

Universidade Federal do Pará
Centro Tecnológico
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Controle Conjunto de Admissão de Chamadas em
Redes Sem Fio Co-localizadas

DM-023/2010

RODOLFO WANDERSON LIMA COUTINHO

Orientador:

PROF. DR. GLAUCIO HAROLDO SILVA DE CARVALHO

Belém
2010

Controle Conjunto de Admissão de Chamadas em Redes Sem Fio Co-localizadas

RODOLFO WANDERSON LIMA COUTINHO

Orientador:

PROF. DR. GLAUCIO HAROLDO SILVA DE CARVALHO

DM-023/2010

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora do Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pará como requisito para obtenção do título de “Mestre em Engenharia Elétrica com ênfase em Computação Aplicada”.

Universidade Federal do Pará

Belém
2010

C871c

Coutinho, Rodolfo Wanderson Lima

Controle conjunto de admissão de chamadas em redes sem fio co-localizadas / Rodolfo Wanderson Lima Coutinho: orientador, Glaucio Haroldo Silva de Carvalho. - 2010.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Belém, 2010.

1. Redes locais sem fio. 2. Dispositivos de redes sem fio. 3. Recursos de redes de computadores. I. orientador. II. título.

CDD 22 ed. 004.68

Controle Conjunto de Admissão de Chamadas em Redes Sem Fio Co-localizadas

AUTOR: RODOLFO WANDERSON LIMA COUTINHO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADADO 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: 17/12/2010

BANCA EXAMINADORA:

.....
Prof. Dr. Glaucio Haroldo Silva de Carvalho

ITEC/UFPA - Orientador

.....
Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl Albuquerque Costa

ITEC/UFPA - Co-Orientador

.....
Prof. Dr. Eduardo Coelho Cerqueira

ITEC/UFPA - Membro

.....
Prof. Dr. Dionne Cavalcante Monteiro

ICEN/UFPA - Membro

Visto:

.....
Prof. Dr. Marcus Vinícius Alves Nunes

Coordenador do PPGEE/ITEC/UFPA

*Aos meus pais, “Tia”,
irmãos e esposa, pela
paciência e apoio.*

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus, criador, Pai Bondoso, sem o qual não estaríamos aqui. Além de inúmeros sonhos, tenho muita Fé que com ajuda de Deus, irei conseguir.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Glaucio Haroldo Silva de Carvalho por ter apostado em mim desde a graduação, pelas suas orientações com relação ao desenvolvimento deste trabalho e pelas suas orientações com relação à vida. Obrigado pelos conselhos e pelas conversas nos finais de tarde.

Agradeço ao Prof. Dr. João Crisóstomo Weyl de Albuquerque Costa pelo espaço cedido em seu laboratório. Certamente sem esse apoio ficaria mais difícil o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também aos Companheiros do LEA, pela amizade e por tornarem mais prazeroso esse período, com as conversas e companhia.

Agradeço aos Companheiros do período de graduação, que estão espalhados pelo Brasil compartilhando desse desafio. Um agradecimento especial aos amigos Wendeson, Douglas, Gean, Edinaldo e Rosinei pelo apoio e companheirismo dado sempre quando precisei. Obrigado pela amizade meus amigos.

Gostaria de agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (PPGEE) da Universidade Federal do Pará, aos professores que compõe o programa, pelo auxílio em meio às diversas dúvidas ao longo desta jornada e, aos demais funcionários que pacientemente sempre me atenderam.

Agradeço também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro.

Agradeço aos meus irmãos, Rodrigo, Rohan, Ronnie, Matheus, Lucas e a mais nova Ana Alice, por tudo que vivemos juntos.

Mesmo perdendo minha Mamãe muito cedo, sempre senti sua presença ao longo de minha vida. Eternamente serei grato pelos seus carinhos, pelos cuidados, por insistir em me acordar cedo para eu ir à escola quando criança, mesmo eu querendo ficar em casa assistindo desenhos :-). Agradeço por você está cuidando de mim e de meus irmãos mesmo daí de onde você está. *Te amo mamãe.*

Tudo que eu conseguir, principalmente na área acadêmica, é devido a imensa ajuda de meu Pai. Lhe agradeço imensamente pelo seu esforço e suor derramado, pelo apoio, sem o qual eu não estaria hoje aqui. Agradeço também pelo exemplo de vida, pelo exemplo de ser humano e pelo exemplo de profissional. *Te amo papai.*

Agradeço a minha *Tia* que após eu ter perdido minha mãe, foi a pessoa que continuou a batalhar juntamente com meu pai, para que eu e meus irmão pudéssemos ter oportunidades de buscar um futuro melhor.

Ao meu amor, minha companheira, que mesmo em meio às dificuldades aceitou se juntar a mim nessa jornada e desde então sempre me apoiou e me ajudou na realização de mais este sonho. Obrigado por ser paciênte nos momentos difíceis e quando eu estava ausente devido ao mestrado. *Te amo Aline.*

Resumo

Gerenciamento de recursos de rádio é um tema importante e desafiador em redes sem fio. Na próxima geração de redes (redes 4G) esse tema é ainda mais desafiador devido à necessidade de gerenciamento de recursos das diversas redes sem fio de forma conjunta. Algoritmos de Controle de Admissão de Chamadas (CAC) é uma alternativa viável e amplamente estudada em redes homogêneas para este fim. Contudo, os algoritmos de CAC propostos para redes homogêneas não são adequados para a próxima geração de redes sem fio por não possuírem uma visão global do sistema.

Diante da importância de gerenciamento de recursos de rádio e da escassez de algoritmos de CAC destinados às redes heterogêneas, tem-se este tema como foco primário deste trabalho. Além da confecção de um modelo para controle conjunto de admissão de chamadas através da utilização de processos semi-markovianos de decisão, dada a existência de um conglomerado de tecnologias de acesso sem fio atuando colaborativamente, um estudo é realizado buscando-se avaliar o impacto da proporcionalidade existente entre os tamanhos de áreas de coberturas, no desempenho do sistema.

PALAVRAS-CHAVE: Controle de Admissão de Chamadas, Processos Semi-Markovianos de Decisão, Próxima Geração de Redes Sem Fio.

Abstract

Radio resource management is an important and challenging issue in wireless networks. In Next Generation Wireless Networks (NGWN) this theme is even more challenging due to the need for management resources of different wireless networks together. Algorithms for Call Admission Control (CAC) are a feasible and widely studied in homogeneous networks for this purpose. However, the CAC algorithms proposed for homogeneous networks are not suitable for NGWN do not have an overview of the system.

Given the importance of managing radio resources and the scarcity of CAC algorithms for heterogeneous networks, we have this issue as a primary focus of this work. Besides the construction of a model for joint control of call admission procedures through the use of semi-Markov decision, given the existence of a cluster of wireless access technologies, working collaboratively, seeking a study is conducted to evaluate the impact of proportionality between the sizes of areas of coverage, the system performance.

KEYWORDS: Call Admission Control, Semi-Markov Decision Process, Next Generation Wireless Networks.

Sumário

Lista de Figuras	iii
Lista de Tabelas	iv
Glossário	v
Introdução	1
1 Próxima Geração de Redes Sem Fio	5
1.1 Preliminares	5
1.2 Definição da próxima geração de redes sem fio	6
1.2.1 Características da próxima geração de redes sem fio	8
1.2.2 Desafios de pesquisa na próxima geração de redes sem fio	8
1.3 Gerenciamento de recursos de rádio	9
1.3.1 Benefícios do CCAC	10
1.3.2 Requisitos de algoritmos de CCAC	11
1.3.3 Metodologias e considerações de projeto para o desenvolvimento de algoritmos de CCAC	12
1.4 Revisão bibliográfica e trabalhos desenvolvidos	13
2 Cadeias de Markov e Processos Markovianos de Decisão	16
2.1 Preliminares	16
2.2 Cadeias de Markov	17
2.2.1 Definição	17
2.2.2 Classificação dos estados	18
2.2.3 Comportamento limite da cadeia de Markov	20
2.3 Processo Markoviano de Decisão (PMD)	20
2.3.1 O critério do custo médio para uma política estacionária	21
2.3.2 Algoritmo de Iteração de Valores (AIV)	22
2.4 Processo Semi-Markoviano de Decisão (PSMD)	23
3 Avaliação de desempenho de redes sem fio co-localizadas	25
3.1 Descrição do Sistema	25
3.2 Modelo de Tráfego	27

3.2.1	Classe de Serviço de Tempo Real	27
3.2.2	Classe de Serviço de Melhor Esforço	29
3.3	Formulação do Modelo e Problema de Otimização	30
3.3.1	Espaço de Estados	30
3.3.2	Épocas de Decisão e Conjunto de Ações	32
3.3.3	Tempo esperado até a próxima época de decisão	33
3.3.4	Dinâmica de transição de estados	33
3.3.5	Função de Custo	35
3.3.6	Medidas de desempenho	36
4	Resultados	38
4.1	Parametrização do modelo	38
4.2	Resultados Numéricos	38
4.2.1	Resultados para a classe de serviço de tempo real	38
4.2.2	Resultados para a classe de serviço de melhor esforço	40
4.2.3	Resultados para a utilização de recursos de rádio e custo ótimo	41
4.3	Estrutura da política ótima	43
	Conclusão	46
	Referências Bibliográficas	49

Lista de Figuras

1.1	Exemplo de arquitetura heterogênea de redes sem fio [1].	6
1.2	Caminhos que levam à Quarta Geração [2].	7
1.3	O sistema centrado ao usuário [3].	7
2.1	Pseudo-código do algoritmo de iteração de valores.	23
3.1	Exemplo de redes sem fio co-localizadas.	26
3.2	Visão conceitual do sistema.	27
4.1	(a) Probabilidade de bloqueio das conexões de tempo real em sua RSF nativa (#1). (b) Tráfego médio escoado de tempo real na RSF alternativa (#2).	39
4.2	(a) Probabilidade de bloqueio das conexões de tempo real em sua RSF nativa (#2). (b) Tráfego médio escoado de tempo real na RSF alternativa (#1).	40
4.3	(a) Probabilidade de bloqueio das conexões de melhor esforço em sua RSF nativa (#1). (b) Tráfego médio escoado de melhor esforço na RSF alternativa (#2).	41
4.4	(a) Probabilidade de bloqueio das conexões de melhor esforço em sua RSF nativa (#2). (b) Tráfego médio escoado de melhor esforço na RSF alternativa (#1).	41
4.5	Utilização de recursos de rádio <i>versus</i> $\rho_1^1 = \rho_{nr}^1$. (a) RSF-1. (b) RSF-2.	42
4.6	Custo ótimo <i>versus</i> $\rho_1^1 = \rho_{nr}^1$	42
4.7	Política ótima para conexão de tempo real destinadas nativamente à RSF-2 de acordo com a ocupação da RSF alternativa (#1). (a) —Para $k = 1$. (b) Para $k = 5$	44

Lista de Tabelas

1.1	Crêterios de sele�o da RSF mais apropriado [4].	10
1.2	Relacionamento entre os requisitos de CCAC.	12
2.1	Classifica�o dos estados de uma cadeia de Markov.	18
4.1	Configura�o do Sistema.	39
4.2	Política ótima para conexão de tempo real destinadas nativamente � RSF-2, de acordo com a ocupa�o dos recursos da RSF alternativa (#1) quando $k = 1$	44
4.3	Política ótima para conexões de tempo real destinadas nativamente � RSF-2, de acordo com a ocupa�o dos recursos na RSF alternativa (#2) quando $k = 5$	45

Glossário

AAA	-	<i>Authentication, Authorization and Accounting</i>
AIV	-	Algoritmo de Iteração de Valores
CAC	-	Controle de Admissão de Chamadas
CCAC	-	Controle Conjunto de Admissão de Chamadas
CMTC	-	Cadeias de Markov a Tempo Contínuo
CMTD	-	Cadeias de Markov a Tempo Discreto
DCA	-	<i>Dynamic Channel Assignment</i>
FCA	-	<i>Fixed Channel Assignment</i>
HCA	-	<i>Hybrid Channel Assignment</i>
IP	-	<i>Internet Protocol</i>
ITU	-	<i>International Telecommunications Union</i>
JRRM	-	<i>Joint Radio Resource Management</i>
MADM	-	<i>Multi Attribute Decision Making</i>
PMD	-	Processo Markoviano de Decisão
PMDTD	-	Processo Markoviano de Decisão a Tempo Discreto
PSMD	-	Processo Semi-Markoviano de Decisão
QoE	-	Qualidade de Experiência
QoS	-	Qualidade de Serviço
RSF	-	Rede Sem Fio
SLA	-	<i>Service Level Agreement</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>

Introdução

Mesmo com os avanços tecnológicos da infraestrutura de telecomunicações (3G), percebe-se que estas não são capazes de atender a crescente demanda dos usuários móveis por conteúdos multimídias, garantindo-os acesso ubíquo com altas taxas de transmissão. Esse aumento na demanda dos usuários móveis dá-se basicamente devido aos avanços tecnológicos dos terminais portáteis e graças ao barateamento destes equipamentos.

Assim, há algum tempo, a comunidade científica e industrial vem vislumbrando uma nova geração de redes onde diversas tecnologias de acesso atuarão de forma conjunta, a fim de prover cobertura ubíqua, elevada taxa de transmissão e garantias de Qualidade de Serviço (QoS).

Nessa nova geração de redes, a tecnologia de acesso sem fio predominará. Isso ocorrerá em função da necessidade de mobilidade por parte dos usuários. Portanto, haverá diversas tecnologias de acesso sem fio atuando de forma colaborativa a fim de melhor atender aos usuários.

Os principais desafios a serem superados nessa nova geração de redes, são intrínsecos à tecnologia de acesso sem fio. Dentre esses, os já característicos das redes 3G apresentam-se de forma mais desafiadora. Por exemplo, o gerenciamento de recursos de rádio deve ser feito de forma conjunta, no qual a estabilidade global do sistema (conglomerado de redes) deverá ser alcançada.

Além destes, novos problemas devem ser resolvidos, tais como: a seleção da rede sem fio (RSF) mais adequada, o projeto de interfaces aéreas a fim de se alcançar maiores taxas de transmissão, *handoff vertical*¹ transparente, entre outros.

Quanto ao problema de gerenciamento de recursos, utiliza-se algoritmos de Controle de Admissão de Chamadas (CAC) para a prevenção do congestionamento. Estes algoritmos devem fazer o melhor uso dos recursos de rádio disponíveis, enquanto garantem que os requisitos de QoS de todas as chamadas em serviço sejam satisfeitos. Nessa nova geração de redes, novos algoritmos para o gerenciamento conjunto dos recursos de rádio, devem ser propostos.

¹Migração do usuário de um ponto de acesso para outro, com tecnologias de redes distintas.

Esse trabalho apresenta o projeto de um Controle Conjunto de Admissão de Chamadas (CCAC) ótimo, destinado à seleção inicial da RSF. Para a modelagem com cunho em desempenho, foi utilizado o arcabouço de processos semi-markovianos de decisão (PSMD).

Motivação

As RSFs apresentam-se como uma solução viável para o provimento de conexão em áreas rurais e de difícil acesso. Como exemplo, pode-se citar a utilização desta tecnologia de acesso para provimento de conexão na região amazônica. Além disso, RSFs são atrativas também devido ao baixo custo de implantação, quando comparado com as demais tecnologias de acesso.

Nesta tecnologia de acesso, um dos principais problemas na quarta geração e até mesmo nas gerações anteriores, é o gerenciamento de recursos de rádio de forma eficiente. Um mecanismo utilizado para o gerenciamento de recursos de rádio é a utilização de algoritmos de Controle de Admissão de Chamadas (CAC). Os algoritmos de CAC devem decidir se uma nova chamada deverá ser aceita ou bloqueada, garantindo que a nova requisição e as chamadas já admitidas sejam servidas com QoS. Com isso, é possível realizar o descarte controlado, o que leva à menores probabilidades de bloqueio e de perdas.

Na próxima geração de redes, estes tradicionais algoritmos de CAC não serão adequados. Logo, novos algoritmos devem ser projetados para que possam gerenciar os recursos de rádio de forma conjunta. Assim surge o conceito de Controle Conjunto de Admissão de Chamadas (CCAC), onde esses algoritmos além de decidirem se a nova chamada será admitida ou bloqueada, devem selecionar a RSF mais adequada para servir a nova chamada, de acordo com algum critério pré-estabelecido. Estes novos algoritmos podem ser empregados para a seleção inicial da RSF, para a seleção da RSF no ato do *handoff*, ou em ambos.

