpha_{ugs} + \alpha_{ps} + \alpha_{be} = 1$.

Capítulo 4

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados da avaliação do CAC proposto. Inicialmente, o modelo proposto será comparado com um modelo de compartilhamento total a fim de medir seu desempenho. Posteriormente são realizados estudos de análise de sensibilidade do modelo em relação a variação nos valores dos *thresholds*.

4.1 Preliminares

Para o estudo do modelo proposto, foram adotados os valores de taxas de chegada e tempos de serviço [34] da Tabela 4.1. O tráfego oferecido representa a soma dos tráfegos de alta e baixa prioridade. Para a avaliação, o tráfego de baixa prioridade foi mantido fixo, enquanto que o tráfego de alta prioridade foi aumentado em 50%.

Na comparação entre o CAC proposto e um modelo CT, os valores definidos para os *thresholds* foram: $K_{ugs} = 28$, $K_{ps} = 27$ e $K_{be} = 26$. O modelo CT foi obtido com os seguintes *thresholds*: $K_{ugs} = K_{ps} = K_{be} = C = 30$. Para a função recompensa, foram adotados os seguintes pesos: $\alpha_{wf} = 0.4$, $\alpha_{ugs} = 0.3$, $\alpha_{ps} = 0.2$ e $\alpha_{be} = 0.1$, para os diferentes tipos de tráfego, visando possibilitar uma análise do desempenho total do sistema.

Tabela 4.1: Parametrização[34].

Serviço	Chamada/h	Tempo(seg)
UGS	20	1500
rtPS	4,8	1500
nrtPS	6	3600
WiFi(Tempo Real)	10	1800
WiFi(Melhor Esforço)	10	1800
WiMax(Melhor Esforço)	40	1800

4.2 Comparação do CAC Proposto com Compartilhamento Total

4.2.1 Probabilidade de bloqueio dos tráfegos para CT e MT

Observa-se, na Fig.4.1, que em uma comparação entre um cenário com CT, no qual todas as classes de serviço possuem a mesma probabilidade de bloqueio, e o modelo proposto, o tráfego WiFi de alta prioridade é privilegiado com a menor probabilidade de bloqueio, garantindo melhor QoS para o tráfego proveniente da WLAN.

No modelo *multi-threshold*, todas as classes, com exceção da classe de melhor esforço, possuem uma probabilidade de bloqueio inferior às probabilidades de bloqueio obtidas com o compartilhamento total, isso ocorre porque o CAC proposto define blocos de canais nos quais as classes de serviço podem ser aceitas. No modelo MT as classes PS, UGS e WiFi de alta prioridade dispõem de recursos reservados o que favorece a redução de suas probabilidades de bloqueio, enquanto que as classes de melhor esforço possuem um número reduzido de canais em relação ao modelo CT os quais são, também, comuns as demais classes de serviço o que ocasiona uma probabilidade de bloqueio maior.

4.2.2 Utilização e recompensa do sistema para CT e MT

É possível observar na Fig.4.2 que a utilização do sistema é maior no modelo CT. Isso decorre do fato de não haverem recursos reservados para classes em particular, o que permite que todas as classes aloquem recursos enquanto estes estiverem disponíveis,

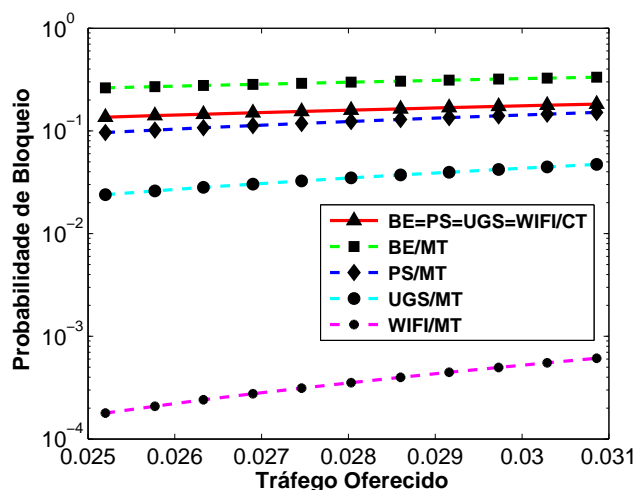


Figura 4.1: Probabilidade de bloqueio CT e MT

diminuindo uma possível ociosidade dos mesmos. O modelo MT, em função da alocação de recursos para classes individuais, apresenta uma utilização menor decorrente de possíveis ociosidades de recursos reservados. Nesse sentido, é possível observar que em relação a utilização o modelo CT oferece uma utilização melhor dos recursos do sistema do que o modelo MT.

Apesar de apresentar uma utilização menor que o modelo CT, o modelo MT se destaca em relação a recompensa do sistema, como pode ser observado na Fig.4.3. O modelo MT privilegia classes de maior peso, considerando os pesos adotados nesse estudo, que é maior para a classe WiFi de maior prioridade, seguida de UGS, PS e menor para as classes de melhor esforço.

