

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

**Avaliação de Algoritmos de Seleção de
Acesso para o Serviço de Voz sobre IP em
Redes Sem Fio Multiacesso**

Autor
Alex Pereira da Silva

FORTALEZA – CEARÁ
SETEMBRO 2007

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELEINFORMÁTICA

Avaliação de Algoritmos de Seleção de Acesso para o Serviço de Voz sobre IP em Redes Sem Fio Multiacesso

Autor

Alex Pereira da Silva

Orientador

Prof. Dr. Francisco Rodrigo Porto Cavalcanti

*Dissertação apresentada à Coordenação
do Programa de Pós-graduação em
Engenharia de Teleinformática da
Universidade Federal do Ceará como
parte dos requisitos para obtenção do
grau de **Mestre em Engenharia de
Teleinformática.***

FORTALEZA – CEARÁ

SETEMBRO 2007

Resumo

A evolução dos sistemas de comunicação sem fio além da terceira geração (3G) é bem representada pelo ambiente de multiacesso (MA) sem fio, o qual é caracterizado pela integração de diferentes tecnologias de acesso de rádio (RATs).

Paralelo à evolução das redes sem fio, o *Voice over Internet Protocol* (VoIP) é uma das aplicações em tempo-real mais populares. A implementação do VoIP em uma rede multiacesso requer a inclusão de estratégias eficientes de alocação de recursos, objetivando uma otimização combinada do desempenho das RATs.

Neste trabalho, apresentamos um ambiente multissistêmico formado por duas RATs genéricas, no qual avaliamos, para diferentes cenários, alguns algoritmos de seleção de acesso em termos da capacidade e da satisfação dos usuários de VoIP.

Consideramos quatro esquemas de seleção de acesso: CBA, RMA, LBA e SBA. Os três primeiros algoritmos foram encontrados em literatura específica e o último representa a proposta deste trabalho. O desempenho dos algoritmos é mensurado em relação a cenários sem multiacesso, nos quais não há integração e cooperação entre as RATs.

Resultados mostram que ganhos similares de capacidade e satisfação são alcançados para os algoritmos LBA e SBA. No entanto, o SBA apresenta vantagens práticas sobre o LBA, uma vez que aquele não leva em consideração informações prévias sobre as capacidades das RATs.

Nesta dissertação, concluímos que a utilização de uma rede multiacesso pode trazer vantagens sobre um sistema formado por RATs não integradas e sem cooperação. Em verdade, é possível conceber algoritmos que proporcionem uma utilização otimizada dos recursos das RATs. Além disso, a implementação de uma rede MA requer baixo custo de infra-estrutura.

Abstract

The evolution of the Wireless communication systems beyond 3G is well-represented by the wireless multi-access (MA) environment, which is characterized by the integration of different Radio Access Technologies (RATs).

Parallel to the wireless network evolution, Voice over Internet Protocol (VoIP) is one of the most popular real-time applications. Implementation of VoIP over MA networks requires the incorporation of efficient resource allocation strategies in order to meet the optimum combined system performance.

In this work, we present an MA environment composed of two generic RATs where we evaluate some access selection algorithms in terms of VoIP user capacity and satisfaction over different scenarios.

We consider four access selection schemes: CBA, RMA, LBA and SBA. The first three algorithms were found in specialized literature and the last one represents the proposal of this work. The MA algorithm performance is measured with respect to non-MA scenarios where there is no integration and cooperation among the RATs.

Results show that significant similar capacity and satisfaction gains are achieved for the LBA and the SBA algorithms. However, the SBA presents practice advantages with respect to the LBA, since that algorithm does not take account previous information about the RAT capacities.

In this work, we have concluded that the MA network utilization can bring advantages with respect to a system composed of non-integrated and non-cooperative networks. Actually, it is possible to conceive algorithms that allow the optimized resource utilization. Additionally, the MA network implementation requires low cost in terms of infrastructure.

Agradecimentos

Ao Prof. Dr. Francisco Rodrigo Porto Cavalcanti por ter sido meu orientador desde o período da graduação. Sinto-me bastante grato por ele ter me proporcionado uma sólida formação técnica e pessoal.

Aos colegas do GTEL pelo companheirismo, proporcionando um ambiente de trabalho saudável e solidário. Não poderia deixar de agradecer de maneira especial aos colegas Vicente Ângelo de Sousa Jr. e Leonardo Sampaio Cardoso pelas discussões técnicas, comentários e sugestões, que proporcionaram grandes avanços para confecção desta dissertação.

Ao GTEL por oferecer um ambiente de ferramentas que me permitiu desenvolver este trabalho de forma plena.

À *Ericsson do Brasil* pelo suporte financeiro.

Aos meus familiares pelo incentivo e apoio incondicional.

A Deus pela fé e força nos momentos difíceis.

Sumário

Lista de Figuras	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Acrônimos	xii
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos	3
1.3 Metodologia	4
1.4 Trabalhos Relacionados	4
1.5 Produção Científica	5
1.6 Estrutura da Dissertação	6
2 Voz sobre IP e Redes Multiacesso	7
2.1 Voz Sobre IP	7
2.1.1 Histórico	7
2.1.2 Comunicação de Voz sobre IP	8
2.1.3 Medidas de Qualidade de Serviço	10
2.2 Redes Multiacesso	10
2.2.1 Histórico	11
2.2.2 Entidade de Gerenciamento Multissistêmica	11
2.2.3 Procedimentos de Multiacesso	13
2.2.4 Níveis de Acoplamento das Redes	14
3 Modelagem do Sistema	17
3.1 Modelagem do Serviço de Voz sobre IP	17
3.1.1 Modelo de Tráfego	17
3.1.2 Codificador	18
3.1.3 Modelo dos Pacotes de VoIP	18
3.1.4 Comunicação de Voz na Rede Sem Fio	19
3.2 Modelagem das Redes de Acesso de Rádio	20

3.2.1	Modelagem da Rede Multiacesso	21
3.2.2	Disposição de Usuários na Rede Multiacesso	22
3.2.3	Modelos de Propagação	23
3.2.4	Adaptação de Enlace e Cobertura	24
3.2.5	Controle de Admissão	25
3.2.6	Modelo de Transmissão	26
3.2.7	Interferência	27
3.3	Métrica de Desempenho	28
3.4	Ferramenta de Simulação	29
4	Procedimento de Seleção de Acesso	33
4.1	Conceito Básico de Seleção de Acesso	33
4.2	Medidas para Seleção de Acesso	34
4.3	Algoritmos de Seleção de Acesso	35
4.4	Classificação dos Algoritmos de Seleção de Acesso quanto ao Critério	36
4.5	Modelagem do Procedimento de Seleção de Acesso	37
4.6	Descrição dos Algoritmos de Seleção de Acesso Estudados	38
4.6.1	Algoritmo Baseado na Cobertura (CBA)	39
4.6.2	Algoritmo de Maximização da Taxa do Terminal (RMA)	40
4.6.3	Algoritmo de Balanceamento da Carga Oferecida (LBA)	40
4.6.4	Algoritmo de Balanceamento dos Usuários Conectados Satisfeitos (SBA)	42
4.7	Comentário Adicional sobre os Algoritmos Estudados	43
5	Análise, Descrição e Avaliação dos Cenários	45
5.1	Análise Téorica do Problema de Multiacesso	45
5.2	Parâmetros de Simulação	49
5.3	Parâmetros do Serviço de VoIP	49
5.4	Parâmetros das Redes de Acesso de Rádio	50
5.5	Análise da Distribuição de Usuários para os Algoritmos	52
5.6	Avaliação dos Cenários	59
6	Conclusões e Perspectivas	65
6.1	Conclusões	65
6.2	Perspectivas	67
	Referências Bibliográficas	75

Lista de Figuras

2.1	Entidade CRRM instalada em todas as RNCs.	12
2.2	Entidade CRRM instalada em algumas RNCs.	13
2.3	Entidade CRRM instalada em um servidor.	13
3.1	Modelo de chamada e do pacote de VoIP.	19
3.2	Atraso de acesso no nível da camada de enlace.	20
3.3	Arquitetura da rede multiacesso adotada.	21
3.4	Regiões IN e OUT.	22
3.5	Modelo linear de adaptação de enlace.	24
3.6	Ganhos de capacidade e de satisfação.	29
3.7	Fluxograma do funcionamento geral do simulador.	31
4.1	Seleção de acesso.	34
4.2	Atualização das medidas: comunicação entre a entidade CRRM e as RATs.	35
4.3	Exemplo de uma rede multiacesso com quatro RATs.	38
5.1	Função de satisfação das RATs.	52
5.2	Distribuição uniforme numa região circular.	53
5.3	Distribuição de usuários para o CBA.	54
5.4	Distribuição de usuários para o RMA.	55
5.5	Distribuição de usuários para o LBA.	56
5.6	Distribuição de usuários para o SBA.	57
5.7	Distribuição de usuários na região IN.	58
5.8	Avaliação do Cenário A1 em que $p = 1/2$	59
5.9	Avaliação do Cenário A2 em que $p = 1/1$	60
5.10	Avaliação do Cenário A2 em que $p = 1/1$	61
5.11	Avaliação funcional dos algoritmos CBA, LBA e SBA.	62
5.12	Avaliação funcional do algoritmo RMA.	63

Lista de Tabelas

2.1	Exemplos de CODECs e suas principais características.	9
5.1	Parâmetros de cobertura e de adaptação de enlace	51
5.2	Média e variância após a aplicação dos algoritmos.	57

Lista de Acrônimos

3G	<i>Terceira Geração</i>
3GPP	<i>Third Generation Partnership Project</i>
4G	<i>Quarta Geração</i>
AMR	<i>Adaptive Multi-Rate</i>
AMR-WB	<i>Adaptive Multi-Rate - Wide Band</i>
APC	<i>Access Point Controller</i>
ATA	<i>Adaptador Telefônico Analógico</i>
CAC	<i>Call Admission Control</i>
CBA	<i>Coverage-based Algorithm</i>
CODEC	<i>Codificador-Decodificador</i>
CRRM	<i>Common Radio Resource Management</i>
DCF	<i>Distributed Coordination Function</i>
DDD	<i>Discagem Direta a Distância</i>
DDI	<i>Discagem Direta Internacional</i>
EDGE	<i>Enhanced Data Rate for GSM Evolution</i>
FER	<i>Frame Erasure Rate</i>
GGSN	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>
GSM	<i>Global System for Mobile Communications</i>
HLR	<i>Home Location Register</i>
HSDPA	<i>High-Speed Downlink Packet Access</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
iLBC	<i>internet Low Bit Rate Codec</i>
IMT	<i>International Mobile Telecommunications</i>
IN	<i>Inside</i>

IP	<i>Internet Protocol</i>
IPv4	<i>Internet Protocol - Fourth Version</i>
IPv6	<i>Internet Protocol - Sixth Version</i>
ITU	<i>International Telecommunications Union</i>
LAN	<i>Local Area Network</i>
LBA	<i>Load Balancing Algorithm</i>
LOS	<i>Line-Of-Sight</i>
MA	<i>Multiaccesso</i>
MAC-hs	<i>Medium Access Control - high speed</i>
MARTSim	<i>Multi-Access and Real Time Simulator</i>
NLOS	<i>Non-Line-Of-Sight</i>
OUT	<i>Outside</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PDA	<i>Personal Digital Assistant</i>
PSTN	<i>Public Switched Telephone Network</i>
QoS	<i>Quality of Service</i>
RAT	<i>Radio Access Technology</i>
RMA	<i>Rate Maximization Algorithm</i>
RNC	<i>Radio Network Controller</i>
RRM	<i>Radio Resource Management</i>
RTP	<i>Real Time Protocol</i>
SBA	<i>Satisfaction Balancing Algorithm</i>
SGSN	<i>Serving GPRS Support Node</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
TTI	<i>Transmission Time Interval</i>
UDP	<i>User Datagram Protocol</i>
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunications Systems</i>
UTRAN	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>
VHO	<i>Vertical Handover</i>
WCDMA	<i>Wideband Code-Division Multiple Access</i>
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i>
WWW	<i>World Wide Web</i>

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

O desenvolvimeto das redes celulares caminha para a chamada 4G¹. Neste contexto, duas grandes frentes de pesquisa têm despertado o interesse de profissionais na busca de soluções que viabilizem a demanda de novos e mais sofisticados serviços. A primeira delas consiste na concepção de novas tecnologias de acesso de rádio, capazes de atingir altas taxas de transmissão de dados. A segunda frente focaliza a integração das tecnologias de 3G² já existentes, permitindo que elas cooperem entre si na busca de uma melhor utilização dos recursos disponíveis. As redes multiacesso (MA) representam uma consequência dessa segunda linha de pesquisa e a abordaremos nesta dissertação.