Contribuições

Em meio aos diversos trabalhos apresentados na literatura destinados ao gerenciamento de recursos de rádio e a seleção inicial ótima da RSF, na próxima geração de redes, o trabalho desenvolvido apresenta as seguintes contribuições:

- O CCAC ótimo desenvolvido para seleção inicial da RSF mais adequada e para o gerenciamento conjunto de recursos de rádio considera fatores característicos a preferências do usuário e dos operadores, por meio da função custo definida. A função de custo é necessária para que se possa estabelecer o critério de otimalidade.

-
- Além do CCAC ótimo proposto, uma investigação é dirigida a fim de se obter conclusões de como a relação entre os tamanhos de áreas de cobertura, interfere na política ótima de seleção inicial da RSF e no desempenho do sistema. Até então, os trabalhos apresentados na literatura, tais como [5, 6], utilizam a informação de tamanho de área de cobertura para escolher a RSF de acordo com heurísticas. Uma das principais contribuições deste estudo é justamente a derivação do tempo de permanência de um usuário móvel em uma RSF, em função da proporcionalidade dos raios de cobertura das diversas RSFs co-localizadas, o que permitiu investigar como esta proporcionalidade pode impactar na estrutura da política ótima de seleção inicial da RSF.
 - A seleção inicial da RSF e o gerenciamento de recursos são realizados de forma ótima. O principal objetivo do modelo proposto é prover a seleção inicial ótima da RSF baseado nos seguintes critérios: custo de bloqueio e custo de aceitação da nova chamada na RSF alternativa. O primeiro, já é amplamente utilizado no projeto de CACs, principalmente em redes sem fio homogêneas, que consiste em uma penalidade sempre quando uma nova chamada é bloqueada. O segundo consiste no custo de servir a nova chamada em uma RSF alternativa, ou seja, em uma RSF na qual o usuário móvel não possui um contrato de serviço. O que permite esta operação são Contratos de Serviços estabelecidos entre operadoras, conhecidos como *SLA - Service Level Agreement* [7], o que permite acesso inicial ou *roaming* das chamadas. Assim, o CCAC ótimo proposto pode decidir o que é melhor para cada classe de serviço, baseado em prioridades configuradas através dos valores atribuídos nas funções de custo, e para cada rede sem fio.
 - Pela formulação do problema através da utilização de processos semi-markovianos de decisão (PSMD), é possível conciliar ambos os tratamentos: otimização e avaliação de desempenho. Isto devido os modelos markovianos serem uma metodologia natural para modelagem e avaliação de desempenho em redes de comunicação. Além disso, como o sistema modelado é dinâmico, ou seja, evolui com o tempo, a melhor forma para lidar com otimização é por meio da abordagem de programação dinâmica. Esta visão (otimização e avaliação de desempenho) é mandatária no projeto de estratégias de alocação de recursos, para redes de comunicação com múltiplas classes de serviço.
 - Por fim, o modelo desenvolvido é altamente customizável, de acordo com os parâmetros utilizados, para que se possam empregar características das diversas tecnologias de acesso sem fio, tais como IEEE 802.16, IEEE 802.11, 3G, etc. Com isso, é possível a obtenção de políticas ótimas de seleção inicial da RSF em ambientes onde há um aglomerado destas e outras tecnologias de acesso sem fio, que apesar de algumas vezes ser de difícil implementação, podem ser utilizadas como meta na determinação de heurísticas que

aproximem o comportamento ótimo.

Organização do trabalho

Os conceitos relativos à próxima geração de redes sem fio são apresentados no capítulo 1. Além das definições presentes na literatura, são descritas algumas características e desafios existentes nesta nova geração de redes. Ainda no capítulo 1, conceitos relativos ao gerenciamento de recursos de forma eficiente, são abordados. A metodologia utilizada para a avaliação de desempenho proposta neste trabalho é apresentada no capítulo 2. No capítulo 3 é apresentado o modelo de controle conjunto de admissão de chamadas proposto de acordo com o arcabouço dos processos semi-markovianos de decisão. Os resultados numéricos utilizados para análise do impacto da diversidade de tamanhos de áreas de cobertura nas medidas de desempenho e na estrutura da política ótima são mostrados no capítulo 4. E por fim, são apresentadas as conclusões, onde também se decorrem algumas possibilidades de trabalhos futuros.

Publicações

Parte dos resultados mostrados nesta Dissertação foi previamente publicado em conferência internacional.

- Coutinho, R. W. L., Coelho, V. L., Costa, J. C. W. A., Carvalho, G. H. S., **Optimal Policy for Initial Selection Radio Access Technology in Next Generation Wireless Networks.** *In: International Telecommunications Symposium (ITS), 2010, Manaus - AM.*
- Coutinho, R. W. L., Coelho, V. L., Costa, J. C. W. A., Carvalho, G. H. S., **Optimal policy for Joint Call Admission Control in next generation wireless networks.** *In: International Conference on Network and Service Management (CNSM), 2010, Niagara Falls.*

Capítulo 1

Próxima Geração de Redes Sem Fio

Este capítulo apresenta as principais características e desafios encontrados na próxima geração de redes sem fio. Na Seção 1.1, é mostrado o caminho evolutivo até as redes 4G. Algumas definições de redes de próxima geração que surgiram na literatura são apresentadas na Seção 1.2. Ainda na Seção 1.2, são abordados alguns desafios de pesquisa desta nova geração de redes. Por fim, na Seção 1.3 é apresentado o problema de gerenciamento de recursos de rádio e os mecanismos utilizados para essa tarefa. Uma ênfase maior é dada ao Controle de Admissão de Chamadas (CAC), que é alvo deste trabalho.

1.1 Preliminares

Denominada de redes 4G ou redes heterogêneas, a próxima geração de redes sem fio será marcada pela heterogeneidade dos terminais dos usuários móveis e das tecnologias de acesso sem fio. Nesta nova geração, diferentes tecnologias de acesso sem fio atuarão de forma conjunta, colaborativamente, para provimento de cobertura ubíqua e contínua, a fim de atender aos usuários com alto padrão de mobilidade, com elevado nível de Qualidade de Serviço (QoS) [1].

Na Fig.1.1 é apresentado um cenário típico de redes de próxima geração. Nesta nova geração, os usuários móveis, portando terminais multimodais, serão hábeis a se conectarem na rede sem fio mais adequada. Assim, um dos principais desafios neste novo cenário é determinar a RSF que irá servir ao novo usuário móvel. Nesse processo, diversos parâmetros, tais como área de cobertura, potência do sinal recebido, custo do serviço, classe de serviço, atraso médio, preferência do usuário, entre outros, podem ser utilizados como auxiliares no processo de seleção [1].

A evolução das redes sem fio até a quarta geração é apresentada na Fig.1.2. De um lado têm-se as redes de telefonia celular, provendo acesso com grandes áreas de cobertura

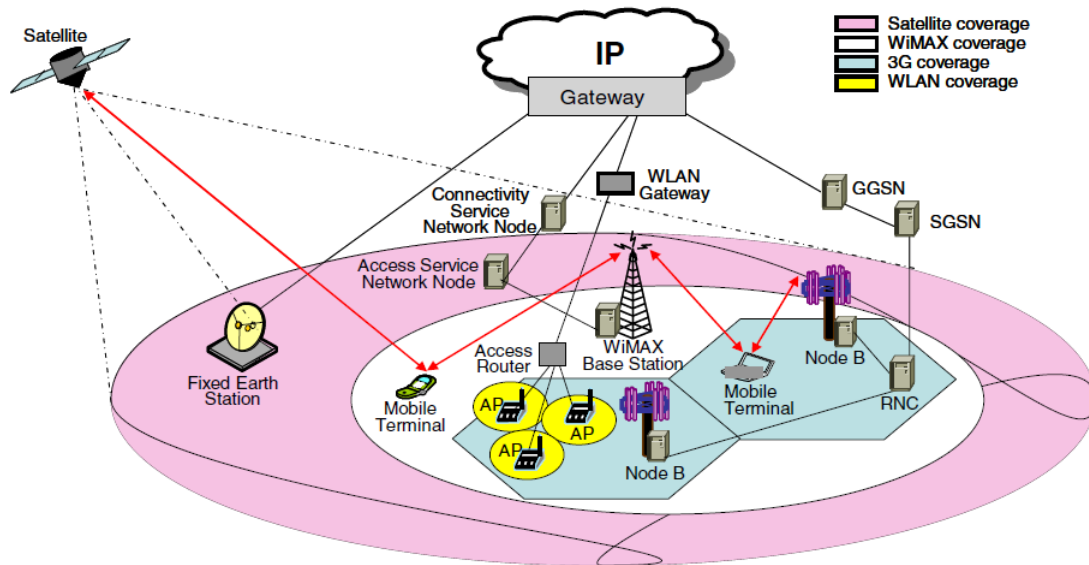


Figura 1.1: Exemplo de arquitetura heterogênea de redes sem fio [1].

para usuários móveis com alto padrão de mobilidade que, graças às evoluções das tecnologias de redes de acesso sem fio e dos equipamentos portáteis, cada vez mais demandam conteúdos multimídias. Do outro lado, tem-se as redes sem fio de acesso local (ou redes nomádicas), provendo serviços com altas taxas de transmissão à usuários com padrão de baixa mobilidade [2].

1.2 Definição da próxima geração de redes sem fio

Destinadas a conceituar a próxima geração de redes, algumas definições são apresentadas na literatura. Katz e Fitzek em [2], seguindo a recomendação M.1645 do ITU-R, na qual dita que o futuro dos sistemas de comunicação será alcançado pela fusão funcional de existentes, melhorados e novos elementos do atual sistema 3G, descreve que a próxima geração de redes será nada mais que sistemas de acesso sem fio nomádico e outros sistemas sem fio com alto grau de funcionalidades comuns, trabalhando conjuntamente de forma transparente. Ainda segundo os autores [2], o ITU não endossa o termo “4G”, se referindo a essa nova geração como “*beyond IMT-2000*”, principalmente pelo fato de que as gerações anteriores (1G-3G) se referiam aos sistemas celulares, enquanto que a próxima geração incorporará várias abordagens de acesso, principalmente celular e nomádica.

Já para a operadora japonesa NTT DoCoMo [8], a próxima geração de redes é definida a partir da introdução dos conceitos de multimídia móvel, suporte global de mobilidade e serviços pessoais customizados. Nessa visão, 4G é uma extensão dos sistemas 3G.

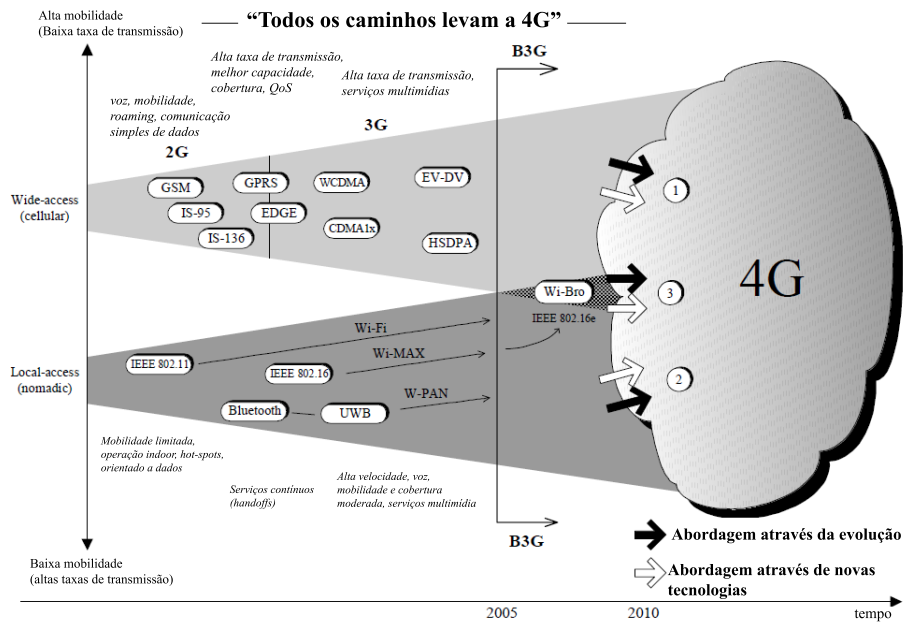


Figura 1.2: Caminhos que levam à Quarta Geração [2].

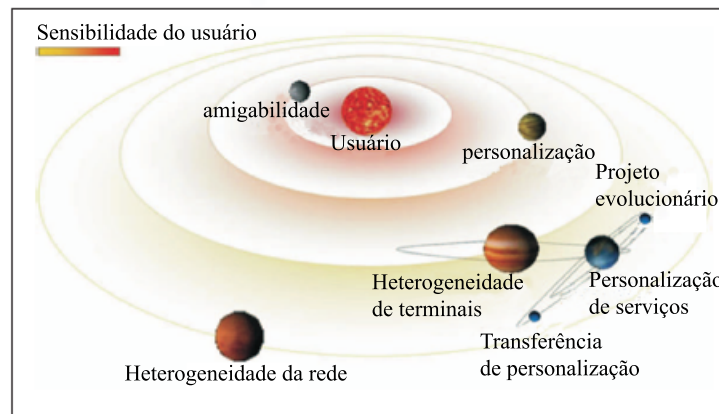


Figura 1.3: O sistema centrado ao usuário [3].

Frattasi *et al.* [3], propõe uma nova metodologia onde o usuário é a entidade central no projeto de redes 4G, como mostrado na Fig.1.3. Diante disso, os aspectos característicos aos usuários e suas interações são postos em uma vizinhança mais próxima, enquanto aspectos característicos das redes são colocados na extremidade do sistema. Isso é justificado através da visão de que as redes de próxima geração devem ser projetadas a partir das necessidades dos usuários e de cenários já identificados, pois, só assim, a tecnologia alcançará o sucesso de utilização.

1.2.1 Características da próxima geração de redes sem fio

Como já descrito nas seções anteriores, a principal característica da próxima geração de redes sem fio é a heterogeneidade das tecnologias de acesso que atuarão conjuntamente e dos terminais multimodais dos usuários móveis. A heterogeneidade da rede é devido à proliferação de tecnologias de acesso sem fio (Bluetooth, WiMAX, WiFi, UMTS, etc.), na qual se diferem em termos de área de cobertura, taxa de transmissão, latência e taxa de perdas. Já a heterogeneidade dos terminais dos usuários, se dá com relação a diversidade de equipamentos com diferentes tamanhos de visores, consumo de energia, pesos, capacidades de processamento, entre outras.

A personalização e a amigabilidade das aplicações com o usuário móvel também serão características da próxima geração de redes sem fio. O usuário móvel poderá configurar o modo operacional de seus dispositivos portáteis a fim de selecionar o conteúdo dos serviços de acesso com suas preferências e obter informações da forma mais amigável possível, em formato de texto, áudio ou vídeo.

Outras características presentes nas redes 4G são a telepresença, onde aplicações serão utilizadas para reuniões virtuais entre indivíduos móveis; informações a qualquer tempo e a qualquer lugar, com conexão virtual transparente; e segurança, acesso público e privado com altas taxas de transmissão.

1.2.2 Desafios de pesquisa na próxima geração de redes sem fio

Muitos dos aparatos tecnológicos da próxima geração de redes sem fio já são disponíveis e difundidos, visto que a nova geração as redes sem fio consiste na atuação colaborativa das tecnologias atuais e novas tecnologias de acesso. Contudo, para uma utilização cooperativa de forma transparente dessas redes, diversos desafios ainda precisam ser resolvidos.

Primeiramente, questões relacionadas ao projeto de interfaces aéreas é um fator crucial para que se possam alcançar taxas de transmissões cada vez mais elevadas e questões relacionadas com frequências, licenciadas ou não, e até mesmo interferências sejam minimizadas. Outros esforços de pesquisas são destinados ao projeto de antenas cada vez menores provendo acesso com maiores taxas com menores custos.

A infra-estrutura de redes da próxima geração consistirá de um conjunto de redes heterogêneas. A integração destas redes, do ponto de vista da aplicação, será possível graças ao protocolo IP. Como tema recorrente até mesmo nas redes 3G, questões relacionadas ao *handoff* tem sido alvo de pesquisas. Nesse novo cenário, essa questão é ainda mais desafiadora, pois, um usuário móvel poderá transitar ao longo de diversas redes distintas.