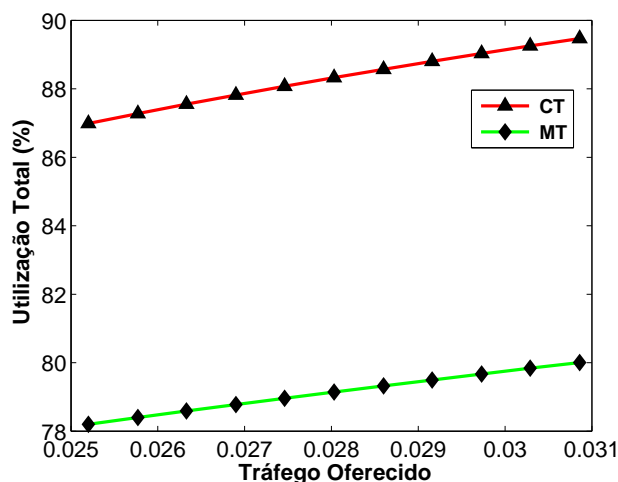


Figura 4.2: Utilização CT e MT

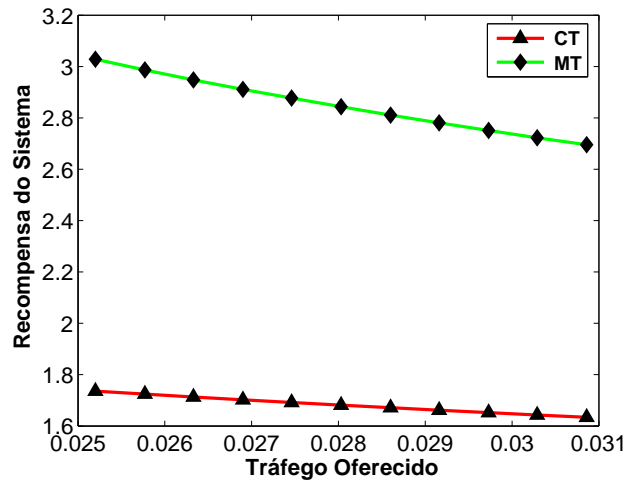


Figura 4.3: Recompensa CT e MT

4.3 Análise de sensibilidade do CAC proposto

4.3.1 Projeto 1

Nesta análise, foram avaliados três diferentes conjuntos de valores para *thresholds*, apresentados na Tabela 4.2. O objetivo é observar o impacto de variações pequenas nos valores dos *thresholds* em relação ao desempenho do modelo proposto.

Tabela 4.2: *Thresholds - Projeto 1*

	Estudo 1	Estudo 2	Estudo 3
K_{ugs}	28	29	29
K_{ps}	27	27	28
K_{be}	26	25	27

4.3.1.1 Probabilidade de bloqueio do Tráfego WiFi de alta prioridade

Na Fig.4.4, é apresentada a probabilidade de bloqueio do tráfego WiFi. Percebe-se que, quanto mais canais são disponibilizados exclusivamente para o tráfego WiFi, menor a sua probabilidade de bloqueio, como pode ser observado para os valores: $K_{ugs} = 28$, $K_{ps} = 27$ e $K_{be} = 26$, o qual dispõe de dois canais exclusivamente para a classe WiFi de alta prioridade. O pior caso, maior probabilidade de bloqueio, é obtido com os

valores: $K_{ugs} = 29$, $K_{ps} = 28$ e $K_{be} = 27$ no qual apenas um canal é disponibilizado para o tráfego WiFi e a quantidade de canais comuns a todas as classes, incluindo tráfego de melhor esforço, é maior. Observou-se também que a quantidade de canais alocados individualmente para as demais classes de alta prioridade, influenciou a probabilidade de bloqueio da classe WiFi de alta prioridade, para os valores: $K_{ugs} = 29$, $K_{ps} = 27$ e $K_{be} = 25$, tendo em vista a pequena diferença da probabilidade de bloqueio entre esse conjunto e o melhor resultado.

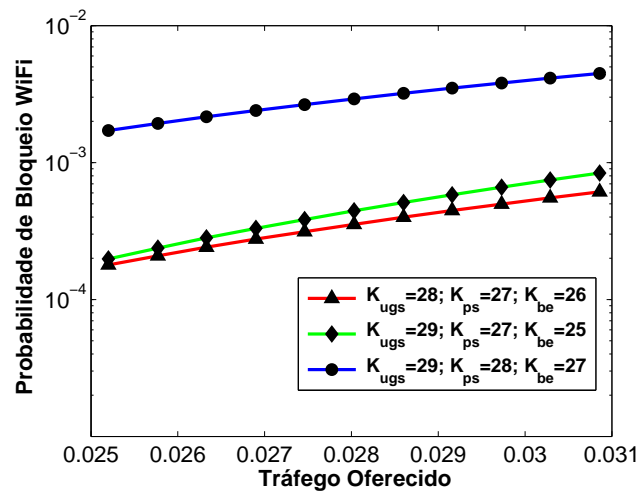


Figura 4.4: Probabilidades de bloqueio WiFi

4.3.1.2 Probabilidade de bloqueio do Tráfego UGS

Na Fig.4.5, é apresentada probabilidade de bloqueio do tráfego UGS. Observa-se que a melhor situação ocorre quando a diferença entre os *thresholds* é maior. Por exemplo: $K_{ugs} = 29$, $K_{ps} = 27$ e $K_{be} = 25$. Isso mostra que, quando há mais recursos reservados para a classe, ou seja, quando o intervalo entre os valores é maior, a probabilidade de bloqueio é menor. A maior probabilidade de bloqueio é observada com os valores: $K_{ugs} = 28$, $K_{ps} = 27$ e $K_{be} = 26$, o que ocorre devido a menor quantidade de recursos disponíveis para a classe.