A implementação de uma rede multiacesso traz como principal vantagem a possibilidade de utilizar, de maneira otimizada, os recursos disponíveis pelas tecnologias que a formam, recursos esses gerenciados por procedimentos multissistêmicos, tais como a seleção de acesso e o VHO³, por exemplo. A otimização dos recursos pode proporcionar melhorias no desempenho da rede: taxa reduzida de bloqueio para serviços de tempo-real; alta vazão de dados e redução de atrasos para serviços de melhor esforço; aumento da eficiência de *handover*; melhor gerenciamennto da interferência no sistema; melhor gerenciamento da qualidade de serviço; entre outros benefícios. Esse novo paradigma 4G estabelece, no entanto, complexidades extra no que concerne ao gerenciamento da rede multiacesso.

Não menos importante, a rede multiacesso também oferece como vantagem

¹ *Quarta Geração*

² *Terceira Geração*

³do inglês, *Vertical Handover*

o baixo custo de implementação, uma vez que toda estrutura das RATs⁴ que a compõem é aproveitada.

Um procedimento de multiacesso deveras importante é a seleção de acesso; foco deste trabalho dissertativo. A seleção de acesso refere-se a escolha inicial de uma tecnologia para o terminal em processo de conexão. Essa escolha deve objetivar as melhores condições para as RATs e para o terminal. Portanto, deve-se atentar para o desenvolvimento de algoritmos nessa direção.

Grande parte das informações que trafegam nas redes de comunicação na atualidade é voz. Em geral, este serviço é provido pelo sistema tradicional de telefonia que é baseado na comutação de circuitos. Este sistema provê qualidade de voz adequada, mas pode proporcionar uma utilização altamente ineficiente da largura de banda disponível [1]. Assim, as redes IP⁵, baseadas na comutação de pacotes, surgem como alternativas eficientes para o transporte da voz, denominada, neste contexto, Voz sobre IP (VoIP). Dessa maneira, o VoIP procura prover qualidade de voz da rede comutada por circuitos e eficiência da rede comutada por pacotes.

Em consonância com a demanda de novos serviços, o VoIP surge como uma das aplicações que mais crescem no âmbito da Internet atualmente. Ele apresenta vantagens em relação ao serviço de telefonia convencional. Destacam-se as seguintes:

- ▶ Superior eficiência da utilização da largura de banda;
- ▶ Possibilidade de combinação com outras aplicações (vídeo, por exemplo) gerando novos serviços;
- ▶ Acesso a *softwares* gratuitos para PCs⁶ e PDAs⁷;
- ▶ Custo reduzido da chamada.

Vale ressaltar, no entanto, que alguns obstáculos ainda precisam ser superados para que o serviço de VoIP seja unanimidade. Primeiro, as redes convencionais de telefonia são altamente confiáveis e provêm maior qualidade de voz que aquela das redes IP. Segundo, a qualidade do serviço de voz é bastante crítica em redes sem fio [2], devido à elevada perda de pacotes, atrasos mais longos e maior *jitter*.

⁴do inglês, *Radio Access Technologies*

⁵do inglês, *Internet Protocol*

⁶do inglês, *Personal Computers*

⁷do inglês, *Personal Digital Assistants*

Perante os elementos aqui apresentados, alguns pontos constituem a motivação desta dissertação:

- ▶ **Análise de uma rede multiacesso com serviço VoIP.** A problemática do serviço de VoIP em redes sem fio já constitui um desafio a ser enfrentado, sobretudo numa rede multiacesso. Assim, algoritmos de seleção de acesso que levem em consideração aspectos deste serviço deverão proporcionar melhor qualidade da voz e melhor desempenho das tecnologias de acesso envolvidas;
- ▶ **Ausência de estudos mais aprofundados sobre seleção de acesso.** Atualmente, há necessidade de implementação de algoritmos de seleção de acesso mais eficientes. A gama de algoritmos existentes aplica-se apenas a situações específicas de rede, terminal e/ou serviço;
- ▶ **Carência de estudos dinâmicos de redes multiacesso.** Poucos trabalhos têm sido desenvolvidos considerando elementos dinâmicos das redes (chegada de novas chamadas, geração de tráfego, por exemplo).

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho consiste em avaliar algoritmos de seleção de acesso em uma rede multissistêmica, composta por duas tecnologias de acesso genéricas com serviço de VoIP; permitindo, dessa maneira, concluir sobre a viabilidade técnica deste arranjo com vistas às aplicações nas próximas gerações das comunicações sem fio. Com este intuito, alguns passos intermediários foram efetuados:

- ▶ Estudo da seleção de acesso em redes multiacesso;
- ▶ Concepção e avaliação teórica de algoritmos de seleção de acesso;
- ▶ Análise de cenários multissistêmicos que ofereçam melhores desempenho que aqueles proporcionados pelos sistemas de comunicações existentes;
- ▶ Desenvolvimento de uma ferramenta de simulação multiacesso.

Além do objetivo-mor, apresentamos, a seguir, outros objetivos específicos visados nesta dissertação:

- ▶ Determinar a capacidade da rede multiacesso por meio do nível de satisfação dos usuários;

- ▶ Propor um algoritmo que leve em consideração aspectos relativos ao serviço de VoIP e que proporcione maiores ganhos à rede em relação ao caso em que não há integração e cooperação entre as tecnologias de acesso;
- ▶ Analisar teoricamente um problema particular de capacidade em redes multiacesso que possa servir de base para avaliação dos algoritmos estudados;
- ▶ Analisar o comportamento dos algoritmos em função da carga de terminais na rede.

1.3 Metodologia

Diante da dificuldade em abordar o ambiente das redes sem fio analiticamente e experimentalmente [2], a simulação computacional surge como a ferramenta mais adequada para solução deste problema. Entretanto, uma rede multiacesso incorpora diversos componentes e processos que, uma vez considerados, demandariam esforços computacionais dispendiosos. Por isso, torna-se necessário efetuar algumas simplificações que nos proporcione maior foco em pontos de interesse deste trabalho. Assim, a maior parte da modelagem considerada no simulador multiacesso, desenvolvido em linguagem de programação MATLAB[®], está concentrada na camada de enlace das RATs, onde implementamos o processo de escalonamento e os mecanismos de transmissão das RATs; e no nível multissistêmico, em que a entidade CRRM⁸ age como gerente quando da seleção de uma RAT para uma nova chamada no sistema.

Conforme frisamos na seção anterior, alguns passos foram essenciais para que um simulador multiacesso pudesse ser desenvolvido. Primeiramente, identificamos e compreendemos as dificuldades intrínsecas ao VoIP e às redes multiacesso. Em seguida, foi possível modelar o sistema e conceber alternativas que mitigassem os problemas em estudo. Por fim, levando-se em conta o algoritmo proposto e as outras estratégias algorítmicas já consagradas, avaliamos o desempenho da rede multiacesso.

1.4 Trabalhos Relacionados

A seguir, apresentamos trabalhos relacionados ao serviço de VoIP em redes sem fio e trabalhos relativos ao multiacesso, evidenciando, assim, o estado da arte desses dois elementos tecnológicos.

⁸do inglês, *Common Radio Resource Management*

No que concerne ao serviço de VoIP em redes sem fio, um estudo de capacidade é feito por Wang em [3] para redes HSDPA⁹. Em [4], Garg propõe uma estratégia de controle de admissão baseada na estimativa de utilização do canal para redes IEEE¹⁰ 802.11b. Pimentel, em [2], também propõe algoritmos de controle de admissão: um algoritmo baseado na taxa de utilização do *buffer* de transmissão do ponto de acesso e, um outro, baseado na perda de pacotes de VoIP. Tal abordagem foi realizada para redes IEEE 802.11a. Os supracitados trabalhos não foram realizados dentro do escopo do multiacesso.

No âmbito multissistêmico, várias contribuições foram realizadas. Em [5], Furuskär indica que algoritmos que consideram o tipo de serviço e as regiões de capacidade de redes proporcionam ganhos de capacidade superior a soma daquelas dos subsistemas (RATs). Liu, em [6], realiza estudos de cobertura e capacidade em uma rede multiacesso 3G/WLAN¹¹, tendo obtido ganhos de desempenho significativos para serviços de tempo-real. Em [7], Yilmaz também avalia uma rede 3G/WLAN, considerando terminais móveis que ora se conectam à rede via WLAN, ora via o subsistema 3G, dependendo da localização do terminal na rede (dentro ou fora da região de cobertura da WLAN, denominada *hotspot*). Sampaio, em [8], avalia algoritmos de seleção de acesso para uma rede multiacesso dinâmica UTRAN¹²-WLAN. Em [9], Mariz avalia para serviços mistos em redes WCDMA¹³ e GSM¹⁴/EDGE¹⁵, o desempenho de algoritmos de seleção de acesso baseados no clássico problema *bin-packing* [10]. Trabalhos mais recentes sobre integração de redes e propostas de soluções para seleção de acesso e VHO podem ser encontradas em [11–14].

1.5 Produção Científica

Durante o período de atividades do mestrado, o autor publicou alguns trabalhos em congressos internacionais. Listam-se os seguintes:

⁹do inglês, *High-Speed Downlink Packet Access*

¹⁰do inglês, *Institute of Electrical and Electronics Engineers*

¹¹do inglês, *Wireless Local Area Network*

¹²do inglês, *UMTS Terrestrial Radio Access Network*

¹³do inglês, *Wideband Code-Division Multiple Access*

¹⁴do inglês, *Global System for Mobile Communications*

¹⁵do inglês, *Enhanced Data Rate for GSM Evolution*

- ▶ *Performance Evaluation of Access Selection Algorithms for VoIP on Wireless Multi-Access Networks*; A. P. da Silva, F. de S. Chaves, V. A. de Sousa Jr., R. A. de O. Neto e F. R. P. Cavalcanti; VI International Telecommunication Symposium - ITS; Fortaleza, Brasil, Setembro 2006;
- ▶ *Conception and Evaluation of Access Selection Algorithms for Cooperative Beyond 3G Systems*; V. A. de Sousa Jr., R. A. de O. Neto, F. de S. Chaves, A. P. da Silva e F. R. P. Cavalcanti; VI International Telecommunication Symposium - ITS; Fortaleza, Brasil, Setembro 2006;
- ▶ *A New Call Admission Control Algorithm for VoIP in IEEE 802.11 Wireless LANs*; A. P. da Silva, J. F. Pimentel, F. R. P. Cavalcanti e V. A. de Sousa Jr.; Journal of Communication and Information Systems; vol. 21, no 3, Dezembro 2006;
- ▶ *VoIP Capacity Analysis of Wireless Multi-Access Networks Using Access Selection Schemes*; A. P. da Silva, F. R. P. Cavalcanti e R. A. de O. Neto; 18th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications - PIMRC; Atenas, Grécia, Setembro 2007.

1.6 Estrutura da Dissertação

Apresentamos, a seguir, a estrutura dos demais capítulos desta dissertação. O capítulo 2 descreve, de maneira geral, o serviço de VoIP, bem como as redes multiacesso. Neste capítulo, apresentamos um pouco da história, das características e dos problemas pertinentes ao VoIP e ao multiacesso.

O capítulo 3 traz a modelagem empregada para o serviço VoIP (tráfego, pacotes, comunicação, por exemplo), a modelagem das RATs envolvidas (propagação, adaptação de enlace, mecanismo de transmissão, etc), a modelagem da rede multiacesso (arquitetura, procedimento multissistêmico, disposição dos usuários no sistema, por exemplo) e a descrição da ferramenta de simulação desenvolvida. O capítulo 4 descreve o procedimento de seleção de acesso, bem como quatro algoritmos a ele associado: três deles clássicos e um proposto. No capítulo 5, realizamos, primeiramente, um estudo teórico sobre capacidade em uma rede multiacesso formada por duas tecnologias de acesso. Em seguida, definimos os parâmetros e os cenários utilizados para avaliação. Por fim, apresentamos e comentamos os resultados alcançados. O último capítulo é dedicado às conclusões e perspectivas.

Capítulo 2

Voz sobre IP e Redes Multiacesso

2.1 Voz Sobre IP

Atualmente, o Voz sobre IP representa um dos serviços mais populares na Internet. A cada ano, novos usuários têm aderido a esta atraente tecnologia. A seguir, apresentamos um breve histórico do VoIP, suas principais características, bem como uma base teórica de seu funcionamento.

2.1.1 Histórico

A história do VoIP remonta do ano de 1995 em Israel, quando um grupo de empreendedores desenvolveu um sistema capaz de realizar comunicações de voz através da Internet por meio de um PC doméstico. Apesar da baixa qualidade, o resultado foi animador e estimulou outros pesquisadores a desenvolver novos sistemas. Tanto é que, no mesmo ano, a empresa *Vocaltec* lançou no mercado um *software* para PCs, denominado *Internet Phone Software*, capaz de comprimir o sinal de voz, traduzi-lo em pacotes e, assim, transmiti-los através da Internet. A qualidade do serviço de comunicação de voz proporcionada por esse *software* esteve ainda muito abaixo daquela da telefonia convencional. Entretanto, ele foi o precursor dos *softphones* atuais e representou o primeiro telefone via IP [15, 16].