O gerenciamento de recursos de rádio, de forma eficiente, a fim de se ter atendimento ao usuário com garantias de QoS, sempre foi um problema até mesmo em redes homogêneas. Na próxima geração de redes sem fio, esse problema vem se mostrando mais desafiador visto que há necessidade do gerenciamento de recursos de rádio de forma conjunta, buscando-se alcançar uma estabilidade global da rede. Outro desafio consiste na seleção da RSF para atender o novo usuário e na manutenção do usuário conectado sempre na RSF mais adequada.

1.3 Gerenciamento de recursos de rádio

Recursos de rádio são frequentemente escassos e dispendiosos. Logo, uma utilização eficiente desses recursos sempre tem sido uma preocupação primária em redes sem fio. Algumas estratégias são utilizadas para a atribuição de recursos de rádio à novas chamadas [9]:

- **Alocação de canal fixa (FCA):** Cada célula de uma área atendida recebe um determinado número de canais de acordo com um padrão de reuso.
- **Alocação de canal dinâmica (DCA):** Todos os canais são disponíveis para todas as células e sempre que um evento de chegada de uma nova chamada, um canal, dentre um conjunto de canais disponíveis, é alocado, desde que satisfaça uma restrição.
- **Alocação de canal híbrida (HCA):** Consiste na combinação de antes descritas anteriormente. Assim, um conjunto de canais é alocado permanentemente para uma dada célula, enquanto que, outra parte, será compartilhada entre as células.

Com relação à gerência de tráfego, existem mecanismos que evitam e previnem o congestionamento e os que detectam o congestionamento e restauram o equilíbrio da rede. Dentre os primeiros, encontram-se os algoritmos de Controle de Admissão de Chamadas (CAC), no qual atuam alocando recursos, restringindo o acesso à rede de serviço de forma que um determinado nível de Qualidade de Serviço (QoS) seja satisfeito [9].

O principal objetivo dos algoritmos de CAC em redes sem fio é fazer o melhor uso dos recursos de rádio disponíveis enquanto garante que os requisitos de QoS de todas as chamadas em serviço sejam satisfeitos.

Diante desses requisitos e de demais fatores, os algoritmos de CAC devem decidir se recursos de rádio serão atribuídos a nova chamada, para que a mesma possa ser atendida com QoS. Caso não haja recursos suficientes ou, por alguma restrição, o algoritmo de CAC

Tabela 1.1: Critérios de seleção da RSF mais apropriado [4].

Preferências do Usuário	Preferências do Operador	Outros Critérios
Menor custo de serviço	Distribuição de carga uniforme	Requisitos de aplicação
Melhor QoS	Maximização do ganho	Capacidade residual da RSF
Maior área de cobertura	Otimização do consumo de energia	Capacidade do terminal móvel
Maior segurança	Minimização da perda de <i>handoffs</i>	-
Menor consumo de bateria	-	-

não possa admitir a chamada, esta será bloqueada. Com isso, previne-se e evita-se o congestionamento, além de, com o bloqueio controlado, ser possível minimizar efeitos relativos a custos e satisfação dos usuários.

Assim, algoritmos de CAC têm sido amplamente estudados na literatura [10–15]. Contudo, os tradicionais algoritmos de CAC projetados para redes homogêneas não provêm uma simples solução endereçadas às arquiteturas heterogêneas, a qual caracteriza a próxima geração de redes sem fio [1]. Isso se deve, principalmente, devido ao fato de que esses tradicionais algoritmos não possuem uma visão completa do sistema.

Diferentemente dos tradicionais algoritmos de CAC, algoritmos para Controle Conjunto de Admissão de Chamadas (CCAC), não são apenas responsáveis por decidir se uma nova chamada deverá ser aceita ou não, mas também deverão decidir qual RSF é a mais adequada para servir a nova chamada [1]. A decisão da RSF mais apropriada deve ser realizada levando-se em consideração diversos fatores, preferências do usuário e preferências do operador. Alguns destes são mostrados na Tabela 1.1.

1.3.1 Benefícios do CCAC

Em meio à heterogeneidade das redes sem fio, de terminais dos usuários e de requisitos das aplicações, os algoritmos de CCAC devem gerenciar serviços e tecnologias individuais, enquanto mantém uma visão global dos recursos disponíveis. Além disso, estes novos algoritmos de gerenciamento de recursos podem ser utilizados a fim de se alcançar os benefícios abaixo [1]:

- **Utilização eficiente dos recursos de rádio:** Recursos de rádio são frequentemente

escassos e dispendiosos. Uma utilização eficiente destes recursos faz-se necessário mesmo em redes homogêneas. Na próxima geração de redes sem fio, esses recursos devem ser gerenciados de forma global, enquanto as requisições dos usuários são admitidas com QoS;

- **Estabilidade global da rede:** Em um ambiente de redes heterogêneas, ao se gerenciar os recursos de forma conjunta, busca-se evitar que redes individuais estejam sobrecarregadas e passem a bloquear as requisições dos novos usuários, ao passo que outras redes estejam sendo subutilizadas;
- **Melhoria da satisfação do usuário:** Dada a diversidade de redes, com relação às taxas de transmissão, custos de serviços, área de cobertura e outros fatores, os usuários, hábeis a serem servidos em diversas redes, são destinados para a rede mais adequada, de acordo com suas preferências e/ou requisitos de suas aplicações. Esse mecanismo leva a um aumento na satisfação do usuário;
- **Incremento na recompensa do operador:** À medida que os recursos de rádio são utilizados de forma eficiente, maior será o ganho do operador.

1.3.2 Requisitos de algoritmos de CCAC

Alguns requisitos de projeto, identificados em [1], podem ser considerados no projeto de algoritmos de CCAC. Para iniciar, devido à diversidade das aplicações, o CCAC deve considerar um ambiente com múltiplas classes de serviço ([16, 17]).

Com relação à eficiência, diversas medidas de desempenho podem ser utilizadas como indicador de quão eficiente é o CCAC desenvolvido. Dentre estas, estão a utilização dos recursos de rádio [18], probabilidade de bloqueio de novas chamadas e *handoff* [19, 20], atraso médio, ganho/custo do operador e satisfação do usuário [16].

Os algoritmos de CCAC também devem ser simples e escaláveis, com custos computacionais e financeiros de implantação aceitáveis. Isso significa que devem requerer o menor custo computacional possível, além de um *overhead* controlado, para que não haja atrasos adicionais na rede. Com relação à escalabilidade, os algoritmos de CCAC devem suportar um aumento na demanda por serviços multimídias e um aumento na capacidade da rede, ao longo do tempo. Estes, ainda, necessitam de rapidez em execução, pois geralmente irão operar em tempo real.

E por fim, os algoritmos de CCAC devem ser projetados visando à garantia de uma estabilidade global do sistema. Isso se faz necessário devido ao fato de que uma determinada

Tabela 1.2: Relacionamento entre os requisitos de CCAC.

X - Requisitos conflitantes. \checkmark - Requisitos inter-relacionados.

Requisitos CCAC	Múltiplos serviços	Eficiência	Simplicidade	Alta velocidade
Simplicidade	X	X		
Alta velocidade		\checkmark		
Escalabilidade		\checkmark	\checkmark	\checkmark
Estabilidade		\checkmark	X	\checkmark

RSF pode ficar sobrecarregado e passar a bloquear as novas chamadas, ao passo que outros podem estar sendo subutilizados.

Entre esses requisitos, alguns são inter-relacionados e outros são conflitantes. A Tabela 1.2 mostra a relação entre esses requisitos.

1.3.3 Metodologias e considerações de projeto para o desenvolvimento de algoritmos de CCAC

Diversas metodologias podem ser empregadas para a implementação de algoritmos de CCAC. De uma forma simples, algoritmos de CCAC podem apenas realizar o encaminhamento das novas chamadas, entre as RSFs, de maneira aleatória ou de acordo com a ocupação de cada RSF [21], no instante de decisão. Nessa abordagem, o CCAC faz a decisão somente baseado em informações coletadas da rede. Apesar da simplicidade destas implementações, estes CCACs não serão eficientes, a probabilidade de bloqueio das chamadas (novas ou *hand-off*) é geralmente alta, levando a uma baixa satisfação do usuário.

Seguindo outra vertente, algoritmos mais elaborados e eficientes são projetados através da utilização de técnicas de inteligência artificial, como Lógica Fuzzy, Fuzzy-Neural, Fuzzy MADM [22] e Algoritmos Genéticos, ou através de modelos matemáticos bem definidos, como por exemplo, através de processos semi-markovianos de decisão [17], baseados em uma função de utilização/custo. Apesar de uma maior complexidade na utilização destas metodologias, tem-se CCACs mais eficientes, levando a uma melhor satisfação do usuário e a maximização de uma função objetivo.

Com relação ao projeto de algoritmos de CCAC, algumas considerações de projeto devem ser consideradas. Primeiramente, deve-se decidir se o CCAC deverá ser *centralizado* ou *distribuído*. Algoritmos centralizados são mais eficientes, contudo, necessitam de mais interações entre diferentes entidades da rede, o que pode levar a uma maior sinalização. Já os CCACs distribuídos, são mais escaláveis e diminuem a sinalização entre os terminais móveis

e uma entidade central, contudo, são menos eficientes que os anteriores [1].

Algoritmos de CCAC podem ser projetados centrados aos usuários ou à rede. No primeiro, preferências do usuário são consideradas para a seleção da rede mais adequada, como em [21]. Já para o segundo caso, decisões são feitas baseadas nas condições da rede, coletadas constantemente.

CCACs também são projetados para gerenciamento de recursos de forma ótima ou sub-ótima. Esse aspecto é atingido a partir da metodologia utilizada, na qual é justificada de acordo com os recursos disponíveis para implantação do CCAC. Em outras palavras, CCACs ótimos, desenvolvidos a partir de diversas técnicas de otimização, apesar de serem mais eficientes, podem ser difíceis de implementar devido ao alto grau de complexidade. Já os sub-ótimos, são menos eficientes, mas são mais fáceis para implementação.

E por fim, algoritmos de CCAC podem ser projetados visando a seleção inicial da RSF mais adequada ou para atuarem no gerenciamento de *handoffs*. CCAC destinados para a seleção inicial da RSF atuam encaminhando as novas chamadas para a RSF mais adequada, com base em algum critério pré-estabelecido. Já para o segundo caso, considerando diversos parâmetros, o CCAC deverá antecipar os *handoffs* e determinar a RSF na qual o usuário móvel será atendido, a fim de minimizar as probabilidades de bloqueio de chamadas provenientes de *handoff*.

1.4 Revisão bibliográfica e trabalhos desenvolvidos

Os diversos desafios presentes nesta nova geração de redes sem fio têm sido amplamente estudados na literatura. Para iniciar, em [17] e [18] são propostos algoritmos para controle de admissão e gerenciamento de recursos em um ambiente integrado de redes WiMAX e WiFi. Nestes trabalhos, a rede WiMAX atua como *backbone* para as redes WiFi, provendo acesso à Internet. O objetivo é gerenciar os recursos de rádio na Estação Base (*Base Station (BS)*) WiMAX, a fim de compartilhá-lo entre usuários WiMAX e dos *hotspots* WiFi. Em [17], o gerenciamento dos recursos da BS WiMAX, é realizado através de um algoritmo de CAC, desenvolvido por meio da utilização do arcabouço de processos semi-markovianos de decisão. Já em [18], o algoritmo proposto explora o melhor do algoritmo de compartilhamento completo (*Complete Sharing (CS)*) e do particionamento completo (*Complete Partitioning (CP)*).

Em [16] é proposto um *framework* para degradação de largura de banda e controle de admissão de chamadas. Com a degradação de largura de banda das chamadas em curso, é possível a admissão de um número maior de chamadas, o que leva a um aumento no ganho do operador. Contudo, esta operação acarreta uma queda na satisfação do usuário. Um ponto

de equilíbrio deve ser encontrado, dado que estes requisitos são conflitantes.

Questões relacionadas a vertical *handoff* são abordadas nos trabalhos [19, 20, 23]. Para iniciar, [19] propõe um algoritmo para decisão do *handoff* vertical, cujo objetivo é determinar as condições a qual o *handoff* deverá ocorrer. Chen *et al.* [20], propõe um algoritmo de CAC baseado em processo semi-markovianos de decisão generalizado, com diferentes prioridades entre as chamadas provenientes de *handoff* horizontal, *handoff* vertical e novas chamadas. Um modelo de preempção de canal para *handoff* vertical é proposto em [23]. Os autores consideram WLANs embarcadas em redes celulares, onde o usuário móvel fora da área de dupla cobertura poderá ser admitido por meio da preempção de canal na rede celular, quando todos os canais tiverem ocupados. As chamadas que sofrerão preempção serão correspondentes as conexões dos usuários presentes na dupla área de cobertura, que por sua vez, serão encaminhados para serem servidos na WLAN.

Destinados a seleção inicial da rede sem fio, nos trabalhos [4, 24, 25], os autores utilizam Lógica Fuzzy para a eleição da RSF mais adequada para atender ao novo usuário. A seleção da rede nestes trabalhos considera vários parâmetros, tais como potência do sinal, largura de banda, custo, latência, prioridade, cobertura, segurança, consumo de energia, carga da rede, e outros.

Ibrahim *et. al* [26] propõe um algoritmo de *JRRM* para a seleção inicial da RSF, considerando uma rede heterogênea composta por duas RSFs co-localizadas (WiMAX/UMTS). Para a seleção da RSF mais adequada para a admissão da chamada, o algoritmo proposto considera a carga em cada RSF, a distribuição espacial dos usuários já admitidos, a localização do usuário responsável pela nova chamada e sua influência no desempenho global. Duas classes de serviços são utilizadas: *streaming* e tráfego elástico.

Um gerenciador adaptativo de largura de banda e um controle conjunto de admissão de chamadas é proposto em [21]. O objetivo é melhorar a utilização média do sistema, garantir QoS para todas as chamadas admitidas, reduzir as probabilidades de bloqueio das novas chamadas e de perdas das chamadas de *handoff*. A rede com menor ocupação é selecionada para atender ao novo usuário.

Em [27] é proposto dois esquemas de gerenciamento de recursos onde o primeiro *Traffic-based Resource Management Scheme* (TRMS), aloca os recursos às novas chamadas baseado no tipo de tráfego, tipo de chamada (nova ou *handoff*), e largura de banda. O segundo, *Q-learning-based Resource Management Scheme* (QRMS), é formulado através de um processo markoviano de decisão, onde o algoritmo *Q-learning* é aplicado para a obtenção da política ótima de alocação de recursos.

Niyato e Hossain [28], estudam a dinâmica de seleção de rede em um ambiente

heterogêneo de redes sem fio, usando a teoria evolucionária dos jogos. Os autores apresentam dois algoritmos, na qual consideram o balanceamento de carga dirigido ao usuário em redes heterogêneas. Pengbo *et al.* [29] propõe um algoritmo distribuído para seleção da rede mais adequada, considerando parâmetros de tráfego multimídia na camada de aplicação.

No Capítulo 3 deste trabalho, é apresentada a modelagem de um CCAC ótimo com cunho em desempenho, destinado ao gerenciamento de recursos de diversas RSFs entre chamadas provenientes de uma interseção de áreas de cobertura. Para a modelagem com cunho em desempenho do sistema estudado, utilizou-se o arcabouço de processos semi-markovianos de decisão como ferramenta matemática. O CCAC proposto atua de maneira centralizada e além de decidir pelo aceite ou bloqueio da nova chamada, deverá selecionar a RSF para atender ao novo usuário.

Neste trabalho, considera-se a existência RSF nativa e RSF alternativa dos usuários móveis (ver Capítulo 3), com custos de admissão associados. Em [1], o tamanho de área de cobertura é apresentado como um fator que pode ser utilizado para a seleção inicial da RSF. Para justificar isso, o autor alega que um usuário móvel, a uma alta velocidade, deverá rapidamente exceder o limite de cobertura de uma RSF com pequena área de cobertura, o que levará a execução de diversos *handoffs* verticais, conseqüentemente, na degradação da QoS. Assim, uma alternativa é manter o usuário móvel conectado sempre na RSF com maior área de cobertura.