4.3.1.3 Probabilidade de bloqueio do Tráfego PS

Semelhante ao caso anterior, para o tráfego PS, como pode ser visto na Fig.4.6, a melhor configuração foi obtida com a maior diferença entre os *thresholds*: $K_{ugs} = 29$, $K_{ps} = 27$ e $K_{be} = 25$, quanto mais recursos reservados para a classe PS, menor sua probabilidade de bloqueio. Também observa-se nesse conjunto que existe menor quantidade

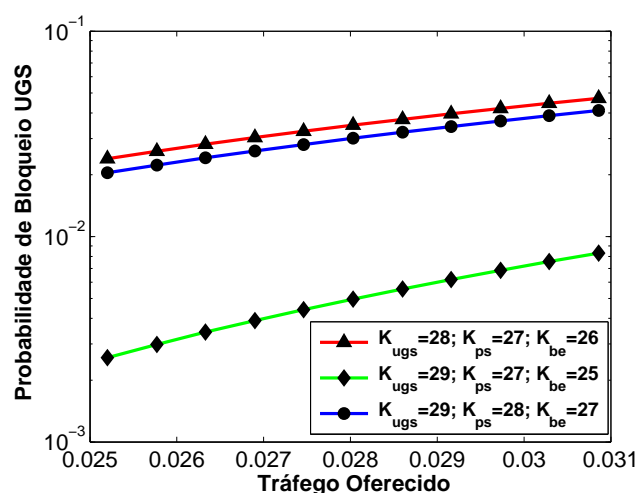


Figura 4.5: Probabilidades de bloqueio UGS

de recursos para uso comum .

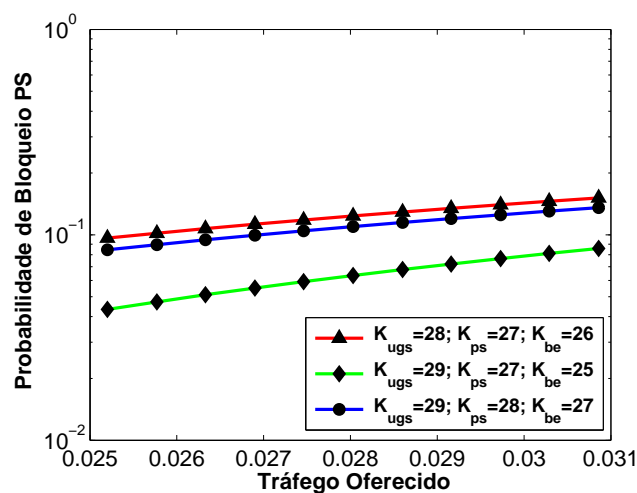


Figura 4.6: Probabilidades de bloqueio PS

4.3.1.4 Probabilidade de bloqueio do Tráfego de baixa prioridade

Observa-se na Fig.4.7 que a menor probabilidade de bloqueio para o tráfego de baixa prioridade (BE) ocorre para os valores: $K_{ugs} = 29$, $K_{ps} = 28$ e $K_{be} = 27$, isso ocorre em função do maior número de canais de uso comum entre as classes de serviço, incluindo a classe de melhor esforço. O pior caso, maior probabilidade de bloqueio é obtido com os valores: $K_{ugs} = 29$, $K_{ps} = 27$ e $K_{be} = 25$, o qual possui a menor quantidade de recursos de uso comum e conseqüentemente a maior quantidade de canais alocados individualmente entre as classes de alta prioridade.

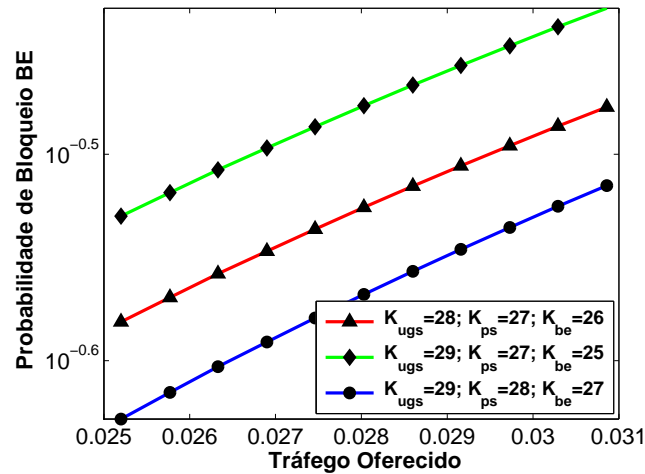


Figura 4.7: Probabilidades de bloqueio BE

4.3.1.5 Utilização total

De acordo com a Fig.4.8, a utilização do sistema é maior para os valores: $K_{ugs} = 29$, $K_{ps} = 28$ e $K_{be} = 27$. Isso ocorre, como observado na comparação com o modelo CT, em função do maior número de canais compartilhados entre as classes, o que reduz a probabilidade de sub-utilização dos recursos do sistema. O pior caso, menor utilização, é observado com os valores: $K_{ugs} = 29$, $K_{ps} = 27$ e $K_{be} = 25$, onde existem menos recursos comuns entre as classes de serviço.