Um progresso considerável ocorreu em 1998 nos Estados Unidos com o desenvolvimento de *gateways*, que permitiram a conexão PC-telefone e, posteriormente, telefone-telefone. Essa tecnologia possibilitou aos usuários norte-americanos ligações gratuitas de longa distância [15]. O crescimento do tráfego de VoIP no mercado norte-americano representou cerca de 1 % do tráfego total de voz naquele ano [15, 16]. Dois anos depois, com o desenvolvimento de *switches* e roteadores com funcionalidades padronizadas de VoIP [17], o tráfego para este

serviço alcançara 3 % de todo o tráfego de voz existente [16].

Mais recentemente, diversos outros equipamentos com tecnologia VoIP e *softphones* foram desenvolvidos e estão em uso. Dentre os dispositivos, citamos principalmente os adaptadores ATA¹, que permitem que um telefone convencional conecte-se à rede IP; e os telefones IP ou *IP-Phones*, que não necessitam de adaptação para realização de uma chamada VoIP. No âmbito dos *softphones*, alguns dos mais populares: *MSN Messenger*, *Net2phone*, *X-ten* e *Skype*. Dentre estes, o mais utilizado na Internet é o Skype [18].

Com o aprimoramento da tecnologia de voz sobre IP, as diferenças existentes entre a qualidade do VoIP e do serviço tradicional de telefonia comutada é quase imperceptível. Por conta deste e de outros fatores citados anteriormente, alguns analistas prospectam que o próximo ponto na evolução do VoIP no Brasil é a extinção por completo do modelo atual de ligações de longa distância (DDD²/DDI³), suportada pela rede PSTN⁴ e, mais adiante, talvez a erradicação dos sistemas convencionais de telefonia [18].

2.1.2 Comunicação de Voz sobre IP

Em uma comunicação de VoIP, o sinal analógico produzido pela voz humana é codificado e comprimido no formato digital e em seguida empacotado e transmitido ao destinatário por meio de uma rede IP. No receptor, os pacotes de VoIP são recebidos seqüencialmente em um *buffer* e o processo inverso (decodificação e descompressão) é efetuado. O dispositivo responsável por efetuar as tarefas de codificação/compressão e decodificação/descompressão da voz é o CODEC⁵. O tratamento realizado pelo CODEC é feito a partir de amostras periódicas do sinal de voz.

¹ *Adaptador Telefônico Analógico*

² *Discagem Direta a Distância*

³ *Discagem Direta Internacional*

⁴ do inglês, *Public Switched Telephone Network*

⁵ *Codificador-Decodificador*

A Tabela 2.1 lista as principais características de alguns CODECs comumente utilizados. Maiores detalhes sobre o funcionamento de alguns deles são descritos em [19].

Tabela 2.1: Exemplos de CODECs e suas principais características.

CODEC	Taxa [kbps]	Intervalo de amostragem [ms]	Tamanho do quadro de voz [bits]
<i>G.711</i>	64	20	1280
<i>G.723.1</i>	5.3	30	160
<i>G.723.1</i>	6.3	30	192
<i>G.729</i>	8	10	80
<i>AMR</i>	4.75	20	95
<i>AMR</i>	12.2	20	244
<i>AMR-WB</i>	6.6	20	132
<i>iLBC</i>	13.3	30	400

Uma vez o quadro de voz codificado, ele é encaminhado através da pilha de protocolos. Esta pilha refere-se à lista de protocolos utilizados no sistema, a qual incorpora os principais protocolos associados ao serviço de VoIP: UDP⁶, RTP⁷ e IP [17, 20].

O UDP é um protocolo de transporte não orientado a conexões [20]. O cabeçalho do UDP consiste de um palavra de 8 bytes [21]. Ele não realiza controle de fluxo, controle de erros ou retransmissão após a recepção incorreta de um pacote. O protocolo UDP tem como única função fornecer uma interface para o protocolo IP.

O RTP é um protocolo de transporte para aplicações em tempo real executado sobre o UDP. O cabeçalho deste protocolo consiste em três palavras de 32 bits, totalizando 96 bits. [20, 21]. Ele tem como função básica multiplexar os fluxos de dados em tempo real e codificá-los em pacotes RTP que, no caso do VoIP, corresponde a fluxos de áudio.

O IP é o protocolo de rede da Internet que tem como função transportar os pacotes da origem ao destino da melhor forma possível, independentemente se os terminais de origem e destino estão na mesma rede ou não. Um datagrama IP contém um cabeçalho de 20 ou 40 bytes para as versões IPv4 e IPv6 respectivamente [22]. Esse protocolo também é utilizado nas intranets e nas redes sem fio.

⁶do inglês, *Adaptive Multi-Rate*

⁷do inglês, *Adaptive Multi-Rate - Wide Band*

⁸do inglês, *internet Low Bit Rate Codec*

⁶do inglês, *User Datagram Protocol*

⁷do inglês, *Real Time Protocol*

2.1.3 Medidas de Qualidade de Serviço

Com o aprimoramento da tecnologia de VoIP, deseja-se atingir a melhor QoS⁸ possível face ao tradicional sistema de telefonia. No entanto, alguns fatores que influenciam o nível de qualidade da voz, no âmbito de uma rede IP, precisam ser considerados. Esses fatores são o atraso, o *jitter* e a perda de pacotes.

Uma comunicação de voz é bastante susceptível a atrasos. O processo de codificação da voz, o empacotamento dos quadros de voz e o encaminhamento do pacote através da rede são exemplos de procedimentos do sistema que introduzem atrasos [17]. Assim, o atraso total pode ser definido como a soma de todos os atrasos introduzidos no sistema devido a diferentes processos ocorridos em toda a cadeia de comunicação, ou seja, desde a produção da fala até sua compreensão no receptor. Um elevado atraso causa problemas perceptíveis pelo usuário, como o eco e a superposição da fala [23]. Por isso, torna-se necessário estabelecer um limite para o atraso que possa refletir em uma qualidade de voz aceitável.

O *jitter* é definido como a variação de atraso entre os pacotes recebidos. Esta variação ocorre devido ao enfileiramento de pacotes nos roteadores e, possivelmente, ao encaminhamento desses por diferentes percursos [17]. A compensação dessa variação é feita no *buffer* do terminal receptor. Esse *buffer* acomoda os pacotes e os encaminha a uma mesma cadência com o intuito de reconstruir a voz com o *efeito jitter* minimizado. No entanto, a introdução do *buffer* produz atrasos na comunicação [24].

A perda de pacotes é outro indicador de desempenho do serviço de VoIP. Em redes com taxa de perda elevada, como as redes sem fio, a qualidade do serviço fica bastante comprometida. Alguns fatores contribuem para uma alta taxa de perda de pacotes: congestionamento em roteadores, erro na transmissão devido às condições de canal, atraso na rede elevado, entre outros. É tolerável um certo grau de perda de pacotes desde que não comprometa a inteligibilidade da fala.

2.2 Redes Multiacesso

Uma rede multiacesso pode ser definida como a integração de duas ou mais tecnologias de acesso de rádio que, cooperando entre si, proporcionam melhor uso de seus recursos, com o objetivo de satisfazer os requerimentos de serviços. Nesta seção, apresentamos, primeiramente, um breve histórico sobre as redes multiacesso. Em seguida, exploramos seus aspectos funcionais e estruturais.

⁸do inglês, *Quality of Service*

2.2.1 Histórico

A idéia de integração de redes remonta da década de 90 com a criação do IMT⁹-2000 pelo ITU¹⁰. A partir de então, as redes 3G foram definidas incorporando diversas tecnologias de acesso, abrangendo desde redes celulares até redes via satélite de baixa órbita [25]. Mais tarde, com a criação do UMTS¹¹, foi possível a especificação da interação entre as redes WCDMA e as redes GSM/EDGE [25,26].

Aproveitando a crescente popularidade das redes WLAN, uma vez que estas têm sido bastante difundidas no mundo inteiro na forma de *hotspots* em ambientes como aeroportos e hotéis, por exemplo, o projeto 3GPP¹² também seguiu na investigação da integração de tais tecnologias sem fio com as redes compatíveis com o 3GPP [27–34]. Sampaio, em [8], destaca que, recentemente, algumas operadoras de telefonia celular passaram a estar associadas a redes WLAN, mas somente em nível de autenticação, autorização e gerenciamento de contas. Ou seja, não há, efetivamente, uma cooperação mais abrangente entre as tecnologias envolvidas. No entanto, alguns projetos de pesquisa como Anwire [35], Mind [36], Everest [37], Monasaidre [38] e Ambient Networks [39] têm focado a integração de redes heterogêneas, visando melhor aproveitamento de recursos de rádio disponíveis e possibilidade de mobilidade irrestrita de usuários.

2.2.2 Entidade de Gerenciamento Multissistêmica

Objetivando melhor gerenciamento de recursos de rádio, cabe-nos introduzir uma entidade lógica, denominada CRRM, a qual permite à comunicação e coordenação entre as diferentes RATs que compõem a rede multiacesso. A entidade CRRM é essencial para garantir, com maior efetividade, a alocação dos recursos disponíveis. O escopo desta entidade estende aquele das tradicionais técnicas de gerenciamento de recursos de rádio (RRM¹³) [40,41], promovendo, destarte, maiores ganhos de desempenho no âmbito do multiacesso. Vale ressaltar que as entidades RRM de cada uma das RATs devem continuar em operação mas, agora, apoiadas nas decisões da entidade multissistêmica CRRM.

Conforme mencionamos há pouco, a entidade CRRM é lógica. Portanto, sua localização física é flexível. Com fulcro no disposto por Sampaio em [8], que

⁹do inglês, *International Mobile Telecommunications*

¹⁰do inglês, *International Telecommunications Union*

¹¹do inglês, *Universal Mobile Telecommunications Systems*

¹²do inglês, *Third Generation Partnership Project*

¹³do inglês, *Radio Resource Management*

apresenta as possíveis localizações da CRRM, editada pelo 3GPP para o UTRAN, mencionamos, aqui, três cenários de localização da referida entidade, caracterizando o sistema, em termos de gerenciamento, em centralizado ou distribuído [42]. Uma vez que uma rede UTRAN pode conter várias RNCs¹⁴ [43], descrevemos abaixo as possibilidades de posicionamento da entidade CRRM, conforme referenciado.

- ▶ **Entidade CRRM instalada em todas as RNCs:** neste cenário, temos uma configuração distribuída em que as entidades CRRM trocam informações do sistema entre si. Cada uma dessas entidades se comunica com a entidade RRM da correspondente RNC;
- ▶ **Entidade CRRM instalada em algumas RNCs:** neste caso, temos um sistema semidistribuído, posto que somente algumas RNCs possuem a entidade gerenciadora CRRM. Sendo assim, as outras RNCs, que não possuem a entidade CRRM, interfaceiam com CRRM vizinhas;
- ▶ **Entidade CRRM instalada em um servidor único:** este último cenário caracteriza-se por apresentar um configuração centralizada, em que temos um servidor CRRM. Ou seja, temos uma única entidade CRRM localizada fora das RNCs. Assim como nos outros casos, a comunicação para gerenciamento de recursos é promovida pela interface RRM-CRRM.

A Figuras 2.1, 2.2 e 2.3 ilustram os casos de localização da entidade lógico-gerencial CRRM.

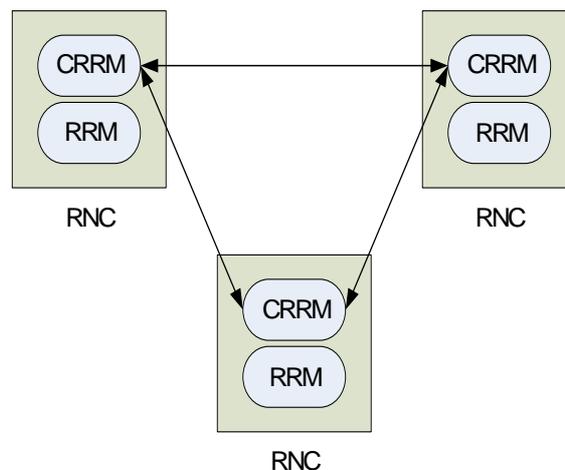


Figura 2.1: Entidade CRRM instalada em todas as RNCs.

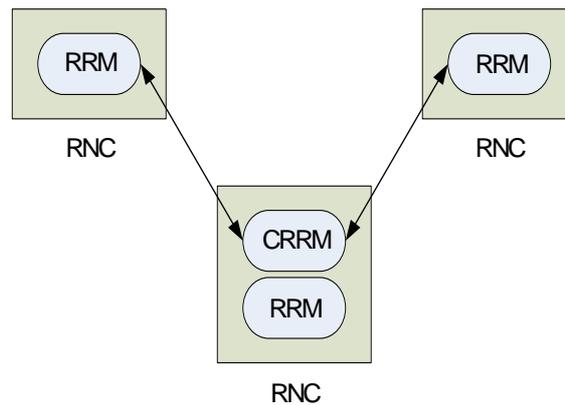


Figura 2.2: Entidade CRRM instalada em algumas RNCs.