Contudo, isso poderia levar a uma instabilidade do sistema e ainda, esta RSF pode não ser adequada do ponto de vista da aplicação ou da preferência do usuário. Neste trabalho, também se utiliza a informação do tamanho do raio de cobertura da RSF. Diferentemente dos apresentados na literatura, aqui é investigado como este parâmetro pode impactar na política ótima de seleção da RSF. Uma das principais contribuições deste estudo é justamente esta análise, que foi permitida graças a derivação do tempo de permanência de um usuário móvel em uma RSF, em função da proporcionalidade dos raios de cobertura das diversas RSFs co-localizadas.

Capítulo 2

Cadeias de Markov e Processos Markovianos de Decisão

O objetivo deste capítulo é apresentar a metodologia empregada para modelagem analítica, com cunho em desempenho, do sistema dinâmico estudado. Na Seção 2.1, são apresentados os objetivos da avaliação de desempenho, e as soluções que podem ser adotadas. Quando se opta por uma modelagem analítica, Cadeias de Markov se mostram atrativas. A definição de Cadeias de Markov, bem como outros conceitos relativos a essa metodologia, são apresentados na Seção 2.2. Para sistemas dinâmicos que evoluem de acordo com tomadas de decisões, utiliza-se Processos Markovianos de Decisão, Seção 2.3, quando as decisões são tomadas em tempos equidistantes, ou seja, instantes de tempos discretos. Na Seção 2.4 são apresentados os processos semi-markovianos de decisão, utilizados para modelagem de sistemas onde decisões são tomadas em qualquer instante de tempo, ou seja, em tempo contínuo.

2.1 Preliminares

O objetivo da avaliação de desempenho é encontrar uma configuração sistêmica que forneça a melhor relação custo-benefício [9]. Podendo ser realizada em qualquer fase do ciclo de vida de um sistema, a avaliação de desempenho de sistemas pode ser feita através de três tipos de soluções: experimentação, modelagem analítica e simulação [30].

Em alguns casos, quando ainda não há o sistema a ser avaliado ou até mesmo quando se utiliza a solução analítica para avaliação de desempenho, deve-se projetar um modelo, que consiste em uma abstração do sistema, incluindo, 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 consiste na **especificação** do sistema, no qual é criada uma representação condizente ao sistema real, **parametrização**, que consiste na identificação dos valores de

entrada do modelo e, **solução**, onde simulações, experimentação ou uma modelagem analítica é utilizada para a avaliação de desempenho, e por fim, tem-se a **apresentação dos resultados**, onde conclusões acerca do sistema avaliado são dispostas.

Neste trabalho é adotada a modelagem analítica para avaliação de desempenho. Dentro da modelagem analítica, optou-se pela utilização de processos semi-markovianos de decisão para a modelagem do sistema dinâmico estudado. Assim sendo, nas próximas seções são apresentados os conceitos relativos a essa abordagem.

2.2 Cadeias de Markov

2.2.1 Definição

O processo estocástico $\{X_n, n = 0, 1, \dots\}$, com espaço de estados I , é uma cadeia de Markov se, para cada $n = 0, 1, \dots$,

$$P\{X_{n+1} = i_{n+1} | X_0 = i_0, \dots, X_n = i_n\} = P\{X_{n+1} = i_{n+1} | X_n = i_n\}, \quad (2.1)$$

para todos os valores possíveis de $i_0, \dots, i_{n+1} \in I$ [31, 32].

Em outras palavras, a Eq.(2.1) dita que um processo estocástico será uma cadeia de Markov se o estado futuro, $\{X_{n+1} = i_{n+1}\}$, depender da história pregressa do processo apenas através do estado atual, $\{X_n = i_n\}$. Assim, o processo segue a propriedade de Markov, também conhecida como ausência de memória (*memoryless*). Se a probabilidade de transição de estados na Eq.(2.1) for independente de n , ou seja,

$$P\{X_{n+1} = j | X_n = i\} = p_{ij}, i, j \in I, \quad (2.2)$$

tem-se uma cadeia de Markov dita estacionária ou com probabilidades de transição homogêneas no tempo [31, 32].

No caso acima em que o processo é observado em intervalos de tempos equidistantes, a cadeia é dita a tempo **discreto**. Para o caso onde o sistema é observado a qualquer instante de tempo, a cadeia de Markov é dita **contínua**, onde as probabilidades de transição de estados, estacionária (se independer de s) é dada por [31, 32]:

$$p_{ij}(t) = P\{X_{t+s} = j | X_s = i\}, \forall t \geq 0 \text{ e } s \geq 0. \quad (2.3)$$

Uma das formas de representação das probabilidades de transição de uma cadeia de Markov é através de uma **matriz de transição de estados** P , como

$$P = \begin{bmatrix} p_{00} & p_{01} & \dots \\ p_{10} & p_{11} & \dots \\ \vdots & \vdots & \ddots \end{bmatrix}, \quad (2.4)$$

onde $p_{ij} \geq 0 \forall i, j \in I$ e $\sum p_{ij} = 1 \forall i \in I$, para as cadeias de Markov a Tempo Discreto (CMTD) e, para as cadeias de Markov a Tempo Contínuo (CMTC), através da **matriz de taxas** ou **gerador infinitesimal**

$$Q = \begin{bmatrix} -q_{00} & q_{01} & \dots & q_{0N} \\ q_{10} & -q_{11} & \dots & q_{1N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -q_{N0} & q_{N1} & \dots & -q_{NN} \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

onde $q_{ii} = -\sum_{j=0}^N q_{ij}$, $\forall i, j \in I \wedge i \neq j$, na qual representa a taxa total de partida do estado i .

2.2.2 Classificação dos estados

Sejam as variáveis aleatórias v_i e τ_i o número de visitas e o tempo do primeira visita ao estado i , respectivamente. Os estados de uma cadeia de Markov são classificados com base em $P_i\{\tau_i < \infty\}$ e $E_i\{\tau_i\}$ ² como mostrado na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Classificação dos estados de uma cadeia de Markov.

	$P\{\tau_i < \infty\} < 1$	$P\{\tau_i < \infty\} = 1$
$E\{\tau_i\} < \infty$	-	Recorrente positivo
$E\{\tau_i\} = \infty$	Transiente	Recorrente nulo

Um estado i é **recorrente** se ele pode ser visitado infinitas vezes. Caso contrário, se a realização do processo visitar i um número finito de vezes, de modo que, após a última visita, o processo não entrar mais nesse estado, ele será chamado **transiente** ou **transitório**. Note que i é recorrente se [33]:

$$E\{v_i\} = \sum_{n=0}^{\infty} p_{ii}^n = \infty,$$

e transiente se $E\{v_i\} < \infty$.

² $E\{\cdot\}$ é o operador esperança

Diz-se que um estado $j \in I$ é acessível ou alcançado ($i \rightarrow j$) a partir de um estado $i \in I$, se $p_{ij}^n > 0$ para algum $n \geq 0$; caso contrário, j é inacessível a partir de i .

O estado j se comunica com i se ($i \rightarrow j$) e ($j \rightarrow i$). Um subconjunto de estados $C \in I$ é chamado fechado se nenhum estado fora dele (\bar{C})³ pode ser alcançado por qualquer outro estado dentro dele. Um estado que forma sozinho um conjunto fechado é chamado **absorvente**. Um conjunto fechado é chamado irredutível se nenhum subconjunto próprio dele é fechado. Uma cadeia de Markov é chamada irredutível se seu único conjunto fechado é o conjunto I de todos os seus estados.

Um estado i possui período $d(i)$ se $d(i)$ é o maior divisor comum de $n \geq 1$ tal que $p_{ii}^n > 0$. Se $d(i) = 1$, então i é **aperiódico**; caso contrário, $d(i) > 1$, então o estado i é **periódico**.

É importante citar que, a periodicidade, recorrência ou transiência são propriedades de classe. Isto é, em qualquer classe irredutível, todos os estados são recorrentes positivos ou nulos ou transitórios. No caso da periodicidade, em um conjunto com a mesma condição acima, todos os estados possuem o mesmo período [34].

Uma cadeia de Markov pode ser dividida em um conjunto de estados recorrentes (classes) $C_k, k = 1, 2, \dots, m$ com m finito em I e, possivelmente infinito, quando este é contável. Dessa forma, I pode ser escrito como: $I = C_1 \cup C_2 \cup \dots \cup C_m \cup T$, onde T é o conjunto de estados transientes [34]. Assim, chama-se de **forma canônica** de P a matriz [33]:

$$\bar{P} = \begin{bmatrix} P_1 & 0 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ 0 & P_2 & 0 & \cdot & \cdot & 0 \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ 0 & & & P_m & & 0 \\ Q_1 & Q_2 & \cdot & \cdot & Q_m & Q_{m+1} \end{bmatrix},$$

onde P_i corresponde às transições entre os estados C_i ; Q_i as transições a partir dos estados transientes em T para os estados em C_i ; e Q_{m+1} as transições entre os estados em T .

Para um conjunto finito I , usa-se a expressão cadeia única, *unichain*, para as cadeias consistindo de um único conjunto fechado irredutível, e um, possivelmente vazio, conjunto de estados transientes. Caso contrário, emprega-se o termo de cadeias múltiplas, *multichain*. Essa definição será usada posteriormente para definir a solução do critério de otimalidade usado no processo Semi-Markoviano de Decisão.

³ \bar{X} é o complemento de X

2.2.3 Comportamento limite da cadeia de Markov

Se uma cadeia é irredutível, recorrente positiva e aperiódica ⁴, então existe a probabilidade limite, chamada de distribuição estacionária para a cadeia de Markov, tal que [34]:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} p_{ij}^n = \pi_j > 0, \forall j,$$

o qual é independente do estado inicial i , onde $\{\pi_j, j = 0, 1, 2, \dots\}$ é a única solução para

$$\pi_j = \sum_{i=0}^{\infty} \pi_i p_{ij}, \forall j \geq 0 \quad \sum_{j=0}^{\infty} \pi_j = 1. \quad (2.6)$$

No caso da cadeia de Markov a tempo contínuo, tem-se que o comportamento limite para uma cadeia finita com N estados é dada por [34]:

$$\pi_j Q = 0, \quad \sum_{j=0}^N \pi_j = 1, \quad (2.7)$$

A probabilidade limite é fundamental para a análise de desempenho, pois, para o caso da cadeia única, π_j pode ser interpretada como a fração do tempo que a cadeia permanece no estado j .

2.3 Processo Markoviano de Decisão (PMD)

O PMD é um sistema dinâmico que evolui com uma lei de probabilidade de movimento controlada por decisões que são tomadas em instantes nos quais o estado do sistema é observado. Como consequência direta dessa decisão, incorre-se em um custo ou uma recompensa e em uma mudança de estado.

Ao observar o estado em um dado momento, uma decisão é tomada. Esses instantes são chamados de instantes de decisão. Baseado neles tem-se os Processos Markoviano de Decisão a Tempo Discreto (PMDTD) e o Semi-Markoviano de Decisão (PSMD). No primeiro, o sistema é observado e uma ação é tomada em instantes equidistantes ou discretos de tempo $t = 1, 2, \dots$. O último é uma generalização do PMD por permitir que o tempo até o próximo instante de decisão tenha uma distribuição de probabilidade arbitrária [35]. Particularmente, neste trabalho, a distribuição de probabilidade entre os instantes de tomada de decisão são variáveis aleatórias distribuídas exponencialmente, o que remete o PSMD a um PMD a tempo contínuo.

⁴A cadeia com essa característica é geralmente chamada de *ergódica*.

O conjunto de instantes de decisão pode ser finito ou infinito. Quando o mesmo é finito o problema de decisão é chamado horizonte finito; caso contrário, infinito.

Ao tomar uma decisão, atua-se no sistema por meio de uma ação a de um conjunto de ações disponíveis para o estado observado. Dessa forma, a ação exerce um papel fundamental no PMD, pois, ela “dita o rumo” do sistema em cada instante de decisão.

Ao escolher uma ação, deve-se seguir alguma política ou regra que, *a priori*, pode apresentar qualquer comportamento. Nesse conjunto de políticas existe uma sub-classe chamada de determinística e estacionária que prescreve a mesma ação R_i sempre que o sistema está no estado i em uma época de decisão. Como o caráter markoviano desse processo reside no fato de que o seu comportamento futuro é independente dos estados e ações passadas dado estado e a ação correntes [35], é intuitivo considerar somente as políticas determinísticas estacionárias [31][33]

Em um horizonte de planejamento infinitamente longo, dois critérios de otimalidade podem ser usados: custo descontado e custo médio. Neste trabalho é considerado o segundo critério, pois, ele é apropriado em sistemas no qual acontecem muitas transições em um curto espaço de tempo [31], que, particularmente, é o caso do modelo proposto.

2.3.1 O critério do custo médio para uma política estacionária

Para uma política estacionária R , o custo médio a longo prazo é dado por:

$$g_i(R) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} V_n(i, R)$$

onde $V_n(i, R)$ é o custo total esperado nos n primeiros instantes de decisão quando o estado i é visitado considerando a política R . De uma forma simplista, o custo médio é dado como a média aritmética do custo total no horizonte considerado.

No caso em que a cadeia de Markov X_n possui um único conjunto fechado de estados, caso *unichain*, sob a política R , o custo médio a longo prazo é independente do estado inicial [31]. Então:

$$g_i(R) = g(R) \quad \forall i \tag{2.8}$$

Uma política estacionária é dita ótima se

$$g_i(R^*) \leq g_i(R) \quad \forall i, \quad \forall R \tag{2.9}$$

A teoria dos PMD garante que a política estacionária R^* sempre existe, e que, ela é ótima entre todas as classes de políticas possíveis [31].

2.3.2 Algoritmo de Iteração de Valores (AIV)

A obtenção da política ótima pode ser feita tradicionalmente usando uma das três técnicas: algoritmo de iteração de políticas, algoritmo de iteração de valores e programação linear.

Dentre os métodos tradicionais o algoritmo de iteração de valores (AIV) mostra-se mais efetivo na solução de sistemas markovianos de decisão de grande porte. Pois, ele calcula o valor do custo total esperado recursivamente ao invés de resolver um sistema de equações lineares a cada iteração como é feito nos demais [31].

Para um PMD a tempo discreto, o algoritmo de iteração de valores computa recursivamente o valor⁵:

$$V_n(i) = \min_{a \in A(i)} \{c_i(a) + \sum_{j \in I} p_{ij}(a)V_{n-1}(j)\}, \quad i \in I,$$

iniciando de uma função arbitrariamente escolhida $V_0(i), \forall i \in I$.

A quantidade $V_n(i)$ pode ser interpretada como o custo esperado total mínimo com um horizonte de n períodos quando o estado corrente é i e um custo terminal $V_0(j)$ e acarretado ao sistema quando este pára no estado j [31][35].

Essa interpretação sugere que, para um horizonte suficientemente grande, a diferença em um passo $V_n(i) - V_{n-1}(i)$ estará muito próxima do custo médio mínimo por unidade de tempo, e quando $n \rightarrow \infty$, os limites:

$$m_n = \min\{V_n(i) - V_{n-1}\} \text{ e } M_n = \max\{V_n(i) - V_{n-1}\}$$

se aproximarão da taxa de custo mínimo.

Escolhendo $V_0(i)$ tal que $0 \leq V_n(i) \leq \min_a c_i(a), \forall i \in I$, tem-se que $V_1(i) \geq V_0(i) \forall i$, o que implica que cada termo da sequência não decrescente $\{m_n, n \geq 1\}$ é não negativo. Assim,

$$\frac{M_n - m_n}{m_n} \leq \varepsilon \Rightarrow \frac{g(f^n) - g^*}{g^*} \leq \varepsilon$$

isto é, o custo $g(f^n)$ da política f^n obtido na n -ésima equação não pode diferir mais que a precisão desejada ε do suposto custo mínimo g^* quando $\frac{M_n - m_n}{m_n} \leq \varepsilon$. Na Fig.2.1 tem-se o pseudo-código do algoritmo de iteração de valores:

⁵A prova de convergência do algoritmo de iteração de valores é encontrada na referência [31].

```

#1. INICIO
#2. Para cada estado  $i \in I$  e  $a \in A(i)$  escolher  $0 \leq V_n(i) \leq \min_a c_i(a)$ 
#3. Inicializar os valores  $m_n, M_n$  e  $\varepsilon$ 
#4. Para  $n = 1, 2, \dots$  fazer {
#5.   Para cada  $i \in I$  fazer {
#6.      $V_n(i) = \min_{a \in A(i)} \{c_i(a) + \sum_{j \in I} p_{ij}(a)V_{n-1}(j)\}$ 
#7.     Determinar  $f^n$  como a política estacionária cujas ações
        minimizam o lado direito da equação acima.
#8.   }
#9.   Calcular os limites:
#10.   $m_n = \min\{V_n(i) - V_{n-1}(i)\}$  e  $M_n = \max\{V_n(i) - V_{n-1}(i)\}$ 
#11.  O algoritmo pára com a política  $f^n$  se  $0 \leq \frac{M_n - m_n}{m_n} \leq \varepsilon$ 
#12. }
#13. FIM

```

Figura 2.1: Pseudo-código do algoritmo de iteração de valores.