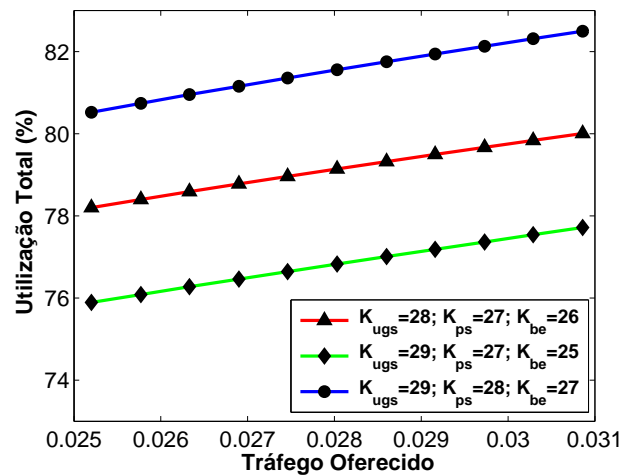


Figura 4.8: Utilização total MT

4.3.1.6 Recompensa do sistema

A Fig.4.9 ressalta que o sistema tem uma maior recompensa quando há uma quantidade maior de recursos reservados individualmente para as classes de maior peso: WiFi de alta prioridade, UGS e PS. O que é possível constatar para os valores: $K_{ugs} = 29$, $K_{ps} = 27$ e $K_{be} = 25$, onde essas classes possuem uma quantidade maior de recursos reservados (02 canais), o que reduz suas probabilidades de bloqueio. Observa-se que a menor recompensa do sistema para esses conjuntos de *thresholds* e obtido com os valores: $K_{ugs} = 29$, $K_{ps} = 28$ e $K_{be} = 27$, onde se tem as menores quantidades de recursos alocados individualmente para as classes de maior peso.

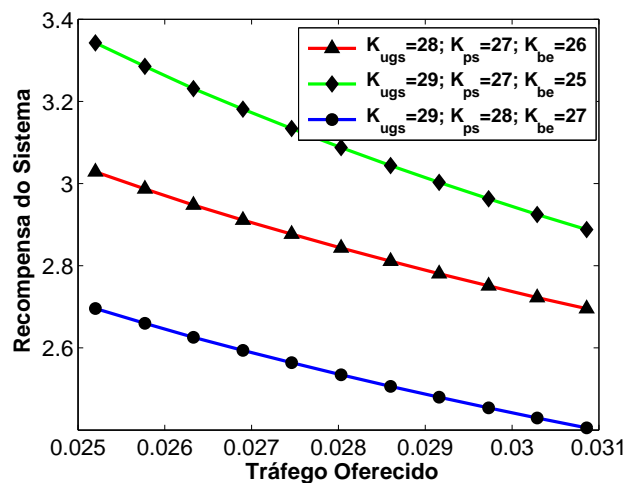


Figura 4.9: Recompensa MT

4.3.2 Projeto 2

Nesse estudo foi realizada uma análise de desempenho do modelo para os valores de *threshold* da Tabela 4.3. O objetivo é analisar o impacto do aumento dos canais reservados para as classes individuais. Inicialmente, mantiveram-se constantes os valores de K_{ugs} e K_{ps} , incrementando-se, em 2, o valor de K_{be} ; no segundo conjunto de valores, mantiveram-se constantes os valores de K_{ugs} e K_{be} , incrementando-se, em 2, o valor de K_{ps} ; finalmente, mantiveram-se constantes os valores de K_{ps} e K_{be} , incrementando-se, em 2, o valor de K_{ugs} .

Foram mantidos os valores de taxas de chegada e tempos de serviço da Tabela 4.1. O tráfego oferecido representa a soma dos tráfegos de alta e baixa prioridade, sendo que, para a realização da análise, foi mantido fixo o tráfego de baixa prioridade, enquanto que o tráfego de alta prioridade foi aumentado em 50

Tabela 4.3: *Thresholds - Projeto 2*

	Estudo 1	Estudo 2	Estudo 3
K_{ugs}	25	25	27
K_{ps}	20	22	20
K_{be}	17	15	15

Foi utilizada também, como métrica, uma função recompensa para avaliar o comportamento do sistema, considerando pesos diferentes para as classes de serviço definidas no CAC. Considerou-se, como serviço de maior peso, o tráfego WiFi de alta prioridade, seguido do UGS, PS e BE, respectivamente. Para a função recompensa foram mantidos os valores do estudo anterior.

4.3.2.1 Probabilidade de bloqueio do Tráfego WiFi de alta prioridade

Como pode ser observado na Fig. 4.10, a menor probabilidade de bloqueio WiFi foi obtida com os valores: $K_{ugs} = 25$, $K_{ps} = 22$ e $K_{be} = 15$, no qual mantiveram-se constantes K_{ugs} e K_{be} , incrementando-se o valor do K_{ps} . O pior desempenho foi obtido aumentando-se K_{ugs} , com os valores: $K_{ugs} = 27$, $K_{ps} = 20$ e $K_{be} = 15$, o que se explica pelo aumento de chamadas compartilhando os mesmos recursos de rádio.

Com o aumento do K_{be} , em: $K_{ugs} = 25$, $K_{ps} = 20$ e $K_{be} = 17$, observa-se que o desempenho se aproxima muito do pior caso $K_{ugs} = 27$, $K_{ps} = 20$ e $K_{be} = 15$, isso em função do aumento de canais comuns, em uso conjunto por todas classes (inclusive as de baixa prioridade) e, conseqüentemente, redução do número de canais para classes prioritárias, dentre elas WiFi.