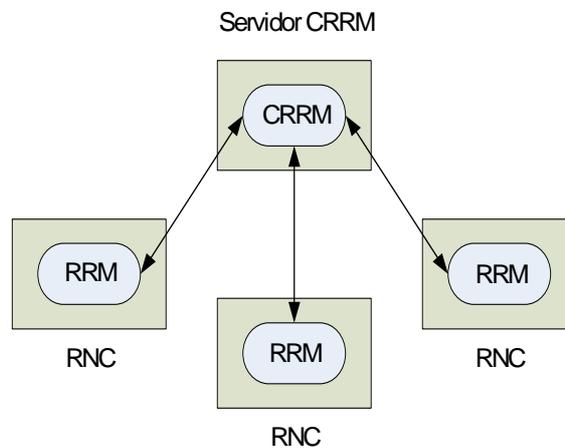


Figura 2.3: Entidade CRRM instalada em um servidor.

Estenderemos esta abordagem, apresentada por Sampaio [8] para a entidade CRRM na rede UTRAN-WLAN, ao caso de redes genéricas.

2.2.3 Procedimentos de Multiacesso

Uma rede multiacesso deve ser capaz de realizar procedimentos que viabilizem uma melhor alocação de recursos disponíveis nas RATs. Destacam-se os seguintes:

- ▶ **Seleção de Acesso:** constitui a escolha inicial de uma tecnologia de acesso para uma nova chamada. A seleção de acesso pode ser baseada em critérios que envolvam características do terminal do usuário e/ou das RATs que compõem o sistema MA.
- ▶ **Vertical Handover:** procedimento em que o terminal pode mudar de tecnologia de acesso durante sua sessão. O VHO pode ser disparado por

¹⁴do inglês, *Radio Network Controllers*

conta da mobilidade, para melhorar a QoS do usuário ou em situações de congestionamento das RATs.

- ▶ **Controle de Congestionamento:** procedimento que identifica uma situação de congestionamento e age com o intuito de contorná-la. Em geral, a ação realizada pode ser uma seleção de acesso, um VHO ou ambos ao mesmo tempo.
- ▶ **Controle de Fluxo:** neste procedimento, diferentes fluxos de um terminal são enviados por diferentes RATs. Por exemplo, um terminal de vídeo-telefonia pode ter seu fluxo de vídeo enviado pela RAT de maior taxa enquanto seu fluxo de voz é enviado pela RAT de taxa inferior.

Os procedimentos descritos não são mandatórios para operação funcional de uma rede MA. No entanto, eles definem o nível de integração (ou acoplamento) das RATs.

2.2.4 Níveis de Acoplamento das Redes

O nível de acoplamento denota o grau de cooperação entre as tecnologias de acesso em uma rede multissistêmica. A seguir, baseado em [8], apresentamos, de maneira geral, três níveis distintos de acoplamento.

- ▶ **Desacoplamento:** as RATs não interagem entre si apesar de estarem na mesma região de cobertura. A conexão é perdida quando se deseja realizar mudança de RAT;
- ▶ **Acoplamento fraco:** as RATs compartilham a mesma base de dados dos terminais, mas elas operam de forma desconjunta. Neste nível de acoplamento, é possível que o terminal troque de RAT sem perda de conexão. Tal procedimento incorre geralmente em atrasos perceptíveis pelo usuário;
- ▶ **Acoplamento forte:** assim, como o acoplamento fraco, aqui também há compartilhamento da base de dados dos terminais. Neste caso, as redes operam de forma cooperativa, de forma que os terminais são vistos da mesma maneira independente da RAT a que eles estejam conectados. O procedimento de mudança de tecnologia de acesso acontece de forma mais transparente, incorrendo também em atrasos, porém mais controlados;

Nos limitamos, nesta seção, em apresentar os níveis de acoplamento sem visualizarmos as arquiteturas de redes MA. Sampaio em [8] já descreve-as em detalhes para a rede UTRAN-WLAN, de maneira que julgamos desnecessário

incluí-las no corpo desta dissertação. Contudo, apresentaremos no capítulo seguinte a arquitetura básica utilizada no modelo MA adotado.

Capítulo 3

Modelagem do Sistema

A modelagem do problema de seleção de acesso para o serviço de VoIP é uma tarefa bastante complexa pois o sistema a ser modelado compreende muitos processos de natureza estocástica. Em um sistema de comunicação é difícil adotar uma abordagem puramente analítica e, mesmo através de uma ferramenta de simulação, não poucas vezes certas simplificações nos modelos são necessárias, uma vez que o tempo de processamento computacional também é uma importante variável a ser considerada.

Este capítulo está estruturado da seguinte maneira. A seção 3.1 apresenta o modelo utilizado para o VoIP. A modelagem das redes de acesso de rádio é detalhada na seção 3.2. Em seguida, na seção 3.3, apresentamos a métrica de desempenho de satisfação que será utilizada para análise dos algoritmos (capítulo 4). Finalmente, a descrição das funcionalidades da ferramenta de simulação é apresentada na seção 3.4.

3.1 Modelagem do Serviço de Voz sobre IP

Nesta seção, procuramos modelar as principais características relacionadas direta ou indiretamente ao serviço de VoIP. Apresentamos o modelo de tráfego utilizado e as características dos pacotes de VoIP, bem como aquelas relativas a sua codificação. Considerações sobre o processo de comunicação VoIP também são descritas nesta parte da dissertação.

3.1.1 Modelo de Tráfego

O modelo de tráfego de VoIP utilizado baseia-se em uma abordagem tradicional, em que a chegada das chamadas de voz obedece a um processo de Poisson [44].

Neste modelo, assume-se que o tempo de duração dessas chamadas é uma variável aleatória, distribuída exponencialmente, com uma média específica. As chamadas (ou sessões) de VoIP são formadas por períodos de atividade e de inatividade da voz, intercalados e com igual probabilidade, obedecendo a uma distribuição exponencial. Durante os períodos de atividade, assumimos que os quadros de voz são gerados a uma taxa de *bits* constante.

3.1.2 Codificador

Com relação ao uso do CODEC de voz, o AMR é comumente utilizado para redes IP sem fio por garantir ótima qualidade de voz e robustez contra perda de pacotes decorrente de congestionamentos em roteadores [45]. A utilização de um outro CODEC com taxa de geração diferente daquela do AMR proporcionaria maior ou menor concentração de pacotes nos *buffers* dos terminais. Neste caso, as RATs deveriam ser igualmente capazes de transmitir os pacotes de voz enfileirados para que não houvesse degradação do serviço. Neste trabalho, o processo de codificação de voz não foi implementado no simulador, no entanto, o efeito do CODEC AMR é considerado por meio da taxa de geração de quadros de voz própria para este codificador [21]. Uma vez os quadros de voz gerados, eles são empacotados no nível da camada RTP, assumindo a forma de pacotes de VoIP, e enviados através da pilha de protocolos.

3.1.3 Modelo dos Pacotes de VoIP

Os pacotes de VoIP são formados pelos *bits* dos cabeçalhos, concatenados quando do fluxo do pacote através da pilha de protocolos [20], e pelo *payload*, que representa o dado útil que contém a informação de áudio. Vale ressaltar que as funcionalidades dos protocolos associados ao VoIP não foram implementadas no simulador, no entanto, seu efeito é considerado justamente pelo encadeamento dos cabeçalhos IP, UDP e RTP ao *payload* de um pacote de voz. Nenhuma técnica de compressão de cabeçalhos foi utilizada neste trabalho.

A modelagem do serviço de VoIP não admite fragmentação de pacotes. Apesar de este mecanismo proporcionar diminuição do atraso da transmissão dos pacotes, em geral ele não é aplicado a este serviço.

Admitimos a existência de um *buffer* de transmissão para cada terminal na camada de enlace; *buffer* este responsável pelo armazenamento dos pacotes de VoIP vindos das camadas superiores.

A Figura 3.1 ilustra o modelo de chamada e a composição do pacote de VoIP

utilizado neste trabalho.

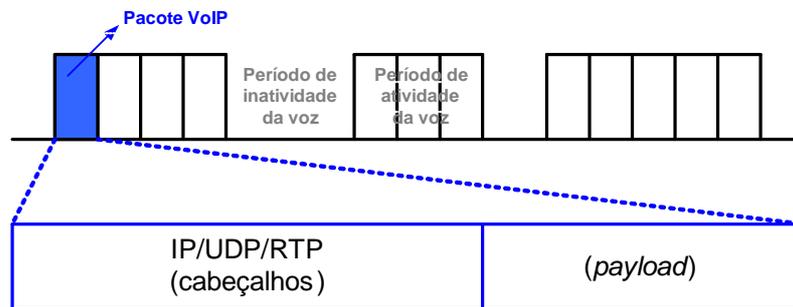


Figura 3.1: Modelo de chamada e do pacote de VoIP.

3.1.4 Comunicação de Voz na Rede Sem Fio

Conforme aludimos na seção 2.1.3, o atraso, o *jitter* e a perda de pacotes são fatores que influenciam no nível de qualidade da voz. A seguir, apresentamos a modelagem de cada um desses elementos.

De acordo com [46, 47], o tempo de uma comunicação de voz desde o instante de transmissão até o momento da recepção deve ser inferior a 150 *ms* para um bom nível de inteligibilidade da voz; isso considerando todos os nós existentes no sistema de comunicação: CODEC, LAN¹ ou PSTN, Internet, núcleo de rede, estação rádio base ou ponto de acesso e equipamentos móveis. Esse valor deve incluir todos os atrasos inerentes às etapas da cadeia de comunicação. No entanto, Pimentel em [2], define o atraso de acesso de um pacote VoIP como o atraso no escopo das RATs. Ou seja, o atraso de acesso é mensurado apenas dentro da rede sem fio, no nível da camada de enlace. Os demais atrasos incorrem numa contribuição constante. A abordagem feita por Pimentel é considerada, portanto, nesta dissertação.

A Figura 3.2 ilustra o atraso de acesso em uma rede sem fio no nível da camada de enlace.

No que concerne ao *jitter*, assumimos a existência de um *buffer* perfeito no receptor, configurado de tal maneira que esse fator é completamente eliminado.

A perda de pacotes é outro fator determinante para o desempenho do serviço de VoIP. Nesta dissertação, a perda de um pacote decorre unicamente do elevado atraso de acesso. Se este atraso for superior a um tempo máximo admissível, o pacote de VoIP é descartado. Dentro do escopo das RATs, a fila de espera no *buffer* para transmissão e erros no canal são fontes potenciais causadoras de perdas de

¹do inglês, *Local Area Network*

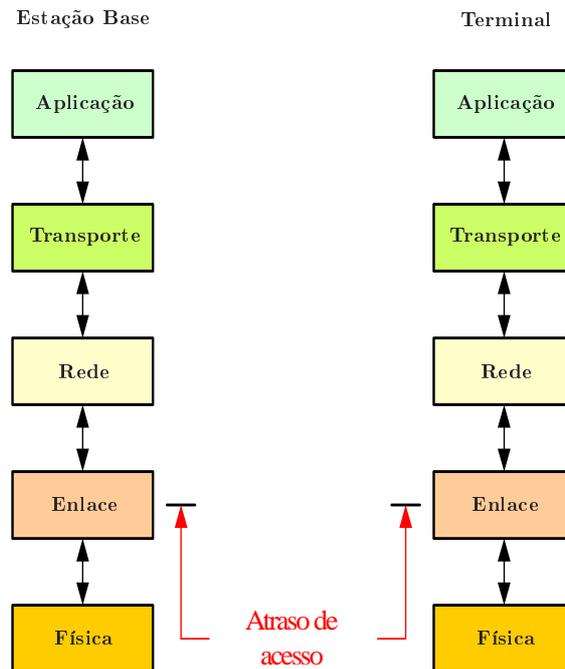


Figura 3.2: Atraso de acesso no nível da camada de enlace.

pacotes. No entanto, assumimos uma arquitetura *Hybrid ARQ*² [48] de forma que podemos admitir um canal livre de erros, ou seja, todos os pacotes transmitidos chegam com sucesso ao receptor. Portanto, a modelagem adotada indica que o descarte de pacotes é feito unicamente no *buffer* do terminal. De fato, o descarte no *buffer* corresponde ao mecanismo majoritário de perda de pacotes VoIP numa rede sem fio [2].

Vale ressaltar que a comunicação de VoIP, considerada nesta dissertação, é avaliada apenas para um único enlace.