2.4 Processo Semi-Markoviano de Decisão (PSMD)

Com mencionado anteriormente, o PMD é um processo que observa o estado do sistema em instantes fixos $t = 0, 1, 2, \dots$. Porém, nos modelos de desempenho abordados neste trabalho, os tempos entre as ocorrências dos eventos, instantes de decisão, não são idênticos, mas aleatórios. Tais problemas são analisados considerando um processo Semi-Markoviano de Decisão (PSMD).

No PSMD, se em um instante de decisão uma ação a é escolhida em um estado $i \in I$ então o tempo, o estado e o custo até o próximo instante de decisão dependem somente dos estado corrente e da ação escolhida.

Na confecção de um PSMD, além dos elementos já introduzidos como o estado $i \in I$, ação $a \in A(i)$, custo $c_i(a)$ e probabilidade $p_{ij}(a)$, é necessária também a definição do tempo esperado até a próxima época de decisão, $\tau_i(a)$, se a ação a é tomada no estado corrente i .

Considerando o custo médio por unidade de tempo a horizonte infinito como critério de otimalidade, é possível utilizar o algoritmo de iteração de valores para obter a política ótima, desde que, aplicando-se o método de uniformização [31].

Esse método converte um modelo de decisão markoviano a tempo contínuo em outro a tempo discreto tal que para cada política estacionária os custos médios por unidade de tempo são os mesmos em ambos modelos [35]. A uniformização é feita da seguinte forma:

- Escolher um número $0 < \tau < \min_{i,a} \tau_i(a)$
- Considerar o PSMD cujo o espaço de estados, espaço de ações, probabilidade, custo e tempo entre as transições são dados respectivamente por: I , $A(i)$, $p_{ij}(a)$, $c_i(a)$ e $\tau_i(a)$
- Considerar o PMD cujo espaço de estados, espaço de ações, probabilidade, custo sejam dados por:

$$\begin{aligned} \bar{I} &= I, \\ \overline{A(i)} &= A(i), & i \in \bar{I} \\ \overline{c_i(a)} &= \frac{c_i(a)}{\tau_i(a)}, & i \in \bar{I} \text{ e } a \in \overline{A(i)} \\ \overline{p_{ij}(a)} &= \begin{cases} \frac{\tau}{\tau_i(a)} p_{ij}(a), & i \neq j, i \in \bar{I} \text{ e } a \in \overline{A(i)} \\ \frac{\tau}{\tau_i(a)} p_{ij}(a) + [1 - \frac{\tau}{\tau_i(a)}], & i = j, i \in \bar{I} \text{ e } a \in \overline{A(i)} \end{cases} \end{aligned}$$

Utiliza-se a perturbação τ para garantir que toda política ótima induza a uma cadeia de Markov aperiódica, condição necessária para garantir $\lim_{n \rightarrow \infty} m_n = \lim_{n \rightarrow \infty} M_n = g^*$, onde g^* é o custo médio mínimo por unidade de tempo [35].

Capítulo 3

Avaliação de desempenho de redes sem fio co-localizadas

O objetivo deste capítulo é apresentar o modelo analítico proposto para o controle conjunto de admissão de chamadas em redes sem fio heterogêneas co-localizadas. O modelo de CCAC apresentado é formulado através de um processo semi-markoviano de decisão, no qual é possível a obtenção de uma política estacionária ótima para a seleção inicial da RSF. Ainda, neste capítulo são derivadas as medidas de desempenho utilizadas para a avaliação do modelo proposto. A descrição do sistema considerado, é apresentado na Seção 3.1. As considerações de tráfego utilizadas no modelo são descritas na Seção 3.2. A modelagem do sistema, de acordo com o arcabouço de PSMD, é apresentada na Seção 3.3.

3.1 Descrição do Sistema

Na próxima geração de redes, diversas redes sem fio (RSF) atuarão de forma conjunta e, os usuários móveis, dispostos de terminais multimodais, poderão ser atendidos na RSF mais adequada, de acordo com algum critério pré-estabelecido, como potência do sinal, tamanho da área de cobertura, custo de serviço, classe de serviço, taxa de transmissão, carga da rede, entre outros [1, 4, 27, 36]. Assim, o sistema sob consideração consiste de K redes sem fio (RSFs) dispostas de maneira co-localizada, como apresentado na Fig.3.1.

Atualmente, cada usuário possui um Contrato de Serviço com um Provedor de Serviço, o que lhe garante autenticação, autorização e contabilização (AAA - *Authentication, Authorization and Accounting*) na rede cujo domínio está sob a responsabilidade de seu Provedor de Serviço. Contudo, como já ocorre entre operadoras de redes de telefonia celular, há possibilidade de contratos serem estabelecidos entre Provedores de Serviço. Estes contratos, comumente conhecidos por *SLA - Service Level Agreement* [7], permitem que usuários móveis possam ser atendidos em redes de domínio de outros Provedores de Serviço, os quais seus

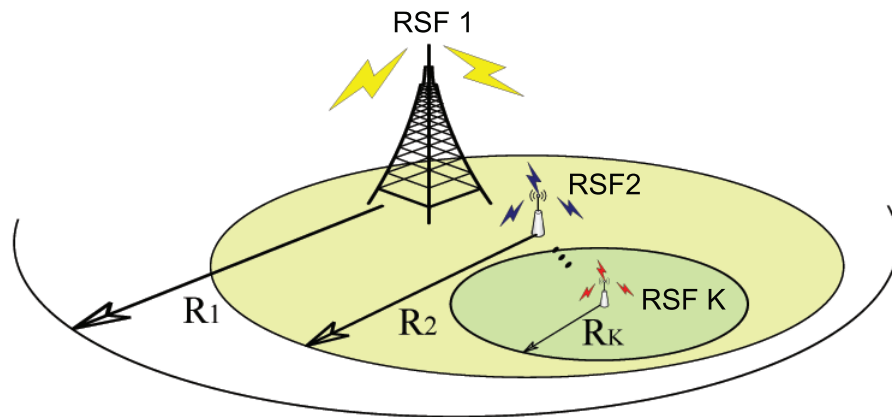


Figura 3.1: Exemplo de redes sem fio co-localizadas.

Provedores possuem acordos estabelecidos, garantindo acesso inicial ou *roaming*.

Assim, nessa nova geração de redes sem fio, da perspectiva do usuário móvel, denomina-se por **Rede Nativa** a RSF que pertence ao Provedor de Serviço na qual o usuário móvel possui contrato de serviço e, **Rede Alternativa**, as demais redes disponíveis de outros Provedores na qual o Provedor de Serviço do usuário móvel tem um acordo de serviço.

Neste cenário de redes co-localizadas, a j -ésima RSF ($j = \{1, \dots, K\}$), Fig.3.1, consiste de um enlace sem fio com B_j recursos de rádio, os quais são compartilhados entre as requisições dos usuários. O significado de uma unidade de recursos de rádio é dependente da especificação da implementação tecnológica da interface de rádio. Contudo, independente da tecnologia de acesso ao meio utilizada (FDMA, CDMA, TDMA ou OFDM), a capacidade do sistema é interpretada em termos de largura de banda efetiva ou equivalente [4].

Neste trabalho, o CCAC proposto atua na zona de interseção de áreas de cobertura, ou seja, gerenciando os usuários móveis presentes na região de interseção de áreas de coberturas, podendo ser servido em diversas RSFs.

A Fig.3.2 mostra de maneira conceitual, a visão do sistema. Um novo usuário, demandando uma conexão característica pela classe de serviço da aplicação, chega ao sistema informando sua RSF nativa. O CCAC, atuando de forma centralizada, para cada evento de chegada de um novo usuário, deverá decidir pela admissão (e selecionar a RSF mais adequada para isso) ou pelo bloqueio. De acordo com a decisão tomada, custos serão incorridos ($c_{b_i^j}$, $c_{a_i^j}$, ...). Estes custos são descritos na Seção 3.3.5.

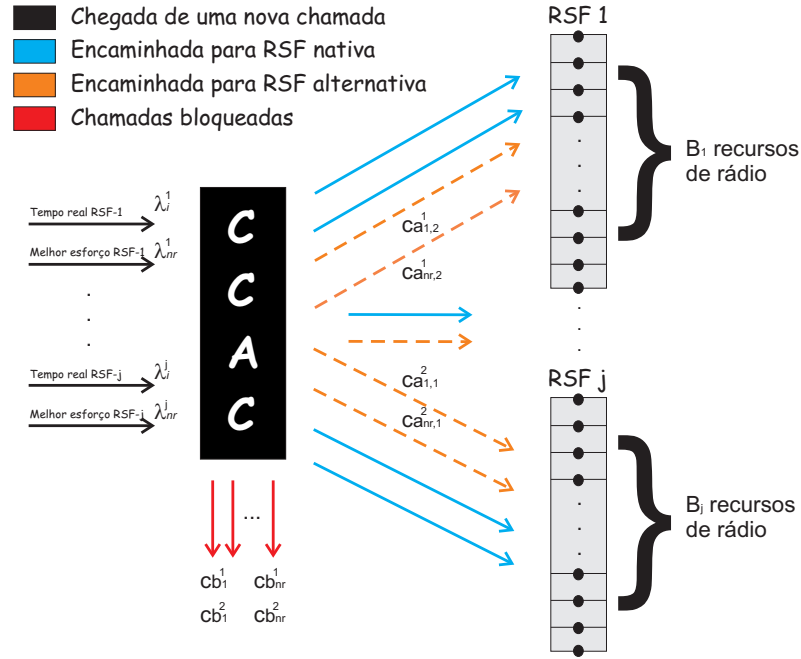


Figura 3.2: Visão conceitual do sistema.

3.2 Modelo de Tráfego

As requisições dos usuários móveis são dicotomizadas em duas classes de serviço: classe de serviço de tempo real e classe de serviço de melhor esforço. Suas características, buscando-se uma modelagem markoviana, são dadas a seguir.

3.2.1 Classe de Serviço de Tempo Real

As conexões da classe de serviço de tempo real (ex. voz, *streaming* de vídeo, etc.) são tolerantes a um certo grau de perdas, sensíveis ao atraso e variações de atraso e requisitam largura de banda constante a fim de serem servidas com garantias de Qualidade de Serviço (QoS). Em virtude da existência de vários tipos de aplicações de tempo real, considera-se i ($i = \{1, \dots, L\}$) tipos de tráfego desta classe de serviço.

De acordo com a literatura [17, 21, 29, 37, 38], o padrão de chegada das conexões da classe de serviço de tempo real segue um processo de Poisson. onde uma conexão da classe de serviço de tempo real i chega ao sistema, destinada nativamente à j -ésima RSF, com parâmetro λ_i^j e demanda b_i recursos de rádio.

O tempo de duração de uma chamada da classe de serviço de tempo real (T_{d_i}) é exponencialmente distribuído com valor médio $1/\mu_{d_i}$. Além do tempo de duração, é considerado o tempo de residência (T_{r_j}) na j -ésima RSF, que representa o tempo na qual um usuário

móvel permanece conectado na j -ésima RSF. Este tempo é definido de acordo com o modelo de mobilidade considerado.

Haja vista que alguns projetos de CCAC encontrados na literatura, como por exemplo [4–6, 23, 26], utilizam a informação de área de cobertura e devido a importância desse fator em um ambiente heterogêneo, buscando-se estudar o impacto desse fator no desempenho do sistema, o modelo de mobilidade adotado foi o proposto em [39], o qual também é utilizado em [40], cujo o tempo de residência na j -ésima RSF é exponencialmente distribuído, com valor médio dado por:

$$\mu_{r_j} = 0.7182 \frac{V}{R}, \quad (3.1)$$

onde V é a velocidade média do usuário móvel e R é o raio da área de cobertura da RSF. Dado a disposição das RSFs de maneira co-localizadas, a velocidade de um usuário móvel é a mesma ao longo das diversas áreas de coberturas. Portanto, o tempo de residência em cada RSF é diferenciado pelo tamanho do raio da área de cobertura. Considerando que $R_j = kR_w$ ($j, w \in \{1, \dots, K\}$), é a relação entre os raios da área de cobertura das RSFs j e w . Dado a Eq.(3.1) e a relação anteriormente mencionada, tem-se:

$$\frac{1}{\mu_{r_j}} = 1 / \left(0.7182 \frac{V}{kR_w} \right). \quad (3.2)$$

A partir da Eq.(3.1), pode-se derivar R_w como função de μ_{r_w} , como dado abaixo:

$$R_w = 0.7182 \frac{V}{\mu_{r_w}}. \quad (3.3)$$

Por fim, a partir da Eq.(3.3) e da Eq.(3.1), tem-se:

$$\frac{1}{\mu_{r_j}} = \frac{1}{\frac{0.7182V}{\frac{0.7182Vk}{\mu_{r_w}}}}, \quad (3.4a)$$

$$\frac{1}{\mu_{r_j}} = \frac{1}{\frac{1}{\frac{k}{\mu_{r_w}}}}, \quad (3.4b)$$

$$\frac{1}{\mu_{r_j}} = k \frac{1}{\mu_{r_w}}. \quad (3.4c)$$

A Eq.(3.4c) relaciona os tempos de residência nas RSFs j e w , a partir da proporcionalidade k ($k = R_j/R_w$) dos seus raios de área de cobertura.

O tempo de retenção T_h (*holding time*) é definido como o tempo decorrido entre o instante em que um canal é atribuído para servir uma chamada em uma RSF j qualquer e o instante em que o canal é liberado pelo usuário móvel, seja por completção da chamada ou por exceder a área de cobertura da RSF. Em particular, tem-se:

$$T_h = T_d, \quad (3.5)$$

se a chamada é finalizada na RSF na qual foi originada. Caso contrário, se o usuário móvel excede a área de cobertura da RSF antes de completar a chamada, tem-se:

$$T_h = T_{r_j}. \quad (3.6)$$

Portanto, conclui-se que:

$$T_h = \min\{T_d, T_{r_j}\}. \quad (3.7)$$

De acordo com Eq.(3.7) e dado que tanto T_d quanto T_{r_j} são exponencialmente distribuídos, o tempo de retenção de uma conexão da classe de serviço de tempo real i , na RSF j , definido pela variável aleatória $T_{h_i^j}$, também será exponencialmente distribuído com valor médio:

$$\mu_{h_i^j} = \mu_{d_i} + \mu_{r_j}. \quad (3.8)$$

Finalmente, a intensidade de tráfego da classe de serviço de tempo real, destinada nativamente para a j -ésima RSF, é definida por

$$\rho_i^j = \lambda_i^j / \mu_{h_i^j}. \quad (3.9)$$

3.2.2 Classe de Serviço de Melhor Esforço

As conexões da classe de serviço de melhor esforço compartilham igualmente os recursos não utilizados pelas conexões da classe de serviço de tempo real, o que significa que cada conexão de melhor esforço pode variar sua taxa de serviço ao longo do tempo, dependendo

do número de conexões de tempo real e de melhor esforço admitidas no sistema. Diante destas características, é considerado que todo o tráfego da classe de serviço de melhor esforço é agrupado em uma única classe de serviço.