4.3.2.2 Probabilidade de bloqueio do Tráfego UGS

Observa-se, na Fig. 4.11, que a menor probabilidade de bloqueio para a classe UGS ocorre com os valores: $K_{ugs} = 27$, $K_{ps} = 20$ e $K_{be} = 15$, isso ocorre em função do maior número de canais alocados para esta classe. Para esse conjunto de valores foram mantidos constantes K_{ps} e K_{be} , incrementando-se o valor de K_{ugs} . É possível observar também, que o pior resultado neste caso, maior probabilidade de bloqueio, ocorre para os valores: $K_{ugs} = 25$, $K_{ps} = 20$ e $K_{be} = 17$, isso ocorre devido à redução do número de canais reservados para as classes de alta prioridade influenciando suas probabilidades de

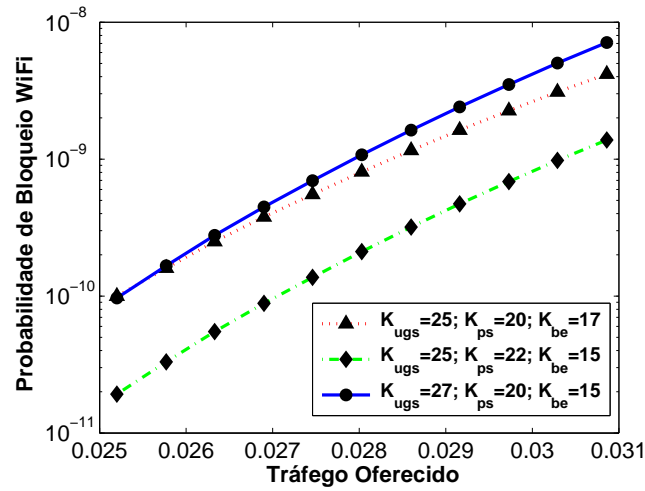


Figura 4.10: Probabilidade de bloqueio WiFi de alta prioridade

bloqueio.

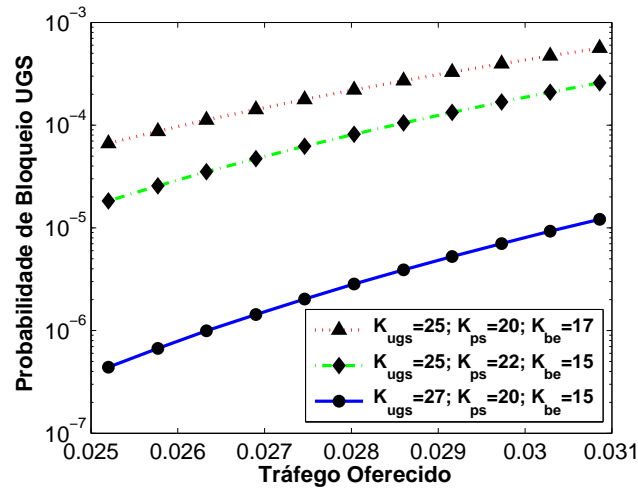


Figura 4.11: Probabilidade de bloqueio UGS

4.3.2.3 Probabilidade de bloqueio do tráfego PS

Na Fig. 4.12 são mostradas as probabilidades de bloqueio para o tráfego PS. O melhor caso, menor probabilidade de bloqueio, é obtido com os valores: $K_{ugs} = 25$, $K_{ps} = 22$ e $K_{be} = 15$, os quais apresentam a maior diferença entre os *thresholds* PS e BE, ou seja, maior quantidade de canais reservados favorecendo o tráfego PS. Mantiveram-se constantes os valores de K_{ugs} e K_{be} , aumentando-se o número de canais PS, através do incremento de K_{ps} em 2 unidades. O pior desempenho obtido ocorreu para: $K_{ugs} = 25$, $K_{ps} = 20$ e $K_{be} = 17$ pelo incremento de K_{be} , o que reduziu o número de canais PS.

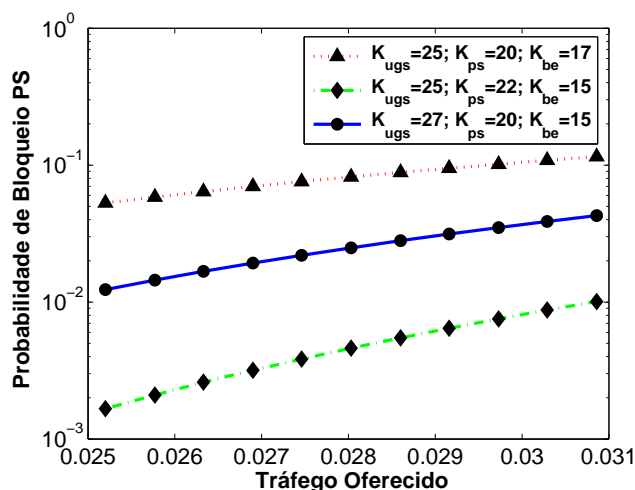


Figura 4.12: Probabilidade de bloqueio PS

4.3.2.4 Probabilidade de bloqueio do tráfego de melhor esforço

Pode-se visualizar, na Fig. 4.13, que o tráfego de melhor esforço (BE) é privilegiado pelo incremento de K_{be} , aumentando o número de canais compartilhados, como pode ser observado com os valores: $K_{ugs} = 25$, $K_{ps} = 20$ e $K_{be} = 17$. Nas figuras anteriores percebe-se que o aumento de recursos compartilhados causa aumento na probabilidade de bloqueio das demais classes de serviço. Contudo, como observado na Fig. 4.14, há um aumento na utilização total do sistema, sendo que, o melhor desempenho é observado com os valores: $K_{ugs} = 25$, $K_{ps} = 20$ e $K_{be} = 17$ e os demais apresentam desempenho aproximadamente inferior.