3.2 Modelagem das Redes de Acesso de Rádio

A modelagem das RATs que compõem a rede multiacesso leva em consideração diversos aspectos, desde os de natureza geográfica, tais como sua disposição, suas localizações e o posicionamento dos usuários a elas conectados, até aqueles vinculados ao seu funcionamento; citamos os modelos de propagação, de adaptação de enlace e dos mecanismos de transmissão. A seguir, descrevemos, em detalhes, a modelagem das RATs que forma a rede multiacesso empregada neste trabalho.

²do inglês, *Automatic Repeat Request*

3.2.1 Modelagem da Rede Multiacesso

O modelo da rede multiacesso é composto por duas redes ou tecnologias de acesso de rádio genéricas denominadas RAT_1 e RAT_2 . São ditas genéricas porque não correspondem a modelos de redes já consagradas (UTRAN e WLAN, por exemplo). No entanto, alguns dos parâmetros dessas RATs genéricas podem ser ajustados de forma a incorporar algumas características substanciais de redes de acesso existentes.

Conforme mencionado anteriormente, é necessário que a entidade lógica CRRM opere como gerente dos recursos próprios das RATs que compõem a rede multiacesso [8]. A realização deste gerenciamento independe da localização dessa entidade, por isso, não nos preocupamos em situá-la conforme as três situações descritas na seção 2.2.2.

Apresentamos na Figura 3.3 a arquitetura multissistêmica utilizada nesta dissertação. Limitamos o modelo adotado a apenas uma macrocélula para a RAT_1 e uma microcélula para a RAT_2 .

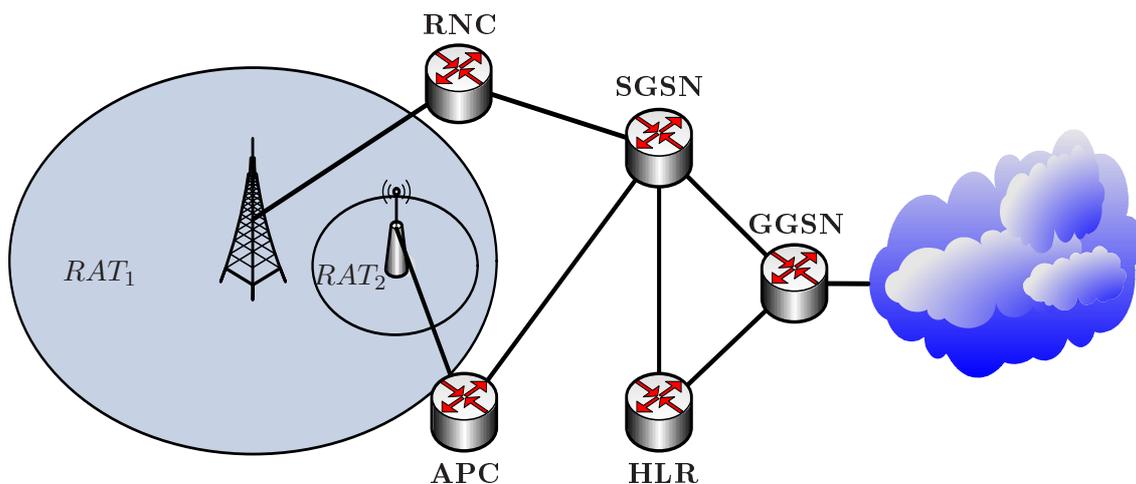


Figura 3.3: Arquitetura da rede multiacesso adotada.

As entidades APC³, RNC, HLR⁴, SGSN⁵ e GGSN⁶ [49,50], presentes numa rede UTRAN-WLAN, foram incluídas na Figura 3.3 com fins ilustrativos, uma vez que não são explicitamente modeladas nesta dissertação.

Ademais, a rede MA em foco estabelece unicamente o procedimento de seleção de acesso, sendo desnecessário explicitar o nível de acoplamento entre as RATs.

³do inglês, *Access Point Controller*

⁴do inglês, *Home Location Register*

⁵do inglês, *Serving GPRS Support Node*

⁶do inglês, *Gateway GPRS Support Node*

Quanto à localização da microcélula, esta deve estar posicionada dentro da região de cobertura macrocelular numa posição (x, y) relativa à antena da estação base (centro da macrocélula). Equivalente à estação base macrocelular, temos o ponto de acesso da RAT_2 localizado no centro da microcélula.

As RATs definem duas regiões, aqui denominadas IN^7 e OUT^8 . A região IN corresponde àquela região delimitada pelo raio da microcélula, ao passo que a região OUT corresponde à região exterior à microcélula e delimitada pelo raio da macrocélula. A Figura 3.4 ilustra as regiões IN e OUT .

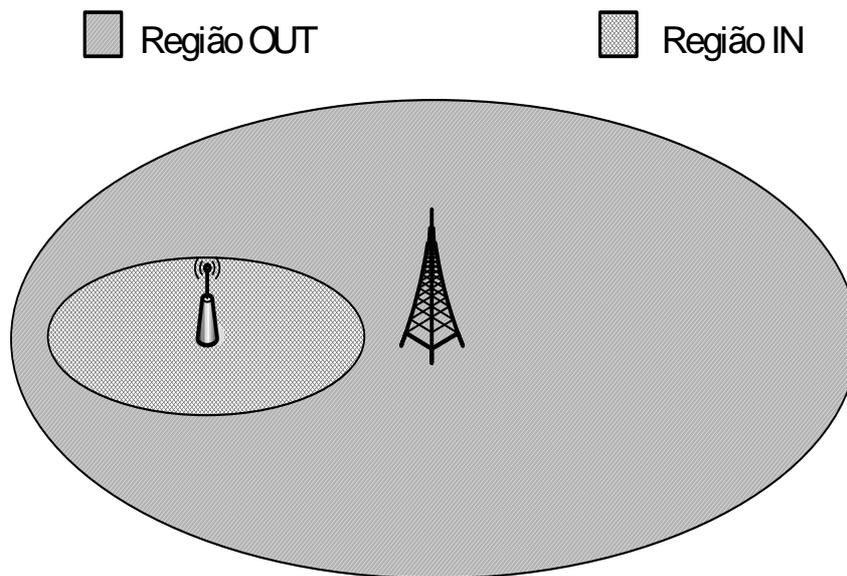


Figura 3.4: Regiões IN e OUT .

3.2.2 Disposição de Usuários na Rede Multiacesso

A cada usuário é atribuída uma posição fixa determinada pelo sistema de coordenadas cartesianas (x, y) . Assim como a posição da microcélula, a posição de referência para os usuários também corresponde ao centro da macrocélula. Cada usuário possui um único terminal que pode conectar-se às RATs da rede multiacesso. Apenas uma sessão ou chamada de VoIP é associada ao terminal do usuário.

A posição dos usuários obedece a uma distribuição uniforme tanto na região IN quanto na região OUT . Os terminais que se encontram na região IN podem ser conectados ou à RAT_1 ou à RAT_2 , enquanto os que se encontram na região OUT tentarão conectar-se apenas à RAT_1 . A qual RAT o terminal de um usuário na

⁷do inglês, *Inside*

⁸do inglês, *Outside*

região *IN* conectar-se-á, dependerá do mecanismo de seleção de acesso utilizado, conforme descrito na seção 3.2.6.

3.2.3 Modelos de Propagação

O efeito do canal é percebido através da qualidade do enlace de rádio, expressada por meio da relação sinal-ruído (SNR⁹) do terminal. A SNR é obtida por meio de modelos de propagação tradicionais. Neste trabalho, os modelos incluem perda de percurso e sombreamento.

O modelo de perda de percurso utilizado na *RAT*₁ é o COST231 [51]. Para o cálculo da perda de percurso (*L*) - medida em *dB* - utilizaremos o modelo COST aplicado a centros urbanos em dois casos: com e sem linha de visada (LOS¹⁰ e NLOS¹¹) [52]. O primeiro é válido para uma distância $20\text{ m} \leq d < 200\text{ m}$; o segundo, para $d \geq 200\text{ m}$.

Caso LOS:

$$L = 42.64 + 26 \cdot \log d + 20 \cdot \log f \quad (3.1)$$

Caso NLOS:

$$L = \begin{cases} L_0 + L_1 + L_2, & \text{se } L_1 + L_2 > 0 \\ L_0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.2)$$

em que

$$L_0 = 32.44 + 20 \cdot \log d + 20 \cdot \log f \quad (3.3)$$

$$L_1 = 6.14 + 10 \cdot \log f \quad (3.4)$$

$$L_2 = 15.78 + 18 \cdot \log d + \frac{1.5}{925} \cdot f - 5.5 \cdot \log f \quad (3.5)$$

e *f* expressa em *MHz*.

O modelo de propagação da microcélula considera perda de percurso no espaço livre, também medida em *dB*, para distâncias à antena transmissora (ponto de acesso) inferiores a uma distância de referência de 10 *m*. A partir desse ponto, a

⁹do inglês, *Signal-to-Noise Ratio*

¹⁰do inglês, *Line-Of-Sight*

¹¹do inglês, *Non-Line-Of-Sight*

perda de percurso sofre influência de um expoente de perda de percurso igual a 3. Este modelo foi utilizado por Pimentel em [2]. O cálculo de L em função da distância d e da frequência f é expresso a seguir.

Para $d < 10$ m:

$$L = -27.6 + 20 \cdot \log d + 20 \cdot \log f \quad (3.6)$$

Para $d \geq 10$ m:

$$L = -37.6 + 30 \cdot \log d + 20 \cdot \log f \quad (3.7)$$

em que d é expresso em metros e f , em MHz .

O efeito do sombreamento, que se sobrepõe à perda de percurso, reflete as variações ocorridas na potência recebida do terminal devido a obstáculos de larga escala. As amostras de sombreamento seguem uma distribuição log-normal e são geradas de acordo com [41, 53], que apresentam um método de geração baseado na correlação espacial bidimensional.

3.2.4 Adaptação de Enlace e Cobertura

O mapeamento entre a SNR do terminal e sua taxa de transmissão mapeada na camada física, em uma dada RAT, é realizada através da respectiva curva de adaptação de enlace. Neste trabalho, adotamos um modelo linear simplificado que se aproxima de uma curva real de adaptação [54, 55]. A Figura 3.5 apresenta o modelo utilizado.

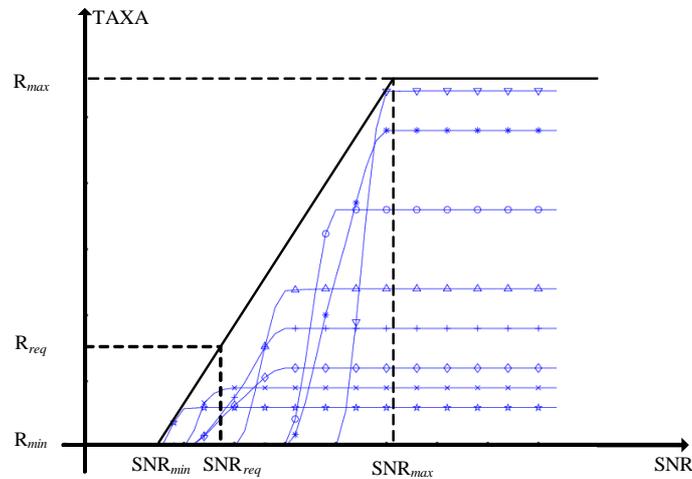


Figura 3.5: Modelo linear de adaptação de enlace.

A SNR_{max} representa o valor de SNR a partir do qual a taxa mapeada do terminal é máxima (R_{max}), ou seja, ocorre uma saturação da capacidade de transmissão. A SNR_{max} é determinada pela seguinte expressão:

$$SNR_{max} = P_t - L_{min} - N \quad (3.8)$$

em que P_t , L_{min} e N representam a potência de transmissão da base (ou ponto de acesso), a perda de percurso mínima e potência de ruído, respectivamente.

A perda mínima L_{min} é determinada para uma distância mínima que define o espaço de localização de usuários. Para distâncias inferiores a essa distância mínima não há usuários, pois, em geral, estes não se encontram na vizinhança das antenas transmissoras das RATs.

A SNR_{req} representa o mínimo valor de SNR para a qual a taxa mapeada do terminal é tal que permita a transmissão de pelo menos um pacote de VoIP (R_{req}). Essa restrição decorre do fato de que um pacote deve ser sempre transmitido em um TTI¹² (vide seção 3.2.6), por conta da inexistência de mecanismos de fragmentação de pacotes. A perda de percurso máxima L_{max} é determinada pela seguinte expressão

$$L_{max} = P_t - SNR_{req} - N - MS \quad (3.9)$$

em que MS corresponde a margem contra sombreamento. Esta margem visa assegurar que uma grande proporção de usuários na área de cobertura da célula experimentem uma $SNR \geq SNR_{req}$.

Um vez que L_{max} é conhecido, estima-se o raio de cobertura das RATs por meio das respectivas expressões de perda de percurso [2].