Isso é possível devido ao mecanismo de degradação e compensação, que é capaz de cobrir uma variedade de aplicações de dados [37, 38]. Assim, conexões da classe de serviço de melhor esforço, destinadas nativamente à j -ésima RSF, chegam de acordo com um processo de Poisson com parâmetro λ_{nr}^j e podem ajustar sua largura de banda no intervalo entre $[b_m, b_M]$ recursos de rádio. Semelhante as conexões da classe de serviço de tempo real, conexões da classe de serviço de melhor esforço requisitam um tempo de duração exponencialmente distribuído, com valor médio $1/\mu_{d_{nr}}$ e o tempo de retenção para conexões desta classe de serviço, é dado *idealmente* por:

$$\mu_{h_{nr}^j} = \mu_{d_{nr}} + \mu_{r_j}. \quad (3.10)$$

A intensidade de tráfego das conexões da classe de serviço de melhor esforço, destinada nativamente à j -ésima RSF, é definida por

$$\rho_{nr}^j = \lambda_i^j / \mu_{h_{nr}^j}. \quad (3.11)$$

Estas considerações de tráfego são amplamente utilizadas na literatura [17, 21, 29, 37, 38].

3.3 Formulação do Modelo e Problema de Otimização

Um modelo confeccionado através de um PSMD é completamente especificado pela definição do espaço de estados, espaço de ações, épocas de decisão, tempo esperado até a próxima época de decisão, probabilidades de transições de estados e função custo. Esses componentes são escritos a seguir.

3.3.1 Espaço de Estados

O conjunto de espaço de estados representa todos os estados possíveis no qual o sistema poderá se encontrar. Sendo o sistema modelado com uma cadeia de Markov à tempo contínuo, com $[(L + 1) * K]$ -dimensões, o conjunto de estados possíveis do sistema é definido pela Eq.(3.12). Tem-se as linhas da matriz da Eq.(3.12) representando as RSFs do sistema e as colunas, as classes de serviço, onde m_i^j e m_{nr}^j representam o número de conexões da classe de serviço de tempo real i e da classe de melhor esforço, em serviço na j -ésima RSF,

$$\frac{1}{\mu_{p_{nr}}^j(x)} = \frac{1}{\mu_{d_{nr}}(x) + \mu_{r_j}}. \quad (3.15)$$

A variável aleatória e , na Eq.(3.12), representa o último evento ocorrido. Esta informação é introduzida no espaço de estados a fim de definir o conjunto de ações possíveis em cada estado. De acordo com a dinâmica do sistema, os valores de e podem ser:

$$e = \begin{cases} 0, \\ j, & j \in \{1, \dots, K\} \\ ij, & j \in \{1, \dots, K\} \wedge i \in \{1, \dots, L\}, \end{cases} \quad (3.16)$$

onde:

- $e = 0$ - Representa a partida de uma chamada qualquer;
- $e = j$ - Representa a chegada de uma chamada da classe de serviço de melhor esforço destinada nativamente à RSF j ;
- $e = ij$ - Representa a chegada de uma chamada da classe de serviço de tempo real i destinada nativamente à RSF j .

3.3.2 Épocas de Decisão e Conjunto de Ações

Épocas de decisão são os instantes de tempos onde uma conexão chega ou parte do sistema. Cada estado representa a configuração do sistema depois da ocorrência de um evento (ver Eq.(3.16)) e antes de uma decisão ter sido tomada. As épocas de decisões “reais” são as chegadas das conexões das classes de serviço de tempo real e de melhor esforço, isto é, na Eq.(3.16) tem-se $e = j, 11, 21, \dots, ij, \dots, LK$, enquanto as épocas de completção de serviço são definidas como épocas de decisão “fictícias”, $e = 0$. Em cada estado $x \in \Phi$, o controlador pode selecionar uma ação do conjunto de ações possíveis abaixo:

$$A(x) = \begin{cases} 0, & j \leq e \leq LK; \\ 1j, & j \leq e \leq LK \quad /b_e + \sum_{i=1}^L m_i^j b_i + m_{nr}^j b_m \leq B_j; \\ 2w, & j \leq e \leq LK \quad /b_e + \sum_{i=1}^L m_i^w b_i + m_{nr}^w b_m \leq B_w \quad \forall w \neq j, \end{cases} \quad (3.17)$$

onde b_e é $b_m(b_i)$ se $e = j$ ($e = ij$).

No conjunto de ações $a \in A(x)$, $x \in \Phi$, tem-se:

- $a = 0$ - Rejeição da nova chamada;

- $a = 1j$ - Admissão da nova chamada em sua RSF j nativa;
- $a = 2w$ - Admissão da nova chamada em uma RSF w alternativa.

3.3.3 Tempo esperado até a próxima época de decisão

Se o sistema se encontra no estado $x \in \Phi$ e a ação $a \in A(x)$ é tomada, o tempo esperado até a próxima época de decisão é definido pela Eq.(3.18).

$$\tau_x = \frac{1}{\sum_{j=1}^L \sum_{i=1}^K \lambda_i^j + \sum_{j=1}^K \lambda_{nr}^j + \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^K m_i^j \mu_{h_i^j} + \sum_{j=1}^K m_{nr}^j \mu_{h_{nr}^j}(x)}. \quad (3.18)$$

3.3.4 Dinâmica de transição de estados

A dinâmica de transição de estados, a forma no qual o sistema transita entre as configurações disponíveis, é completamente especificada pelas probabilidades de transição iniciais ao longo dos estados do sistema. Assim, $p_{xy}(a)$ representa a probabilidade de que na próxima época de decisão o estado do sistema será $y \in \Phi$ dado que o estado atual é $x \in \Phi$ e a ação $a \in A(x)$ é selecionada. Para $x \in \Phi$, dado pela Eq.(3.19), e $y \in \Phi$, tem-se os seguintes casos:

$$x = \left(\begin{array}{c} m_1^1, \dots, m_i^1, \dots, m_L^1, m_{nr}^1 \\ \vdots \\ m_1^j, \dots, m_i^j, \dots, m_L^j, m_{nr}^j \\ \vdots \\ m_1^w, \dots, m_i^w, \dots, m_L^w, m_{nr}^w \\ \vdots \\ m_1^K, \dots, m_i^K, \dots, m_L^K, m_{nr}^K \end{array} \right), e). \quad (3.19)$$

- Caso 1: $e = 0$ na Eq.(3.19) tem-se:

$$p_{xy}(a) = \left\{ \begin{array}{l} m_i^j \mu_{h_i^j} \tau_x(a), a = 0, \quad y = \left(\begin{array}{c} m_1^1, \dots, m_i^1, \dots, m_L^1, m_{nr}^1 \\ \vdots \\ m_1^j, \dots, m_i^j-1, \dots, m_L^j, m_{nr}^j \\ \vdots \\ m_1^w, \dots, m_i^w, \dots, m_L^w, m_{nr}^w \\ \vdots \\ m_1^K, \dots, m_i^K, \dots, m_L^K, m_{nr}^K \end{array} \right), e); /m_i^j > 0 \\ \\ m_{nr}^j \mu_{h_{nr}^j}(x) \tau_x(a), a = 0, \quad y = \left(\begin{array}{c} m_1^1, \dots, m_i^1, \dots, m_L^1, m_{nr}^1 \\ \vdots \\ m_1^j, \dots, m_i^j, \dots, m_L^j, m_{nr}^j-1 \\ \vdots \\ m_1^w, \dots, m_i^w, \dots, m_L^w, m_{nr}^w \\ \vdots \\ m_1^K, \dots, m_i^K, \dots, m_L^K, m_{nr}^K \end{array} \right), e); /m_{nr}^j > 0 \end{array} \right. \quad (3.20)$$

- Caso 2: $e = j$ na Eq.(3.19) tem-se:

$$p_{xy}(a) = \left\{ \begin{array}{l} \lambda_{nr}^j \tau_x(a), \quad a = 0, y = x; \\ \\ \lambda_{nr}^j \tau_x(a), \quad a = 1j, y = \left(\begin{array}{c} m_1^1, \dots, m_i^1, \dots, m_L^1, m_{nr}^1 \\ \vdots \\ m_1^j, \dots, m_i^j, \dots, m_L^j, m_{nr}^j+1 \\ \vdots \\ m_1^w, \dots, m_i^w, \dots, m_L^w, m_{nr}^w \\ \vdots \\ m_1^K, \dots, m_i^K, \dots, m_L^K, m_{nr}^K \end{array} \right), e); \\ \\ \lambda_{nr}^j \tau_x(a), \quad a = 2w, y = \left(\begin{array}{c} m_1^1, \dots, m_i^1, \dots, m_L^1, m_{nr}^1 \\ \vdots \\ m_1^j, \dots, m_i^j, \dots, m_L^j, m_{nr}^j \\ \vdots \\ m_1^w, \dots, m_i^w, \dots, m_L^w, m_{nr}^w+1 \\ \vdots \\ m_1^K, \dots, m_i^K, \dots, m_L^K, m_{nr}^K \end{array} \right), e) \forall w \neq j. \end{array} \right. \quad (3.21)$$

- Caso 3: $e = ij$ na Eq.(3.19) tem-se:

$$p_{xy}(a) = \begin{cases} \lambda_i^j \tau_x(a), & a = 0, y = x; \\ \lambda_i^j \tau_x(a), & a = 1j, y = \left(\begin{array}{cccc} m_1^1, & \dots, & m_i^1, & \dots, & m_L^1, & m_{nr}^1 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ m_1^j, & \dots, & m_i^j+1, & \dots, & m_L^j, & m_{nr}^j \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ m_1^w, & \dots, & m_i^w, & \dots, & m_L^w, & m_{nr}^w \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ m_1^K, & \dots, & m_i^K, & \dots, & m_L^K, & m_{nr}^K \end{array} \right), e); \\ \lambda_i^j \tau_x(a), & a = 2w, y = \left(\begin{array}{cccc} m_1^1, & \dots, & m_i^1, & \dots, & m_L^1, & m_{nr}^1 \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ m_1^j, & \dots, & m_i^j, & \dots, & m_L^j, & m_{nr}^j \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ m_1^w, & \dots, & m_i^w+1, & \dots, & m_L^w, & m_{nr}^w \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ m_1^K, & \dots, & m_i^K, & \dots, & m_L^K, & m_{nr}^K \end{array} \right), e) \forall w \neq j. \end{cases} \quad (3.22)$$

- 0 para os demais casos.

3.3.5 Função de Custo

A fim de se obter a política ótima para uma determinada configuração, uma função de custo é definida para medir o impacto de cada ação ao longo dos estados do sistema. Assim, se o sistema se encontra no estado $x \in \Phi$ e a ação $a \in A(x)$ é selecionada, o controle conjunto de admissão de chamadas incorre no seguinte custo

$$C_x(a) = C_B(x, a) + C_A(x, a), \quad (3.23)$$

onde $C_B(x, a)$ e $C_A(x, a)$ são os custos de bloqueio e de aceite em uma RSF alternativa, respectivamente. O custo de bloqueio representa uma penalidade dada sempre que um usuário requisitar a admissão e o CCAC decidir pelo bloqueio. Para conexões da classe de serviço de tempo real, este custo é definido por

$$C_B(x, a) = c_{b_i}, x \in \Phi, ij \leq e \leq LK, a = 0 \in A(x). \quad (3.24)$$

Já para as conexões da classe de serviço de melhor esforço, tem-se

$$C_B(x, a) = c_{b_{nr}}, x \in \Phi, e = j, a = 0 \in A(x). \quad (3.25)$$

O custo de aceitação na RSF alternativa representa a penalidade dada sempre que o CCAC opta pela admissão da nova chamada em uma RSF w alternativa. Este custo é definido pelas Eqs.(3.26) e (3.27), para novas chamadas da classe de serviço de tempo real e da classe de serviço de melhor esforço, respectivamente.

$$C_A(x, a) = c_{a_i^w}, x \in \Phi, ij \leq e \leq LK, a = 2w \in A(x). \quad (3.26)$$

$$C_A(x, a) = c_{a_{nr}^w}, x \in \Phi, e = 0, a = 2w \in A(x). \quad (3.27)$$

Com $\tau_x(a)$, $p_{xy}(a)$ e $C_x(a)$, usando o algoritmo de iteração de valores e o método de uniformização [31], pode-se obter a política estacionária ótima de CCAC. Uma política estacionária R , definida pela regra de decisão $f : \Phi \rightarrow A$, prescreve a ação $f(x) \in A(x)$ cada vez que o sistema é observado no estado $x \in \Phi$.

3.3.6 Medidas de desempenho

Nesta seção, são derivadas as medidas de desempenho utilizadas para avaliar o modelo proposto. Primeiramente, tem-se o tráfego médio escoado, que é calculado pela Eq.(3.28), onde $\pi_x(\forall x \in \Phi)$ é a distribuição de probabilidade em estado de equilíbrio da cadeia de Markov à tempo contínuo, obtida sob a política ótima.

$$O_e^a = \sum_{\substack{x \in \Phi; \\ j \leq e \leq LK; \\ a=1j, 2w \in A(x)}} \left(\sum_{j=1}^K \sum_{i=1}^L \lambda_i^j + \sum_{j=1}^K \lambda_{nr}^j + \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^K m_i^j \mu_{h_i^j} + \sum_{j=1}^K m_{nr}^j \mu_{h_{nr}^j}(x) \right) \pi_x \quad (3.28)$$

Dado O_e^a , pode-se derivar as probabilidades de bloqueio das conexões da classe de serviço de tempo real i , e das conexões da classe de serviço de melhor esforço, em sua RSF j nativa pelas Eq.(3.29) e Eq.(3.30), respectivamente.

$$P_{b_i^j} = 1 - \frac{O_{ij}^{1j}}{\lambda_i^j}. \quad (3.29)$$

$$P_{b_{nr}^j} = 1 - \frac{O_j^{1j}}{\lambda_{nr}^j}. \quad (3.30)$$

A utilização de largura de banda é definida como a relação entre o número médio de canais ocupados e o número total de canais. Diante disso, é derivado a utilização individual em cada RSF j ($j \in \{1, \dots, K\}$)

$$U_{RSF-j} = \frac{1}{B_j} \sum_{\substack{x \in \Phi; \\ a \in A(x); \\ m_i^j > 0; \\ m_{nr}^j > 0}} \left(\sum_{i=1}^L m_i^j b_i + m_{nr}^j b_{nr}^j(x) \right) \pi_x. \quad (3.31)$$

Capítulo 4

Resultados

O objetivo deste capítulo é verificar o comportamento ótimo do sistema, com relação à seleção inicial da RSF, quando se tem redes co-localizadas com tamanhos de área de cobertura iguais e diferentes.

Este capítulo está organizado da seguinte forma: a parametrização do modelo é apresentada na Seção 4.1. Já na Seção 4.2, é mostrado como a variação no tamanho da área de cobertura das redes co-localizadas impactam no desempenho do sistema. O impacto na estrutura da política ótima de seleção inicial da RSF é apresentado na Seção 4.3.

4.1 Parametrização do modelo

O experimento realizado considera a existência de duas RSFs co-localizadas, ou seja, $K = 2$. Isso devido a existência de sistemas de telecomunicações dispostos dessa forma, como por exemplo, redes GSM com micro e macro-células [41], redes WiMax/WiFi, redes de telefonia e WiFi. Também é considerada a existência de duas classes de serviço: uma classe de serviço de tempo real e a classe de serviço de melhor esforço.

Com relação ao tempo de residência, semelhante ao trabalho [41], tem-se para a RSF-1, $\mu_{r_1} = \mu_{d_i}/8$. O tempo de residência na RSF-2 é obtido através da Eq.(3.4c), considerando $k = 5$, ou seja, $R_1/R_2 = 5$. Na Tabela 4.1 são apresentados os demais parâmetros.

4.2 Resultados Numéricos

4.2.1 Resultados para a classe de serviço de tempo real

A Fig.4.1 mostra a probabilidade de bloqueio e o tráfego médio escoado das conexões da classe de serviço de tempo real destinada nativamente à RSF-1 *versus* a in-

Tabela 4.1: Configuração do Sistema.

Parâmetro		Valor
Números de canais	$B_1 = B_2$	30 canais
Largura de banda das chamadas de tempo real	b_1	2 canais
Largura de banda das chamadas de melhor esforço	$[b_m, b_M]$	[1,2] canais
Tempo de duração das chamadas de tempo real	$1/\mu_{d_1}$	180 s
Tempo de duração das chamadas de melhor esforço	$1/\mu_{d_{nr}}$	600 s
Custo de bloqueio das chamadas de tempo real	$c_{b_1^1} = c_{b_1^2}$	1
Custo de bloqueio das chamadas de melhor esforço	$c_{b_{nr}^1} = c_{b_{nr}^2}$	0.9
Custo de aceite na RSF alternativa das chamadas de tempo real	$c_{a_1^1} = c_{a_1^2}$	0.04
Custo de aceite na RSF alternativa das chamadas de melhor esforço	$c_{a_{nr}^1} = c_{a_{nr}^2}$	0.02

tensidade de tráfego ($\rho_1^1 = \rho_{nr}^1$) e a taxa entre os raios de área de cobertura (k).