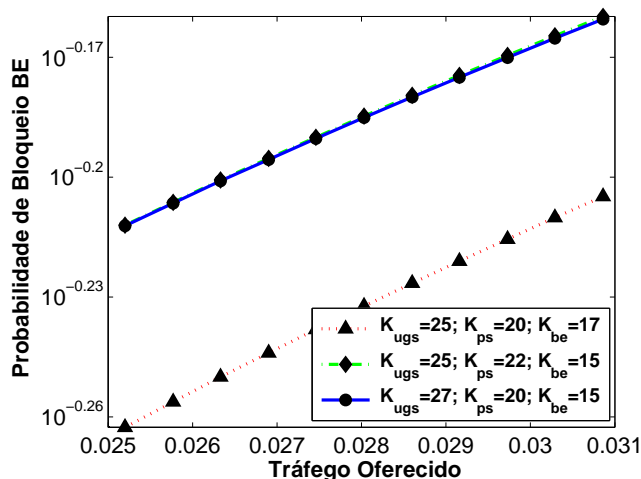


Figura 4.13: Probabilidade de bloqueio BE

4.3.2.5 Utilização total

A utilização total do sistema, Fig. 4.14, é maior para os valores: $K_{ugs} = 25$, $K_{ps} = 20$ e $K_{be} = 17$. Isso se explica pelo aumento no número de canais de uso comum entre as classes de serviço e conseqüentemente a redução dos recursos alocados individualmente para classes específicas, o que reduz a probabilidade de sub-utilização dos recursos alocados para uma determinada classe.

Para os valores: $K_{ugs} = 25$, $K_{ps} = 22$ e $K_{be} = 15$, assim como, $K_{ugs} = 27$, $K_{ps} = 20$ e $K_{be} = 15$, nos quais foram incrementados K_{ps} e K_{ugs} , respectivamente, a utilização do sistema foi muito próxima. Nesse sentido, conclui-se que a utilização do sistema está fortemente ligada à quantidade de recursos comuns utilizados pelas classes de serviço, sendo menor quando os recursos são reservados individualmente entre as classes.

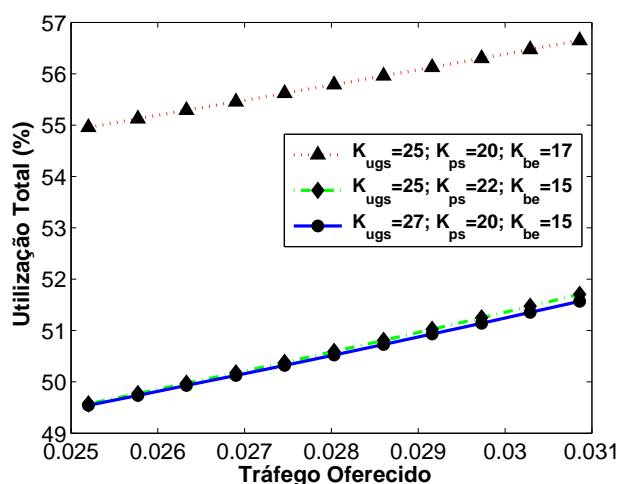


Figura 4.14: Utilização do sistema

4.3.2.6 Recompensa do sistema

Na Fig. 4.15, observa-se que a recompensa do sistema é maior para os conjuntos $K_{ugs} = 25$, $K_{ps} = 22$ e $K_{be} = 15$, assim como, $K_{ugs} = 27$, $K_{ps} = 20$ e $K_{be} = 15$, os quais têm em comum um número maior de canais, distribuídos entre classes de maior prioridade. Para os valores: $K_{ugs} = 25$, $K_{ps} = 20$ e $K_{be} = 17$, no qual K_{be} é incrementado em 2 unidades, reduzindo-se o número de recursos destinados exclusivamente às classes de alta prioridade (maior peso), observa-se valores inferiores para a recompensa. A recompensa diminui com o aumento do tráfego oferecido.

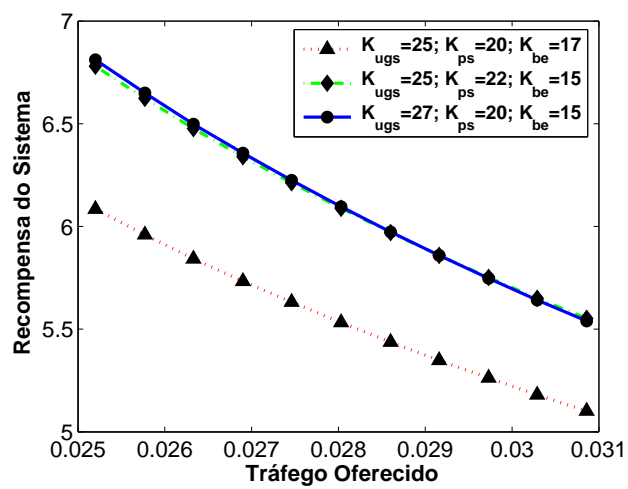


Figura 4.15: Recompensa do sistema

Conclusão

Neste trabalho, foi proposta a utilização de uma política de CAC, na integração de redes WiFi e WiMax, com o intuito de garantir QoS para a rede WiFi, assim como níveis de prioridade para as demais classes de serviço do padrão WiMax. No sentido de compreender melhor o funcionamento dessas tecnologias, foram abordados os padrões: IEEE 802.11, o qual já está bastante consolidado como rede WLAN; e o padrão IEEE 802.16, o qual ganha, cada vez mais, visibilidade como alternativa para implementação de redes WMAN. Levando-se em consideração que o tráfego proveniente de uma rede WiFi, nesse contexto, por utilizar uma SS da rede WiMax como *backhaul*, concorre com o tráfego de outras SSs dessa rede, ocasionando problemas de QoS para a rede WiFi; a utilização de um CAC, para disciplinar o uso dos recursos, é importante, pois permite que se estabeleça uma política que define quais serviços serão atendidos prioritariamente, visando-se à redução de suas probabilidades de bloqueio. Isso favorece o atendimento de serviços com tráfego de alta prioridade.