Por fim, a SNR_{min} representa a máxima SNR para a qual a taxa mapeada do terminal é mínima. Em geral, $R_{min} = 0$.

3.2.5 Controle de Admissão

Ambas as RATs possuem um mecanismo simples de controle de admissão (CAC¹³) baseado na taxa mapeada do terminal. Se a taxa mapeada for igual ou superior R_{req} , o terminal será conectado à RAT. Caso contrário, ele será bloqueado. Ou seja, para uma taxa R

¹²do inglês, *Transmission Time Interval*

¹³do inglês, *Call Admission Control*

$$\text{terminal} = \begin{cases} \text{conectado, se } R \geq R_{req} \\ \text{bloqueado, caso contrário} \end{cases} \quad (3.10)$$

É importante ressaltar que, nesta dissertação, o controle de admissão é realizado após a seleção de acesso. Assim, é possível que um algoritmo decida por uma RAT onde a nova chamada seja em seguida bloqueada.

Uma outra opção seria a implementação de um controle de admissão multissistêmico em que o bloqueio da nova chamada ocorreria antes da atuação do algoritmo de seleção de acesso. No entanto, neste caso, a determinação da satisfação combinada (vide seção 5.1) seria complexa, uma vez que os casos de insatisfação devido ao bloqueio de terminais não poderiam ser facilmente refletidos para cada RAT em particular.

3.2.6 Modelo de Transmissão

Nas redes sem fio tradicionais, os serviços de tempo real (voz, por exemplo) são transportados em canais dedicados, posto que tais aplicações são sensíveis a atrasos. Por outro lado, os serviços de tempo não-real (por exemplo, o WWW¹⁴) são transportados em canais compartilhados devido à robustez desses serviços. Contudo, hoje é possível transmitir tráfego de tempo real por canais compartilhados, o que corresponde à idéia do VoIP.

Neste trabalho, objetivando modelar essa característica, todos os terminais conectados a uma dada RAT são postos em uma fila que obedece a uma certa disciplina de escalonamento. Utilizamos o escalonador *Round Robin* [56], o qual preza pela justiça, uma vez que todos os terminais, a seu tempo, têm a oportunidade de realizar uma transmissão.

A cada escalonamento um terminal tem disponível um TTI para transmitir seus pacotes. Mesmo que seus pacotes sejam transmitidos num tempo inferior ao TTI, o próximo terminal só será escalonado ao final do TTI. Vale ressaltar que o terminal só será escalonado se porventura seu *buffer* contiver pacotes para transmissão.

O modelo adotado consiste de dois mecanismos de transmissão: o *mecanismo de transmissão por rajadas* e o *mecanismo de transmissão simples*. No primeiro, para o terminal escalonado, ocorre a transmissão dos pacotes armazenados no seu *buffer*, de acordo com sua taxa mapeada. A taxa do terminal pode não ser suficiente

¹⁴do inglês, *World Wide Web*

para a transmissão de todos os pacotes armazenados no *buffer*. Neste caso, os pacotes que chegarem primeiro ao *buffer* serão transmitidos e os demais aguardarão o próximo escalonamento do terminal. No segundo mecanismo, independente da taxa mapeada, ocorre apenas a transmissão de um único pacote de VoIP referente ao terminal escalonado; os demais, como no primeiro mecanismo, permanecerão no *buffer* até que o terminal seja novamente escalonado.

É notável que o primeiro mecanismo proporciona maior rapidez na transmissão de pacotes de VoIP. Assim, seria mais apropriado utilizar este mecanismo nas duas RATs. No entanto, optamos por utilizar um mecanismo mais lento para uma das RATs visando torná-las mais heterogêneas. Os mecanismos utilizados para as RATs incorporam características daqueles utilizados em redes já existentes (vide seção 5.4).

É importante frisar que os pacotes ainda não transmitidos só permanecerão no *buffer* até decorrer o tempo máximo admissível, definido no nível da camada de enlace. Após esse tempo, eles são considerados perdidos (descartados), conforme mencionado na seção 3.1.4.

Por fim, quando a sessão do usuário é encerrada (fim da chamada), o terminal do usuário é retirado da fila de escalonamento.

3.2.7 Interferência

Assumimos que as RATs utilizam bandas distintas de frequência, de forma que um terminal conectado a uma RAT não interfere em outro conectado a outra RAT.

Em relação à interferência co-canal, o fato de considerarmos apenas uma única célula por RAT nos permite desconsiderar esse fator de interferência. É claro que não haveria impedimento de se conceber um modelo que incluísse interferência co-canal, mesmo para o caso unicolor, bastando incorporar ao modelo o efeito de células hipotéticas. No entanto, esse tipo de modelagem de interferência requer um alto nível de complexidade e não alteraria, em termos qualitativos, as conclusões obtidas neste trabalho; não sendo, portanto, objeto desta dissertação.

O efeito em cada RAT de desprezarmos essa interferência é a superestimação da taxa mapeada na camada física (taxa mapeada do terminal). Já quanto ao desempenho dos algoritmos de seleção de acesso, seria necessário um estudo que apontasse a relação de dependência entre os algoritmos e a interferência co-canal. Neste caso, seria esperado um impacto apenas quantitativo no desempenho, sem alterar a comparação de desempenho relativo entre os diferentes algoritmos

estudados.

Quanto às interferências externas (fornos microondas, equipamentos com tecnologia *Bluetooth*, telefones sem fio, por exemplo), poderíamos, em face da generalidade das RATs, atribuir uma frequência de operação diferente daquelas dos exemplos citados. De fato, a RAT_2 incorporará características similares às do padrão IEEE 802.11a (vide seção 5.4), cuja frequência de operação é de 5 GHz, ou seja, diferente daquela dos já mencionados equipamentos.

Dessa maneira, no que tange às fontes de interferências, nenhum modelo é considerado neste trabalho.

3.3 Métrica de Desempenho

Neste trabalho, a avaliação do desempenho dos algoritmos de seleção de acesso é realizada através da métrica de satisfação do usuário [8]. A satisfação está associada à obediência aos requerimentos intrínsecos ao serviço de VoIP. Um usuário é considerado satisfeito quando sua FER¹⁵ (razão entre o número de pacotes perdidos e o total de pacotes transmitidos e perdidos), durante uma chamada (sessão) é inferior a uma taxa máxima admissível de perda FER_{max} , refletindo, portanto, em uma boa qualidade de voz provida pelo CODEC. Do contrário, o usuário será considerado insatisfeito (isso inclui os usuários bloqueados).

À medida que o número de terminais conectados à rede multiacesso aumenta, devido ao aumento de taxa de chegada de novas chamadas, o percentual de usuários satisfeitos tende a cair, eis que eles têm de esperar um tempo mais prolongado para serem escalonados, o que ocasiona maiores atrasos e, conseqüentemente, um número maior de pacotes perdidos. Sendo assim, torna-se necessário estabelecer um limite máximo de conexões que reflita em um percentual mínimo admissível de usuários satisfeitos P_{min} .

Dependendo do cenário estudado, o desempenho dos algoritmos de seleção de acesso é comparado com um cenário de referência, definido no capítulo 5. A avaliação dos algoritmos é realizada por meio dos ganhos de capacidade e de satisfação [8], conforme apresentado na figura 3.6.

O ganho de capacidade é definido como o percentual de chamadas a mais suportados pelo sistema na condição de satisfação já aduzida. Matematicamente temos

$$\text{Ganho de Capacidade} = 100 \cdot \frac{C_A - C_R}{C_R} \quad [\%] \quad (3.11)$$

¹⁵do inglês, *Frame Erasure Rate*

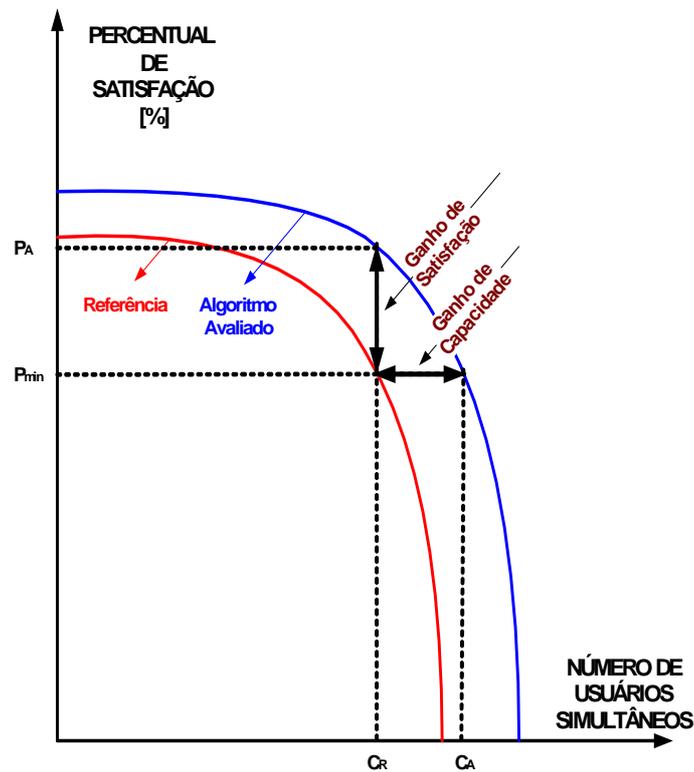


Figura 3.6: Ganhos de capacidade e de satisfação.

em que C_R e C_A representam as capacidades para o cenário de referência e para o algoritmo avaliado, respectivamente.

Já o ganho de satisfação é definido como o percentual de satisfação a mais determinado a partir da capacidade alcançada pelo cenário de referência (C_R). Assim,

$$\text{Ganho de Satisfação} = 100 \cdot \frac{P_A - P_{min}}{P_{min}} \quad [\%] \quad (3.12)$$

em que P_A é o percentual de usuários satisfeitos, para o algoritmo avaliado, quando o número de chamadas simultâneas na rede é igual a capacidade determinada no cenário tido como referência.

3.4 Ferramenta de Simulação

Com o intuito de avaliar os algoritmos de seleção de acesso numa rede multiacesso para o serviço de VoIP, foi desenvolvida pelo autor e especificamente para esta dissertação, uma ferramenta de simulação em linguagem de programação

MATLAB[®], denominada *MARTSim*¹⁶, de característica dinâmica e orientada a tempo. O fluxograma apresentado na figura 3.7 descreve, de maneira geral, o funcionamento deste simulador.

¹⁶do inglês, *Multi-Access and Real Time Simulator*

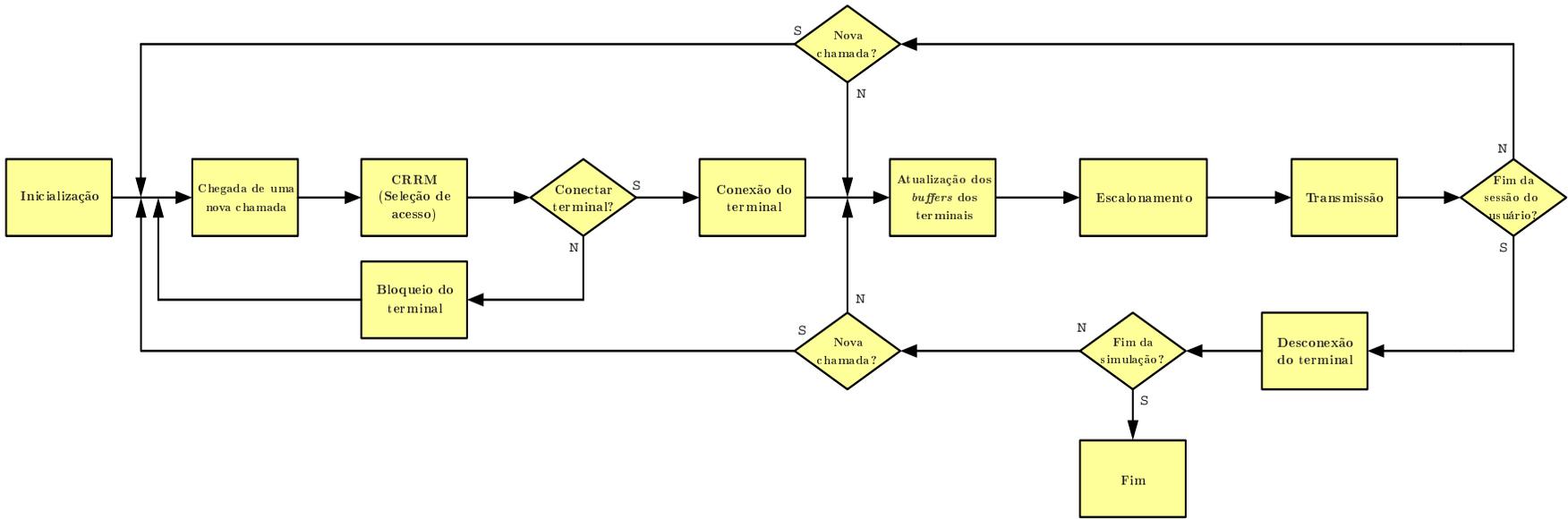


Figura 3.7: Fluxograma do funcionamento geral do simulador.