A Fig.4.1.a mostra que quando k e $\rho_1^1 = \rho_{nr}^1$ incrementam, o CCAC ótimo decide que é melhor admitir as conexões da classe de serviço de tempo real, que são nativamente destinadas a RSF-1, em sua RSF nativa. Este comportamento é corroborado por meio da análise da Fig.4.1.b, a qual retrata o tráfego médio escoado das conexões da classe de serviço de tempo real (O_{11}^{22}) na RSF alternativa (#2) *versus* $\rho_1^1 = \rho_{nr}^1$. Como pode ser observado, O_{11}^{22} decrementa na RSF alternativa (#2) quando k incrementa, o que indica que o CCAC ótimo diminui a decisão da admissão na RSF alternativa (#2).

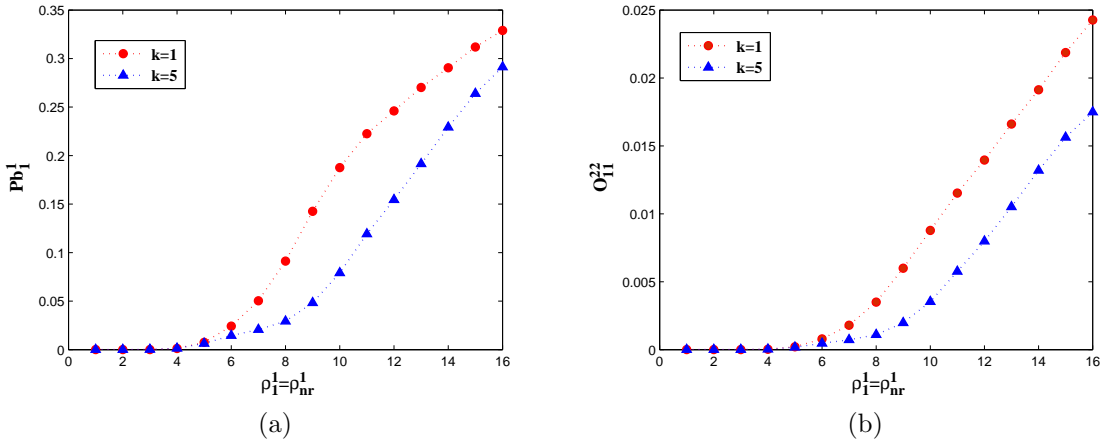


Figura 4.1: (a) Probabilidade de bloqueio das conexões de tempo real em sua RSF nativa (#1). (b) Tráfego médio escoado de tempo real na RSF alternativa (#2).

A Fig.4.2 confirma a afirmação anterior, mostrando que as conexões da classe de serviço de tempo real, destinadas nativamente para a RSF-2, são encaminhadas e admitidas na RSF alternativa (#1). Na Fig.4.2.a, para ambos valores de k , a probabilidade de bloqueio é aproximadamente a mesma, até $\rho_1^1 = \rho_{nr}^1 = 10$. Deste ponto em diante, a probabilidade de

bloqueio na RSF-2, para $k = 5$, incrementa rapidamente, que é seguido por um incremento no tráfego médio escoado das conexões da classe de serviço de tempo real, na RSF alternativa (#1), conforme pode ser visto na Fig.4.2.b. Por meio da análise da Fig.4.2.b, é possível concluir que o CCAC ótimo decide que é mais adequado, nestas configurações, bloquear uma conexão da classe de serviço de tempo real na sua RSF nativa (#2) e encaminhá-la para ser servida na RSF alternativa (#1).

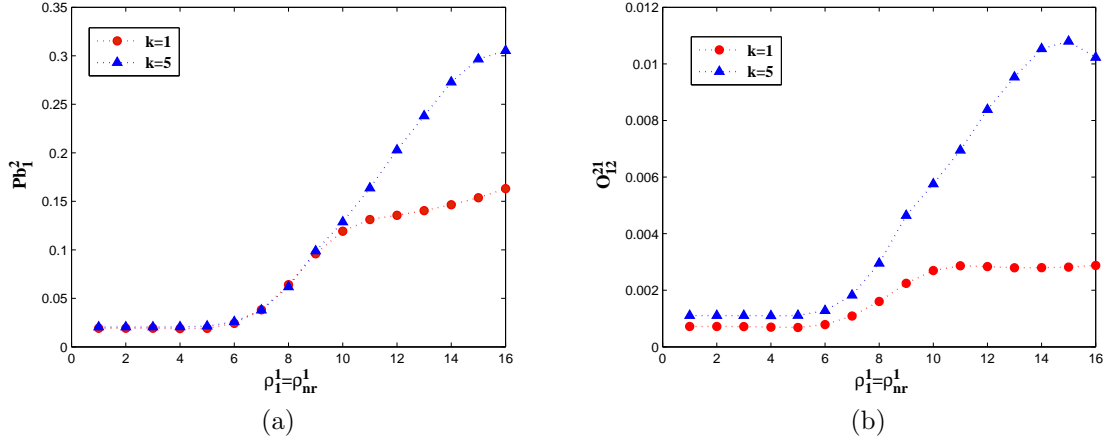


Figura 4.2: (a) Probabilidade de bloqueio das conexões de tempo real em sua RSF nativa (#2). (b) Tráfego médio escoado de tempo real na RSF alternativa (#1).

4.2.2 Resultados para a classe de serviço de melhor esforço

A Fig.4.3 mostra a probabilidade de bloqueio e o tráfego médio escoado das conexões da classe de serviço de melhor esforço destinada nativamente à RSF-1 *versus* a intensidade de tráfego ($\rho_1^1 = \rho_{nr}^1$) e a taxa entre os raios de área de cobertura (k). Já na Fig.4.4, as medidas de desempenho mostradas são referentes as conexões da classe de serviço de melhor esforço destinada nativamente à RSF-2.

As Figs.4.3 e 4.4 mostram que quando k e $\rho_1^1 = \rho_{nr}^1$ incrementam, o CCAC ótimo decide que é melhor concentrar as conexões de melhor esforço na RSF-2, independentemente se a RSF-2 é nativa ou alternativa para o usuário móvel. Neste sentido, como pode ser visto na Fig.4.3.a, existe um incremento na probabilidade de bloqueio das conexões de melhor esforço destinadas nativamente para a RSF-1. Isso ocorre devido o CCAC ótimo optar pelo roteamento e admissão destas conexões na RSF alternativa (#2), como pode ser visto na Fig.4.3.b, que mostra o tráfego médio de melhor esforço *versus* $\rho_1^1 = \rho_{nr}^1$. A Fig.4.4.a mostra que a menor probabilidade de bloqueio das conexões de melhor esforço acontece quando $k = 5$. Este comportamento é um indicativo de que o CCAC ótimo decide manter estas conexões em sua RSF nativa (#2). Isto é ratificado na Fig.4.4.b, na qual é possível verificar que o tráfego

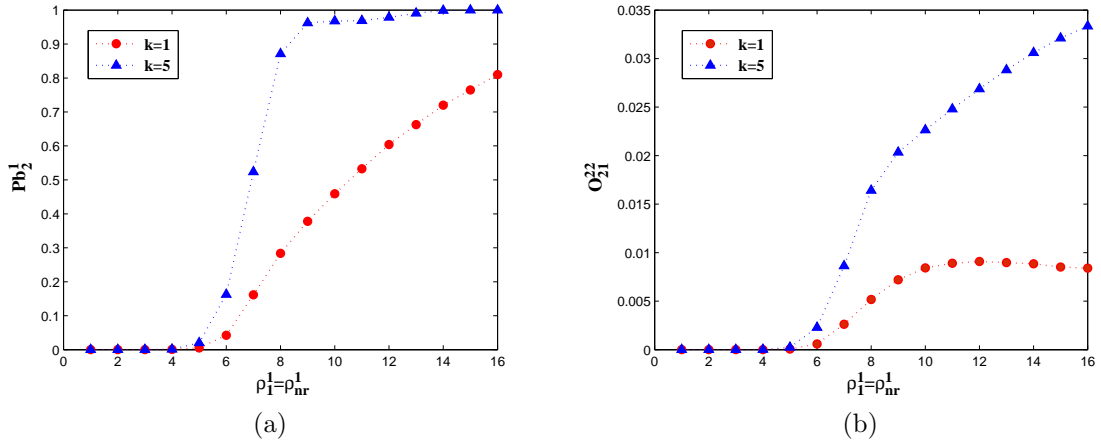


Figura 4.3: (a) Probabilidade de bloqueio das conexões de melhor esforço em sua RSF nativa (#1). (b) Tráfego médio escoado de melhor esforço na RSF alternativa (#2).

médio escoado das conexões de melhor esforço na RSF alternativa (#1) decreta com o incremento no valor de k .

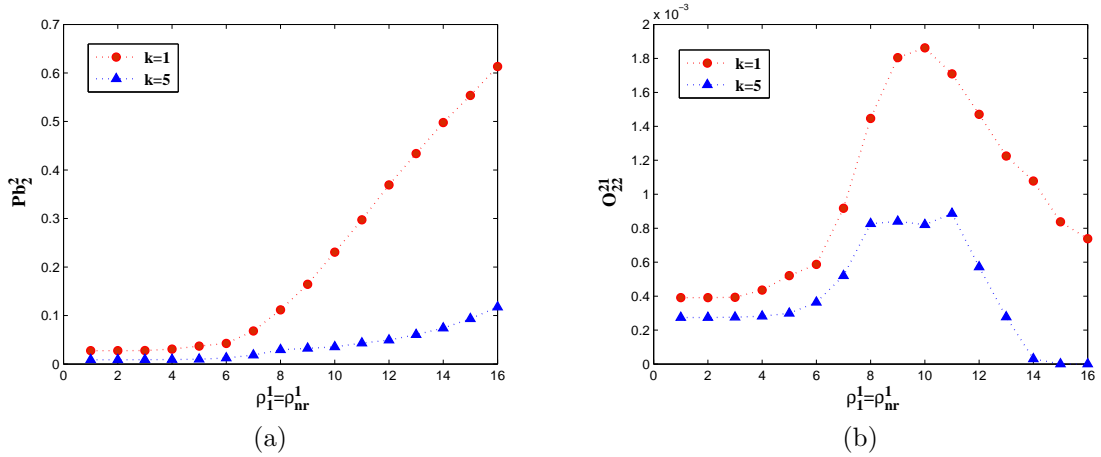


Figura 4.4: (a) Probabilidade de bloqueio das conexões de melhor esforço em sua RSF alternativa (#2). (b) Tráfego médio escoado de melhor esforço na RSF alternativa (#1).

4.2.3 Resultados para a utilização de recursos de rádio e custo ótimo

A Fig.4.5.a mostra que a utilização de recursos de rádio para ambos valores de k , na RSF-1, segue aproximadamente a mesma até $\rho_1^1 = \rho_{nr}^1 = 6$. Deste ponto em diante, é perceptível que para $k = 5$, a utilização dos recursos de rádio na RSF-1 decreta. Isto é atribuído ao fato de que o CCAC ótimo decide encaminhar e aceitar as conexões de melhor

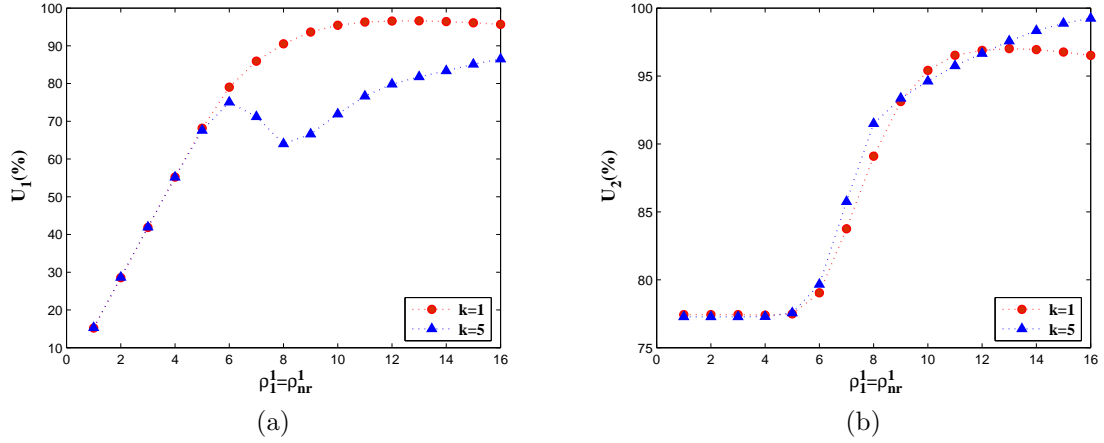


Figura 4.5: Utilização de recursos de rádio *versus* $\rho_1^1 = \rho_{nr}^1$. (a) RSF-1. (b) RSF-2.

esforço na RSF-2, como pode ser visto na Fig.4.3.b. Contudo, a partir do ponto $\rho_1^1 = \rho_{nr}^1 = 8$, a utilização dos recursos de rádio para $k = 5$ volta a crescer novamente. Este crescimento é motivado pela transferência das conexões de tempo real nativamente destinadas para a RSF-2 para a RSF-1, como pode ser visto na Fig.4.2.b. Comparando as Fig.4.5.a e 4.5.b, é possível perceber que a utilização dos recursos de rádio para ambos os valores de k cresce mais rapidamente na RSF-1 do que na RSF-2. Isto acontece porque a intensidade de tráfego na RSF-2 permanece a mesma $\rho_1^2 = \rho_{nr}^2 = 6$, ao passo que, na RSF-1, há um incremento até 16 ($\rho_1^2 = \rho_{nr}^2 = 1$ à 16). Analisando a Fig.4.5.b, também é possível notar que a utilização dos recursos de rádio na RSF-2 é praticamente a mesma para ambos valores de k .

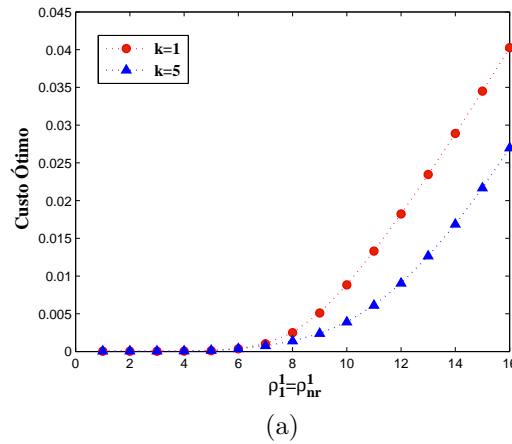


Figura 4.6: Custo ótimo *versus* $\rho_1^1 = \rho_{nr}^1$.

Por fim, a Fig.4.6 mostra que, para a configuração utilizada, o custo ótimo decresce com o incremento no valor de k . Isto acontece porque apesar da aceitação de mais conexões nas RSFs alternativas quando $k = 5$, as probabilidades de bloqueio (principalmente para as conexões de tempo real) são menores, fato que muito contribui para a redução do

custo ótimo. Essa diminuição é devido aos seguintes fatos: (i) quando $k = 5$ tem-se, por meio da Eq.3.4c, um menor tempo de residência na RSF-2, do que quando $k = 1$. Isto resulta em um menor tempo de retenção, Eq.3.15. Como consequência, os recursos de rádio tornam-se disponíveis para uma nova conexão mais rapidamente do que quando $k = 1$, o que leva a uma redução nas probabilidades de bloqueio e conseqüentemente no custo ótimo; (ii) Ao colocar junto as conexões de melhor esforço na mesma RSF (#2), o CCAC ótimo faz um melhor uso do mecanismo de degradação e compensação, reduzindo as probabilidades de bloqueio na RSF-2.