Políticas de CAC *multi-threshold* têm sido estudadas recentemente em redes celulares e são aplicáveis a sistemas multi serviços, como é o caso de redes WiMax que implementam quatro classes (UGS, nrtPS, rtPS e BE) no padrão original. Nesse trabalho, também considerou-se o tráfego da rede WiFi.

Para a investigação do comportamento do modelo proposto nesta pesquisa, foi realizada a avaliação de desempenho da política *multi-threshold*, comparando-a a um modelo de Compartilhamento Total, no qual todos os recursos estão disponíveis a todos os tipos de serviços oferecidos, sem restrições. Foi realizada, também, uma análise do desempenho para diferentes valores de *thresholds* para a política de controle de admissão de chamadas proposta e apresentados os resultados obtidos através de cadeia de Markov.

A partir da análise dos resultados, foi possível observar que a política de CAC proposta atende às necessidades de QoS para as classes individuais a partir do ajuste dos valores dos *thresholds*. Além disso, foi observado que, quanto menor o número de canais de uso comum entre as classes de serviço, menor a utilização dos recursos do sistema, assim como, quanto mais canais destinados a classes individuais de maior prioridade, maior a

recompensa do sistema.

Como trabalhos futuros, considera-se a utilização do processo markoviano de decisão para o ajuste ótimo dos valores dos *thresholds*, a fim de se obter valores ideais de acordo com os requisitos de QoS das classes de serviço. Vale ressaltar que, o estudo de mecanismos adaptativos, que possibilitem o ajuste dos *thresholds* dinamicamente de acordo com a carga do sistema e as exigências de QoS para as classes individuais, pode constituir-se em uma alternativa para obter melhor utilização e recompensa para o sistema. A análise do desempenho do sistema sob o ponto de vista do usuário final QoE (*Quality of Experience*) também pode ser considerada uma abordagem relevante.

Para a integração das duas tecnologias empregadas neste estudo, as redes *Mesh* são uma alternativa de *backhaul* para usuários finais. Um outro problema relevante consiste em diferenciar os tráfegos WiFi de tempo real e WiFi de melhor esforço sendo que uma possível solução é a utilização de portas na camada de aplicação por onde os tráfegos seriam direcionados. Outras abordagens de CAC também podem ser consideradas como, o emprego de Logica Fuzzy, Algoritmos Genéticos, Redes Neurais, emprego de *buffers*, etc.

No que se refere ao aspecto social relacionado ao emprego conjunto dessas tecnologias e sua aplicação prática, quando se fala em inclusão digital, a integração de diferentes tecnologias de redes de comunicação, como é o caso abordado neste estudo, a fim de fornecer mais opções de conectividade a um custo mais baixo para o usuário final, se reflete diretamente na possibilidade de acesso por uma quantidade maior de usuários à Internet e seus serviços. Deve-se levar em consideração que regiões mais afastadas dos grandes centros urbanos no Brasil, principalmente no Norte do país, apresentam algumas dificuldades em relação a comunicação de dados. A utilização de tecnologias como WiMax e WiFi, no sentido de garantir um acesso mais democrático à população, representa um avanço significativo no atendimento a esses indivíduos.

Referências Bibliográficas

- [1] A. R. Prasad, N. R. Prasad. *802.11 WLANs and IP Networking: security, QoS, and mobility* Boston, London: Artech House, 2005.
- [2] D. Niyato, E. Hossain. *Call Admission Control for QoS Provisioning in 4G Wireless Network: Issues and Approaches*, IEEE Network, No. 4, pp. 5-11, Setembro/Outubro, 2005.
- [3] T. Yahiya, A. Beylot, G. Pujolle, *Policy-based threshold for bandwidth reservation in wimax and wifi wireless networks*. In ICWMC '07: Proceedings of the Third International Conference on Wireless and Mobile Communications, pp. 76, 2007.
- [4] B. Li, L. Li, B. Li, K. M. Sivalingam, X.-R. Cao. *Call admission control for voice/data integrated cellular networks: Performance analysis and comparative study*. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 22(4):706-718, May 2004.
- [5] S. Tang, W. Li. *An adaptive bandwidth allocation scheme with preemptive priority for integrated voice/data mobile networks*. IEEE Transaction on Wireless Communications, 5(10):2874-2886, October 2006.
- [6] D. Niyato, E. Hossain. *Wireless broadband access: Wimax and beyond integration of wimax and wifi:optimal pricing for bandwidth sharing*. IEEE Communications Magazine, 45(5):140-146, May 2007.
- [7] K.F.Tsang, L.T. Lee, H.Y.Tung, R. Lam, Y.T. Sun, K.T. Ko. *Admission Control Scheme for Mobile WiMAX Networks*. Consumer Eletronics, 2007. ISCE 2007, IEEE International Symposium. Junho, 2007 pp.:1-5.
- [8] S. E. Ogbonmwan, W. Li. *Multi-threshold bandwidth reservation scheme of an integrated voice/data wireless network*. Elsevier J. Computer Communications, 29(9):1504-1515, May 2006.
- [9] M. Ikeda, L. Barolli, A. Koyama, A. Durresti, G. D. Marco, J. Iwashige. *Performance evaluation of an intelligent CAC and routing framework for multimedia applications*