O bloco de **Inicialização** consiste de configurações básicas definidoras dos cenários estudados. Definir os cenários significa caracterizar os modelos (tráfego, adaptação de enlace, propagação, algoritmos, etc.) por intermédio de seus parâmetros.

O bloco de **Chegada de uma nova chamada** denota que uma nova e única chamada surgiu na rede. A entidade CRRM atuará no processo de decisão de qual RAT será a chamada direcionada. Caso o terminal não tenha cobertura ele será bloqueado e o simulador deverá tratar a próxima chamada que surgir no sistema. Do contrário, o terminal será conectado a uma RAT e, assim, posto em uma fila de escalonamento.

Antes de um terminal escalonado transmitir pacotes de VoIP, é necessário que os *buffers* de todos os terminais conectados em ambas as RATs sejam atualizados. A atualização (bloco **Atualização dos buffers dos terminais**) consiste em retirar dos *buffers* aqueles pacotes que já foram transmitidos e/ou perdidos.

Em seguida, um terminal é escalonado e transmite. A transmissão é realizada de acordo com o mecanismo da RAT à qual o terminal está conectado, conforme descrito na seção 3.2.6. É possível que, ao término de uma transmissão, o usuário encerre sua sessão. Neste caso, seu terminal é desconectado do sistema.

Independente do encerramento ou não da sessão do usuário, chega-se a um ponto em que se verifica a possível chegada de uma nova chamada no sistema. Assim, ou a simulação retornará ao bloco de **Chegada de uma nova chamada**, ou à fase de atualização dos *buffers*. De qualquer forma, se processará uma nova iteração no simulador. O tempo de uma iteração corresponde exatamente ao menor TTI, dado que, neste tempo, os eventos (escalonamento e transmissão, por exemplo) relacionados a RAT com maior TTI poderão ser corretamente processados em seus devidos instantes. Facilmente percebemos que só se poderá afirmar do correto processamento temporal dos eventos da RAT com maior TTI, se este for múltiplo do menor TTI.

O critério de parada da simulação é baseado nas quantidades totais de sessões finalizadas nas RATs (fim da simulação se n sessões foram finalizadas na RAT_1 ou se m o foram na RAT_2 , por exemplo). Assim, dependendo da RAT à qual o terminal estava conectado, a correspondente quantidade de sessões é incrementada ao término da sessão do usuário.

Capítulo 4

Procedimento de Seleção de Acesso

Neste capítulo, apresentamos a idéia de seleção de acesso, descrevendo sua definição, o procedimento e as principais características que a envolvem. Apresentamos, outrossim, os algoritmos estudados; sua formulação matemática, os critérios e os parâmetros envolvidos. Os algoritmos, aqui descritos, servem de base para análise dos resultados desta dissertação. Por fim, comentários adicionais são realizados para esses algoritmos.

4.1 Conceito Básico de Seleção de Acesso

Como sabemos, as redes multiacesso devem ser capazes de realizar o procedimento de seleção de acesso por meio da entidade CRRM. A seleção de acesso consiste da escolha apenas inicial de uma RAT para uma nova chamada. Essa escolha é apenas inicial pelo fato de que, durante uma sessão, o terminal conectado a uma RAT pode ter sua chamada redirecionada a outra RAT, através, por exemplo, de um VHO (vide seção 2.2.3). No entanto, uma vez que não implementamos o VHO, o terminal permanece conectado a uma única RAT desde o instante da seleção de acesso até o término de sua sessão.

A entidade CRRM deve selecionar uma RAT para o terminal, dentre as possíveis, de maneira que a distribuição de usuários seja tal que a utilização dos recursos das RATs se reflita em um melhor desempenho do sistema como um todo (menos atrasos, menos pacotes perdidos, mais usuários satisfeitos, maior taxa para o usuário, etc). O desempenho da rede multiacesso depende, então, da política de seleção de acesso utilizada; política essa apoiada num algoritmo.

A operação básica da seleção de acesso é apresentada na Figura 4.1. Uma nova chamada surge no sistema e a entidade CRRM decide conectar o terminal a uma

das n RATs possíveis.

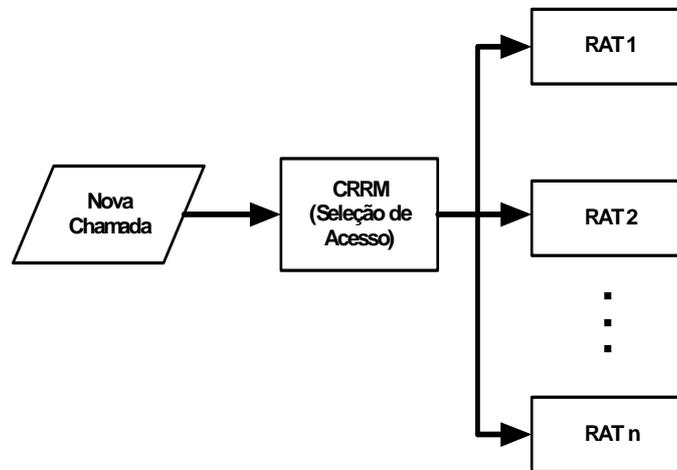


Figura 4.1: Seleção de acesso.

4.2 Medidas para Seleção de Acesso

Além do procedimento básico de escolha de uma RAT, a entidade CRRM também necessita comunicar-se com as RATs para atualizar medidas (número de chamadas simultâneas, percentual de satisfação, atraso médio, SNR do terminal, vazão agregada, entre outras) para efetivação da seleção de acesso, uma vez que o estado do sistema varia freqüentemente. É claro que não é razoável que a obtenção (atualização) dessas medidas seja em intervalos curtos de tempo, pois, dessa maneira, atrasos seriam introduzidos no sistema, além de não garantir um ganho (de capacidade e/ou de satisfação) considerável dos algoritmos, em comparação com o caso em que tal atualização fosse menos freqüente. Logo, o período de atualização deve ser tal que esses atrasos sejam minimizados (podendo ser desconsiderados na modelagem) e que, ainda sim, seja garantido ganho de desempenho com a seleção de acesso.

A Figura 4.2 apresenta um esquema simplificado da operação de atualização de medidas, realizada pela entidade CRRM para o caso particular de duas RATs.

Periodicamente, ocorre atualização das medidas. Conforme aduzimos anteriormente, tal atualização é realizada através da comunicação da entidade CRRM com as entidades RRM de cada RAT. Portanto, é necessário que cada RAT (através de sua RRM) seja monitorada e medidas sejam realizadas, de forma a reportá-las à CRRM no momento da atualização.

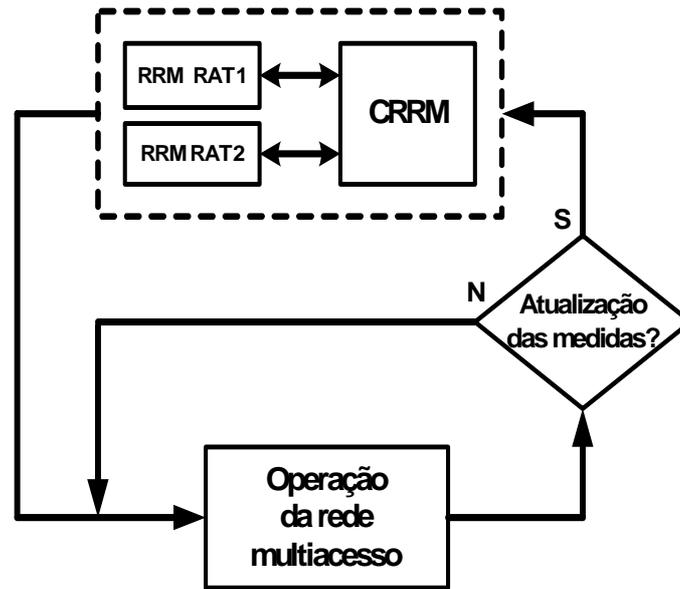


Figura 4.2: Atualização das medidas: comunicação entre a entidade CRRM e as RATs.

4.3 Algoritmos de Seleção de Acesso

Os algoritmos de seleção de acesso são ferramentas importantes que viabilizam a seleção de uma RAT para uma dada chamada de um terminal. A decisão de um algoritmo baseia-se, matematicamente, em uma função f , que corresponde ao(s) critério(s) adotado(s) para seleção de uma RAT (maximização da taxa, balanceamento da carga do sistema, por exemplo). Esse(s) critério(s) é (são) estabelecido(s) a partir de indicadores de desempenho (SNR, taxa, atraso, vazão, satisfação, entre outros), os quais constituem os parâmetros da função algorítmica f .

Seja i o índice correspondente à RAT_i selecionada. A equação 4.1 apresenta a formulação geral de decisão de um algoritmo de seleção de acesso.

$$i = f(\text{parâmetros}) \quad (4.1)$$

A função f e seus parâmetros podem estar sujeitos a restrições que reflitam as limitações do terminal, do serviço e das tecnologias de acesso. Sem delongas, algumas restrições incorporadas aos algoritmos de seleção de acesso são descritas por Sampaio em [8].

Até agora, não nos preocupamos em verificar a relação entre um algoritmo de seleção de acesso e a quantidade de medidas sujeitas à atualização, as quais são utilizadas como parâmetros da função f que caracteriza o algoritmo. Em

verdade, alguns algoritmos podem requerer a atualização de mais de uma medida e, além disso, a informação trazida por esse parâmetro medido pode requisitar um monitoramento mais complexo pela entidade RRM. Como exemplo, podemos citar, como medidas, o número de chamadas simultâneas e o número de usuários satisfeitos de cada RAT. Para o primeiro parâmetro, a entidade RRM necessita realizar sua medição apenas quando for disponibilizá-lo à CRRM. No entanto, para o segundo, é necessário que haja um monitoramento constante dos pacotes perdidos e transmitidos na rede, uma vez que a satisfação do usuário, no caso do serviço de VoIP, depende da FER. Portanto, a complexidade dos algoritmos está associada ao número de parâmetros utilizados e ao nível de monitoramento destes em cada RAT.

Uma avaliação mais realista dos algoritmos seria mensurar a relação ganho/complexidade. No entanto, não é tão trivial quantificar a complexidade de um algoritmo, bem como relacionar a importância entre ela e o ganho.

4.4 Classificação dos Algoritmos de Seleção de Acesso quanto ao Critério

Segundo Sampaio [8], quanto ao critério, os algoritmos de seleção de acesso podem ser classificados em cinco grupos:

- ▶ **Orientados à cobertura:** esta categoria de algoritmos não leva em consideração as características funcionais das RATs e as características do terminal. O critério é simplesmente a existência de cobertura para uma RAT específica. Exemplificando, se um terminal está na região de cobertura de uma RAT (logicamente a RAT que, *a priori*, possa prover melhor desempenho ao sistema e melhor qualidade de serviço ao usuário), ele será a ela conectado. Um exemplo de algoritmo orientado à cobertura é encontrado em [57].
- ▶ **Orientados a serviços:** os algoritmos dessa categoria levam em consideração os tipos de serviços e as RATs que melhor se adequam a eles. Um exemplo hipotético: terminais de voz são conectados a uma rede orientada a chaveamento de circuitos, enquanto terminais do serviço WWW são conectados a uma rede baseada em chaveamento de pacotes. Um outro exemplo seria a possibilidade de um algoritmo de seleção de acesso visar o controle prioritário de fluxos: conexão de terminais de voz à rede menos sobregarregada. Em [58], encontramos um exemplo dessa classe de algoritmos.

- ▶ **Orientados ao terminal:** algoritmos baseados somente nas características do terminal em conexão (SNR e taxa, por exemplo). Neste trabalho, apresentaremos um algoritmo típico que foi originalmente introduzido em [57].
- ▶ **Orientados à RAT:** esta classificação algorítmica baseia-se somente nas condições das RATs, como capacidade, vazão agregada, satisfação dos usuários, por exemplo. De efeito, esses algoritmos tornam-se interessantes quando as redes são heterogêneas, já que, nesse caso, é possível verificar, com maior precisão, as diferenças existentes entre as tecnologias de acesso. Nesse contexto, será proposto um algoritmo [59] e considerado ainda o algoritmo descrito em [7, 60].
- ▶ **Orientados ao terminal e à RAT:** os algoritmos aqui classificados levam em consideração tanto as condições da nova chamada quanto as condições das RATs. Por conta disso, a formulação e implementação de tais algoritmos tende a ser mais complexa.