4.3 Estrutura da política ótima

Nesta seção são analisados alguns resultados da política ótima, o qual ratifica as conclusões apresentadas anteriormente. Para ilustrar a política ótima, é selecionado o caso quando $\rho_1^1 = \rho_{nr}^1 = 14$. Nas Tabelas 4.2 e 4.3, a seguinte notação foi adotada:

- Notação ‘+’ representa os casos no qual o CCAC ótimo aceita uma conexão de melhor esforço nativamente na RSF-1, sem considerar a ocupação dos recursos de rádio na RSF alternativa (#2);
- Notação ‘o’ representa os casos no qual o CCAC ótimo considera a ocupação dos recursos de rádio da RSF alternativa (#2) para tomar a decisão. Neste caso, pode ser: aceitar na RSF nativa (#1), aceitar na RSF alternativa (#2) ou bloquear;
- Notação ‘*’ representa os casos no qual o CCAC ótimo considera a ocupação dos recursos de rádio da RSF alternativa (#2) para tomar a decisão. Neste caso, pode ser: aceitar na RSF alternativa (#2) ou bloquear;
- Notação ‘-’ representa os casos no qual o CCAC ótimo aceita uma conexão de melhor esforço alternativamente na RSF-2.

A Tabela 4.2 mostra que para $k = 1$, quando a ocupação dos recursos de rádio é baixa (‘+’), o CCAC ótimo decide que é melhor aceitar diretamente as conexões de melhor esforço nativamente destinadas para a RSF-1. Para moderada (‘o’) e alta (‘*’) ocupação dos recursos de rádio na RSF-1, o CCAC ótimo considera a ocupação dos recursos da RSF alternativa (#2) para tomar a decisão. A diferença entre a política ótima para moderada e alta ocupação, corresponde ao aceite na RSF nativa (#1). Para ocupação de recursos moderada, o CCAC ótimo ainda aceita na RSF nativa, diferentemente de quando a ocupação dos recursos

Conclusões

Em meio aos prelúdios da próxima geração de redes sem fio, o problema de gerenciamento de recursos e seleção inicial da rede vem se mostrando mais desafiadores do que os já conhecidos das gerações anteriores. Diante disso, neste trabalho é desenvolvido um Controle Conjunto de Admissão de Chamadas (CCAC) em um ambiente de redes co-localizadas.

Na próxima geração de redes sem fio, os algoritmos de CCAC devem decidir se uma nova chamada deverá ser admitida ou bloqueada e também selecionar a rede sem fio (RSF) em que a nova chamada deverá ser admitida. O CCAC proposto teve por objetivo a modelagem analítica com cunho em desempenho deste sistema dinâmico e complexo, por meio do arcabouço de processos semi-markovianos de decisão (PSMD).

No Capítulo 1, foram apresentadas as definições existentes na literatura para conceituar a quarta geração de redes, e os desafios característicos desta nova geração de redes. Uma ênfase foi dada ao problema de gerenciamento de recursos, visto que é um problema recorrente nas demais gerações de redes, e a seleção inicial da RSF, problema que advém desta nova geração. Visando uma modelagem analítica com cunho em desempenho do sistema estudado, utilizou-se o arcabouço de PSMD, apresentado no Capítulo 2.

A modelagem do sistema estudado, de acordo com PSMD, foi apresentada no Capítulo 3. Neste capítulo foi descrito detalhadamente o sistema de redes co-localizadas considerado. Além disso, foi apresentada a função de custo utilizada para obtenção da política ótima de seleção inicial da RSF. Nesta função de custo, considerou-se o custo de bloqueio de uma nova chamada e o custo de admissão da nova chamada em uma RSF de domínio de outro Provedor de Serviço na qual o usuário móvel não possui um Contrato de Serviço, custo esse denominado de custo de aceite na RSF alternativa. O Capítulo 3 é finalizado com a apresentação das métricas de desempenho utilizadas para avaliação de desempenho do modelo proposto.

Os experimentos utilizados para avaliação de desempenho do modelo proposto foram apresentados no Capítulo 4. Um estudo foi realizado visando analisar o impacto da diversidade de tamanhos de áreas de cobertura das redes co-localizadas, no desempenho do sistema e na estrutura da política ótima. A partir destes experimentos, foi possível concluir

que a proporcionalidade dos tamanhos de áreas de coberturas das RSF co-localizadas, impacta diretamente na estrutura da política ótima e no desempenho do sistema.

Além do mais, à medida que essa proporção aumenta, a tendência é que as chamadas de tempo real sejam direcionadas para serem atendidas na RSF de maior área de cobertura, ao passo que as chamadas de melhor esforço, na RSF de menor área de cobertura. Este fato foi identificado, mesmo com a consideração de custos associados com estas operações.

Para a realização dos experimentos, a parametrização do modelo proposto considerou duas RSFs genéricas, contudo, o modelo é extensível e pode ser customizado, a fim de prover *insights* necessários para o projeto de heurísticas cuja implementação em um sistema real é mais barata.

Lidar com sistemas amplamente complexos, semelhantes às redes sem fio de hoje e do futuro, é uma tarefa bastante difícil. Assim, um modelo que pode auxiliar no projeto de redes sem fio, durante a fase de planejamento do sistema, otimização e operação, torna-se uma ferramenta válida e indispensável. Isto também é um fator que justifica a confecção deste modelo. Políticas ótimas obtidas via modelos analíticos, em sistemas de telecomunicações homogêneos figuram-se como de difícil implementação, o que se torna, muitas vezes, principalmente em sistemas heterogêneos com a presença de diversas redes, impraticável. Contudo, estes modelos analíticos, bem como o modelo proposto, são válidos a fim de prover *insights* valiosos na operação ótima do sistema, no qual podem ser utilizados para o projeto de aproximações e heurísticas mais adequadas e que serão mais fáceis de implantação.

Um dos principais problemas relacionados à utilização de PSMD na modelagem de sistemas complexos, consiste no alto gasto computacional para a resolução do problema e obtenção da política ótima, o que é conhecido por “Maldição da Dimensionalidade”.

No experimento realizado, o número de estados do sistema foi de 327.680. Dado que o sistema evolui de acordo com decisões tomadas no ato de chegada das novas chamadas, a combinação de estados/ações leva a um sistema com 803.840 estados para a configuração utilizada. Como o algoritmo resolve o processo recursivamente, o gargalo do sistema se dá com relação ao alto consumo de memória. Para a obtenção da política ótima de seleção inicial da RSF, a quantidade de iterações realizadas até a convergência ficou entre 165 e 1930, de acordo com as configurações de carga de tráfego utilizada.

Além dos problemas relativos ao alto custo computacional, devido à complexidade do sistema utilizado, as métricas tradicionais de Qualidade de Serviço (QoS), não se mostraram satisfatórias para a avaliação de desempenho do modelo proposto. Isso, a priori, gerou dificuldade para avaliação do modelo.

Como trabalhos futuros, primeiramente, pode-se comparar o desempenho do CCAC ótimo proposto com outras técnicas de seleção da RSF, tais como seleção aleatória, menor ocupação, baseada na classe de serviço, no custo do serviço e na preferência do usuário. Estas técnicas, apesar de uma maior simplicidade para implementação e implantação, não levam o sistema à um desempenho aceitável.

Outras técnicas de otimização na qual o custo computacional seja menor, como aprendizagem por reforço, por exemplo, também podem ser investigadas. Para melhor entendimento do sistema, pode-se derivar novas medidas de desempenho, principalmente que reflitam a Qualidade de Experiência (QoE) do usuário. Além destes, a degradação, sinalização e mais fatores relacionados a preferência do usuário podem ser considerados na função custo. Também, seria importante considerar a velocidade do usuário móvel como um parâmetro a mais para a tomada de decisão. Com isso, uma função de custos pode ser definida considerando esse parâmetro, para que se possa minimizar as sinalizações existentes no mecanismo de descoberta de rede, conexão e desconexão.

Outro estudo interessante seria separar as chamadas de *handoff* das novas chamadas. Com isso, uma prioridade as chamadas destas classes poderiam ser consideradas. A preempção e o deslocamento de chamadas de uma RSF para outra também poderiam ser estudados a fim de uma melhor estabilidade do sistema.

E por fim, outras estratégias de gerenciamento de recursos de rádio podem ser implementadas juntamente com o CCAC ótimo. Mecanismos de gerência de recursos que atuam em nível de pacotes tais como escalonamento de pacotes e gerência de *buffer* podem incluídos a fim de se obter um melhor desempenho do sistema. Outras estratégias sub-ótimas e de fácil implementação, como o gerenciamento de recursos através de *thresholds* onde se define limiares de aceitação das chamadas de acordo com as classes de serviço e com as prioridades atribuídas a cada uma, também podem ser empregados.

Referências Bibliográficas

- [1] O. E. Falowo and H. A. Chan. Joint call admission control algorithms: Requirements, approaches, and design considerations. *Computer Communications*, vol. 31(6): pág. 1200 – 1217, 2008.
- [2] M. Katz and F. H. P. Fitzek. On the definition of the fourth generation wireless communications networks: The challenges ahead. In *Proceedings of the International Workshop on Convergent Technology (IWCT)*, pages pág. 1 – 8, 2005.
- [3] S. Frattasi, H. Fathi, F.H.P. Fitzek, R. Prasad, and M.D. Katz. Defining 4G technology from the users perspective. *IEEE Network*, vol. 20(1): pág. 35 – 41, 2006.
- [4] O.E. Falowo and H.A. Chan. Fuzzy logic based call admission control for next generation wireless networks. In *Proceedings of the 3rd International Symposium on Wireless Communication Systems*, 2006.
- [5] W. Song, H. Jiang, W. Zhuang, and X. Shen. Resource management for QoS support in cellular/WLAN interworking. *IEEE Network*, vol. 19(5): pág. 12 – 18, Setembro, 2005.
- [6] J. Pérez-Romero, O. Sallent, and R. Agustí. Policy-based initial RAT selection algorithms in heterogeneous networks. In *Proceeding of the 7th International Conference on Mobile and Wireless Communications*, Setembro, 2005.
- [7] Service Level Agreement and SLA Guide. <http://www.service-level-agreement.net/>. Acesso em setembro de 2010.
- [8] NTT DoCoMo Global Home. <http://www.nttdocomo.com/>. Acesso em setembro de 2010.
- [9] G. H. S. Carvalho. Modelagem e análise de desempenho de esquemas de alocação de recursos em redes móveis celulares. *Tese de Doutorado, Instituto de Tecnologia - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica - Universidade Federal do Pará*, 2005.
- [10] D. K. Kim, D. Griffith, and N. Golmie. A novel ring-based performance analysis for call admission control in wireless networks. *IEEE Communications Letters*, vol. 14: pág. 324 – 326, Abril, 2010.

-
- [11] Q. Zhao, D.H.K. Tsang, and T Sakurai. A novel CAC scheme for homogeneous 802.11 networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 9: pág. 1168 – 1174, Março, 2010.
- [12] Z. Ma, P. E. Caines, and R. P. Malhame. Control of admission and routing in loss networks: Hybrid dynamic programming equations. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 55: pág. 350 – 366, Fevereiro, 2010.
- [13] W.-C. Hong and T. Zsehong. A multichannel scheduler for high-speed wireless backhaul links with packet concatenation. *IEEE Transaction on Mobile Computing*, vol. 9: pág. 201 – 214, Fevereiro, 2010.
- [14] M.-H. Tsai, J.-T. Sung, and Y.-M. Huang. Resource management to increase connection capacity of real-time streaming in mobile WiMAX. *IET Communications*, vol. 4: pág. 1108 – 1115, Junho, 2010.
- [15] T.L. Lee, K. L. Lam, K. F. Tsang, H. Y. Tung, and P. Tsang. Threshold impact in CAC for wireless multi-service networks. *Electronics Letters*, vol. 46: pág. 1036 – 1038, Julho, 2010.
- [16] S.K. Das, S.K. Sen, K. Basu, and Haitao Lin. A framework for bandwidth degradation and call admission control schemes for multiclass traffic in next-generation wireless networks. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21(10): pág. 1790 – 1802, 2003.
- [17] G.H.S. Carvalho, R.W.L. Coutinho, and J.C.W.A. Costa. Design of optimal call admission control for WiMax/WiFi integration. In *Proceedings of the SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, pages pág. 564 – 568, 2009.
- [18] N. Andrews, Y. Kondareddy, and P. Agrawal. Prioritized resource sharing in WiMax and WiFi integrated networks. In *Proceedings of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference (WCNC)*.
- [19] E. Stevens-Navarro, Yuxia L., and V.W.S. Wong. An MDP-based vertical handoff decision algorithm for heterogeneous wireless networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 57(2): pág. 1243 – 1254, 2008.
- [20] W. Chen, J. Yu, and F. Pan. An optimal CAC scheme based on GSMDP model in heterogeneous wireless networks. In *Proceedings of the 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications (ISA)*, pages pág. 1 – 6, 2010.

-
- [21] O. E. Falowo and H. A. Chan. Adaptive bandwidth management and joint call admission control to enhance system utilization and QoS in heterogeneous wireless networks. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*, 2007: pág. 1 – 11, 2007.
- [22] L. Wang and D. Binet. MADM-based network selection in heterogeneous wireless networks: A simulation study. In *Proceedings of the 1st International Conference on Wireless Communication, Vehicular Technology, Information Theory and Aerospace Electronic Systems Technology*, pages 559 – 564, 2009.
- [23] T.-L. Sheu and W.-F. Wei. A channel preemption model for vertical handoff in a WLAN-embedded cellular network. *Wireless Networks*, vol. 16: pág. 929 – 941, 2010.
- [24] B. Xing and N. Venkatasubramanian. Multi-constraint dynamic access selection in always best connected networks. In *Proceedings of the Second Annual International Conference on Mobile and Ubiquitous Systems: Networking and Services*, 2005.
- [25] O. Ormond, J. Murphy, and G. Muntean. Utility-based intelligent network selection in beyond 3G systems. In *Proceedings of the IEEE International Conference on Communications*, 2006.
- [26] M. Ibrahim, K. Khawam, and S. Tohmé. Network-centric joint radio resource policy in heterogeneous WiMAX-UMTS networks for streaming and elastic traffic. In *Proceedings IEEE conference on Wireless Communications & Networking Conference*, pages 1718 – 1723, 2009.
- [27] W. Shen and Q.-A. Zeng. Resource management schemes for multiple traffic in integrated heterogeneous wireless and mobile networks. In *Proceedings of the 17th International Conference on Computer Communications and Networks*, 2008.
- [28] D. Niyato and E. Hossain. Dynamics of network selection in heterogeneous wireless networks: An evolutionary game approach. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58(4): pág. 2008 – 2017, 2009.
- [29] P. Si, H. Ji, and F. Yu. Optimal network selection in heterogeneous wireless multimedia networks. *Wireless Networks*.
- [30] R. Jain. *The art of computer systems performance analysis : techniques for experimental design, measurement, simulation, and modeling*. Wiley, New York, 1991.
- [31] H. C. Tijms. *A first course in Stochastic models*. John Wiley & Sons Ltd, 2003.

-
- [32] V. G. Kulkarni. *Modeling, Analysis, Design, and Control of Stochastic Systems*. Springer, 1999.
- [33] L. Martin Puterman. *Markov Decision Processes: Discrete Stochastic Dynamic Programming*. John Wiley & Sons, 1994.
- [34] S. Osaki. *Applied Stochastic System Modeling*. Springer-Verlag, 1992.
- [35] R. C. M. Rodrigues. Inserção de distribuição do tipo fase em modelos markovianos de decisão. *Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE, Brasil, 1998*.
- [36] S. Lee, K. Kim, K. Hong, D. Griffith, Y. H Kim, and N. Golmie. A probabilistic call admission control algorithm for wlan in heterogeneous wireless environment. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 8(4): pág. 1672 – 1676, 2009.
- [37] S. Tang and W. Li. An adaptive bandwidth allocation scheme with preemptive priority for integrated voice/data mobile networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 5(10): pág. 2874 – 2886, 2006.
- [38] B. Li, L. Li, B. Li, K.M. Sivalingam, and X.-R. Cao. Call admission control for voice/data integrated cellular networks: performance analysis and comparative study. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 22(4): pág. 706 – 718, 2004.
- [39] R.A. Guerin. Channel occupancy time distribution in a cellular radio system. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 36(3): pág. 89 – 99, 1987.
- [40] R. Fantacci. Performance evaluation of prioritized handoff schemes in mobile cellular networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 49(2): pág. 485 – 493, 2000.
- [41] M. Meo and M. A. Marsan. Resource management policies in GPRS systems. *Performance Evaluation*, vol. 56: pág. 73 – 92, 2004.