- in broadband networks*. Journal of Computer and System Sciences, 72 : 1183-1200, Nov 2006.
- [10] G. H. S. Carvalho, V. S. Martins, C. R. L. Francês, J. C. W. A. Costa, S. V. Carvalho. *Performance analysis of multi-service wireless network: An approach integrating CAC, scheduling and buffer management*. Computers and Electrical Engineering 34 (4): 346-356. Available online 18 October 2007.
- [11] R. Cheng, C. Chang. *A QoS-Provisioning Neural Fuzzy Connection Admission Controller for Multimedia High-Speed Networks*. IEEE/ACM Transactions 7(1): 111-121, Feb 1999.
- [12] M. S. Kuran, T. Tugcu. *A survey on emerging broadband wireless access technologies*. Elsevier. Computer Networks 51 (2007) 3013-3046. Available online 16 January 2007.
- [13] S. Dhawan. *Analogy of Promising Wireless Technologies on Different Frequencies: Bluetooth, WiFi, and WiMAX*. The 2nd International Conference on Wireless Broadband and Ultra Wideband Communications (AusWireless 2007).
- [14] R. Lau, R. Khare, W. Y. Chang. *Service Assurance for Voice over WiFi and 3G Networks*. Boston, London: Artech House, 2005.
- [15] R. Prasad, L. Muñoz. *WLANs and WPANs towards 4G Wireless*. Boston, London: Artech House, 2003.
- [16] J. G. Andrews, A. Ghosh, R. Muhamed. *Fundamentals of WiMAX : understanding broadband wireless networking*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2007.
- [17] L. Nuaymi. *WiMAX: Technology for Broadband Wireless Access*. England: John Wiley & Sons Ltd., 2007.
- [18] C.M. Cordeiro et al. *The Last Mile: Wireless Technologies for Broadband and Home Networks*. In: Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores, 21, 2003, Natal. Anais. Livro de Minicursos. Natal: 2003, 119-175.
- [19] A.S.Garcia et al. *Uma abordagem sobre QoS e Planejamento de Capacidade de Redes Wimax e sua Aplicação no Contexto da Mobilidade Corporativa*. XXVI Simpósio Brasileiro de Telecomunicações - SBrT 2008 - Minicurso. Rio de Janeiro, Setembro 2008.
- [20] R.Q.Malini. *Uma arquitetura de QoS e Modelo de Simulação para o Padrão IEEE 802.16d Como Suporte a Serviços Multimídia Distribuídos*. Dissertação de Mestrado.

Universidade Federal do Espírito Santo. Programa de Pós-Graduação em Informática. Vitória, Brasil, Maio de 2007.

- [21] D. Pareek, *Understanding WiMAX: The business of WiMAX* John Wiley & Sons, England, 2006.
- [22] S. Xergias, N. Passas, A.K.Salkintzis. *Centralized Resource Allocation for Multimedia Traffic in IEEE 802.16 Mesh Networks*. Proceedings of the IEEE. Vol. 96, No. 1, January 2008. pp. 54-63.
- [23] W. Song, H. Jiang, W. Zhuang, X. Shen. *Resource Management for QoS Support in Cellular/WLAN Interworking*. IEEE Network. September/October, 2005.
- [24] *IEEE 802.16. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Fixed Broadband Wireless Access Systems*. Outubro de 2004.
- [25] *IEEE 802.16. IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Part 16: Air Interface for Fixed and Mobile Broadband Wireless Access Systems Amendment 2: Physical and Medium Access Control Layers for Combined Fixed and Mobile Operation in Licensed Bands and Corrigendum 1* Fevereiro de 2006.
- [26] Z. Abichar, Y. Peng, J.M. Chang. *WiMax: The Emergence of Wireless Broadband*. Wireless Broadband. IEEE Computer Society. Jul/Ago, 2006.
- [27] R. Jain. *The Art of Computer Systems. Techniques for Experimental Design, Measurement, Simulation, and Modeling*. John Wiley & Sons, 1991.
- [28] G. H. S. Carvalho. *Modelagem e Análise de Desempenho de Esquemas de Alocação de Recursos em Redes Sem Fio*. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação de Engenharia Elétrica (PPGEE), Universidade Federal do Pará (UFPA), Belém, Brasil, 2005.
- [29] C. R. L. Francês. *Statecharts Estocásticos e Queuing Statecharts - Novas Abordagens para Avaliação de Desempenho Baseadas em Especificação Statecharts*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo (USP), São Paulo, Brasil, 2001.
- [30] W. Ching, M. K. Ng *Markov Chains: Models, Algorithms and Applications*. Springer Science + Business Media, Inc.: New York, US, 2006.
- [31] G. Bolch, S. Greiner, H. Meer, K. S. Trivedi. *Queueing Networks and Markov Chains: Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications*. John Wiley & Sons, Inc.: Hoboken, NJ, 2006.

- [32] P. V. Mieghem. *Performance Analysis of Communications Networks and Systems*. Cambridge University Press: New York, US, 2006.
- [33] L.-Z. Li et al. *Call level performance analysis for multi-services wireless cellular networks* IEEE ICC'2003, Anchorage, USA, May 11-15, 2003.
- [34] B. Rong, Y. Qian, K. Lu. *Integrated Downlink Resource Management for Multiservice WIMAX Networks*. IEEE Transactions on Mobile Computing. Vol. 6. June 2007.