4.5 Modelagem do Procedimento de Seleção de Acesso

Antes de abordarmos os algoritmos estudados, é necessário descrever como o procedimento de seleção de acesso é modelado. Considere uma rede multiacesso composta por n RATs genéricas. Sejam os vetores $\mathbf{SNR} = [SNR_1 \ SNR_2 \ \dots \ SNR_n]$ e $\mathbf{SNR}_{req} = [SNR_{req1} \ SNR_{req2} \ \dots \ SNR_{reqn}]$, em que SNR_k e SNR_{reqk} são a SNR instantânea do terminal e a SNR mínima requerida na k -ésima RAT, respectivamente. Seja ainda o vetor binário \mathbf{U} que define o estado de cobertura do terminal nas RATs para atuação dos algoritmos. Se $\mathbf{SNR}(k) \geq \mathbf{SNR}_{req}(k)$, $\mathbf{U}(k) = 1$ e a RAT_k fará parte do conjunto de RATs passíveis de seleção pelos algoritmos. Por outro lado, se $\mathbf{SNR}(k) < \mathbf{SNR}_{req}(k)$, $\mathbf{U}(k) = 0$. Neste último caso, desde que $\mathbf{U} \neq \mathbf{0}$, a RAT_k não poderá ser selecionada para o terminal.

A Figura 4.3 ilustra uma rede multiacesso formada por quatro RATs. O terminal T_1 está na região de cobertura das RATs 1, 2 e 3; portanto, o vetor \mathbf{U} a ele associado é $[1 \ 1 \ 1 \ 0]$. Já o terminal T_2 está na região de cobertura das RATs 1 e 4; logo, o vetor \mathbf{U} para este terminal é $[1 \ 0 \ 0 \ 1]$.

O caso em que $\mathbf{U} = \mathbf{0}$ corresponde a uma situação em que o terminal está totalmente sem cobertura. Neste caso, a entidade CRRM seleciona aleatoriamente uma RAT ($i = rand\{1, 2, \dots, n\}$), deixando a cargo do CAC da RAT escolhida o

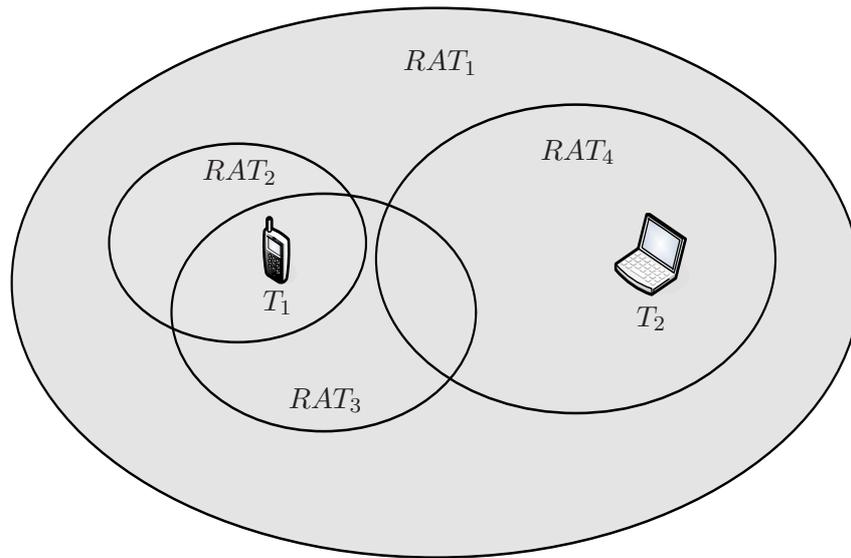


Figura 4.3: Exemplo de uma rede multiacesso com quatro RATs.

bloqueio da chamada (vide seção 3.2.5). Por outro lado, quando $\mathbf{U} \neq \mathbf{0}$, o algoritmo de seleção de acesso entrará em operação ($i = f(\text{parâmetros})$).

Vale dizer, no entanto, que os algoritmos podem decidir por mais de uma tecnologia de acesso, uma vez que nada impede que os critérios adotados proporcionem resultados similares em algumas RATs. Assumiremos, neste caso, que a entidade CRRM decidirá aleatoriamente por uma das RATs envolvidas no empate.

A seguir, apresentamos a descrição dos algoritmos estudados nesta dissertação. As situações de empate não estão evidenciadas.

4.6 Descrição dos Algoritmos de Seleção de Acesso Estudados

A seguir, apresentamos os critérios, os parâmetros e as restrições dos algoritmos de seleção de acesso analisados nesta dissertação. Abordamos quatro algoritmos: o CBA¹, que é baseado somente na cobertura; o RMA², baseado na taxa mapeada do terminal; o LBA³, com fulcro no balanceamento da carga oferecida ao sistema; e o SBA⁴, que representa a proposição algorítmica deste trabalho e é baseado na satisfação estimada dos usuários conectados.

Para os algoritmos, adotaremos a seguinte notação:

¹do inglês, *Coverage-based Algorithm*

²do inglês, *Rate Maximization Algorithm*

³do inglês, *Load Balancing Algorithm*

⁴do inglês, *Satisfaction Balancing Algorithm*

- ▶ $index_min(vetor)$: operação que retorna o índice do menor elemento de um vetor;
- ▶ $index_max(vetor)$: operação que retorna o índice do maior elemento de um vetor;
- ▶ $max(vetor)$: operação que retorna o maior elemento de um vetor;
- ▶ $diag(matriz)$: vetor definido como a diagonal principal de uma matriz;
- ▶ **1**: vetor cujo os elementos são iguais a unidade.

4.6.1 Algoritmo Baseado na Cobertura (CBA)

Um algoritmo simples de seleção de acesso é o CBA, cujo critério é baseado numa fila prioritária de cobertura. Neste algoritmo, o terminal, localizado na região de cobertura das RATs, deve ser conectado àquela mais prioritária. Para definir qual é a ordem de prioridade das n RATs que formam a rede multiacesso, é preciso estabelecer critérios que possam indicar vantagens de uma RAT sobre outra. A taxa máxima na camada física de uma RAT é um exemplo de critério. Se essa taxa na RAT_j for superior à taxa máxima na RAT_k , podemos inferir que aquela RAT é mais vantajosa do que esta para este critério e, portanto, tem maior prioridade de seleção.

Seja então $\mathbf{Q} = [Q_1 \ Q_2 \ \dots \ Q_n]$ o vetor de prioridades das RATs na rede multiacesso, em que $Q_k > 0$ para todo $k \in \{1, 2, \dots, n\}$. O elemento Q_k corresponde à prioridade da RAT_k . A função algorítmica f tem como único parâmetro o vetor \mathbf{Q} , o qual não constitui um parâmetro medido, mas predefinido. Assim,

$$i = f(\mathbf{Q}) = index_max(diag(\mathbf{Q}^T \mathbf{U})) \quad (4.2)$$

Para o caso particular de duas RATs e assumindo que $\mathbf{U} = [1 \ 1]$, a função f é, então, expressa por

$$i = f(Q_1, Q_2) = \begin{cases} 1, & \text{se } Q_1 > Q_2 \\ 2, & \text{se } Q_1 < Q_2 \end{cases} \quad (4.3)$$

Neste trabalho, consideramos como critério de prioridade a taxa máxima na camada física oferecida pela RAT. Conforme apresentaremos adiante, essa taxa na RAT_2 é superior àquela na RAT_1 ; portanto, a RAT_2 terá maior prioridade sobre a RAT_1 .

Um algoritmo bastante semelhante foi proposto por Yilmaz em [7] e também abordado por Sampaio em [8] e por Sousa Jr. em [61].

4.6.2 Algoritmo de Maximização da Taxa do Terminal (RMA)

O RMA é um algoritmo orientado ao terminal e que tem como critério a maximização da taxa mapeada na camada física (vide seção 3.2.4). Neste algoritmo, a RAT escolhida será aquela que fornecer ao terminal a maior taxa de transmissão.

Seja $\mathbf{R} = [R_1 \ R_2 \ \dots \ R_n]$ o vetor que denota a taxa mapeada para o terminal nas n RATs. A função f tem como único parâmetro o vetor \mathbf{R} que, por sua vez, depende de SNR . Assim,

$$i = f(\mathbf{R}(\text{SNR})) = \text{index_max}(\text{diag}(\mathbf{R}^T \mathbf{U})) \quad (4.4)$$

Para o caso particular de duas RATs e assumindo que $\mathbf{U} = [1 \ 1]$, a função f é, então, expressa por

$$i = f(R_1(\text{SNR}_1), R_2(\text{SNR}_2)) = \begin{cases} 1, & \text{se } R_1 > R_2 \\ 2, & \text{se } R_1 < R_2 \end{cases} \quad (4.5)$$

Este algoritmo de seleção de acesso foi originalmente proposto por Yilmaz [7] e avaliados por Sousa Jr. [61] e Sampaio [8] para serviços de tempo não-real, com resultados satisfatórios.

4.6.3 Algoritmo de Balanceamento da Carga Oferecida (LBA)

O algoritmo LBA é orientado às tecnologias de acesso e baseado na carga oferecida ao sistema. Não existe um critério único para se mensurar o efeito da carga em uma RAT. Yilmaz, em [7], apresenta, por exemplo, um algoritmo cujo o aumento da carga em uma RAT tem influência direta em um limiar estabelecido de SNR dessa mesma RAT. Já em [60], é estabelecida uma largura de banda fixa para cada nova chamada em conexão. Nesta referência, cada RAT, em particular, disponibiliza uma largura de banda máxima a ser utilizada.

Apesar de que em ambos os trabalhos citados os algoritmos têm relação com o total de terminais conectados às RATs, procuramos, aqui, mostrar este aspecto com maior evidência. Assim, o efeito da carga no LBA será mensurado, diretamente, a partir do número de chamadas simultâneas nas RATs. É claro que, em tese, as RATs aqui estudadas possuem características diferentes, de maneira que a capacidade é diferente em cada uma delas. É por isso que torna-se necessário normalizar o

número de terminais conectados a uma RAT pela sua capacidade. Vale ressaltar, no entanto, que a capacidade em uma RAT pode ser influenciada, principalmente, pela distribuição de usuários nas regiões *IN* e *OUT* (vide seção 5.4). Neste trabalho, no caso em que uma grande concentração de terminais conectados à macrocélula esteja próxima à antena da estação base, as taxas mapeadas para esses terminais proporcionam maior transmissão de pacotes VoIP por intervalo de tempo e, conseqüentemente, aumento de capacidade da RAT. No caso contrário, em que a concentração seja reduzida próxima à antena, as taxas são mais baixas nesta RAT, o que reduz sua capacidade. Em face dessa variabilidade quanto à capacidade, nos limitamos, entretanto, a determiná-la considerando o caso único de uniformidade de usuários em cada RAT. Na verdade, a distribuição de usuários depende de diversos fatores, como o horário e o dia da semana, por exemplo; assim, seria complexo para o sistema um monitoramento preciso dessa distribuição se não fizessemos tal restrição.

Seja $\mathbf{L} = [L_1 \ L_2 \ \dots \ L_n]$ o vetor que expressa a carga oferecida normalizada das n RATs que formam a rede multissistêmica, em que $L_k \geq 0$. O elemento L_k é definido como a razão entre o número de chamadas em curso (N_k) e a capacidade de chamadas suportadas (C_k) na RAT_k . Matematicamente, $L_k = \frac{N_k}{C_k}$. A função f tem como parâmetro o vetor \mathbf{L} . Assim,

$$i = f(\mathbf{L}) = \text{index_min}(\mathbf{diag}(\mathbf{L}^T \mathbf{U}) + m \cdot (\mathbf{1} - \mathbf{U})) \quad (4.6)$$

para todo $m > \max(\mathbf{L})$.

Em geral, as RATs devem operar aquém de sua capacidade. Neste caso, para uma dada RAT_k , temos sempre $L_k \leq 1$. No entanto, o algoritmo LBA atuará coerentemente mesmo quando $L_k > 1$.

Para o caso particular de duas RATs e assumindo que $\mathbf{U} = [1 \ 1]$, a função f é, então, expressa por

$$i = f(L_1, L_2) = \begin{cases} 1, & \text{se } L_1 < L_2 \\ 2, & \text{se } L_1 > L_2 \end{cases} \quad (4.7)$$

Nota-se que a conexão de um terminal é realizada de forma a balancear (equilibrar) a rede MA. Ou seja,

$$\frac{N_1}{C_1} \approx \frac{N_2}{C_2} \quad (4.8)$$

4.6.4 Algoritmo de Balanceamento dos Usuários Conectados Satisfeitos (SBA)

O SBA, algoritmo proposto neste trabalho, leva em consideração aspectos das tecnologias de acesso. Procuramos implementá-lo de forma que sejam refletidas as principais características das RATs tendentes a contribuir com maior desempenho em termos de satisfação de usuários (vide seção 3.3). Dessa maneira, o algoritmo proposto é baseado na proporção de usuários satisfeitos com chamadas em curso nas RATs. A decisão tomada pela entidade CRRM, quando da seleção de acesso, versa sobre aquela RAT cujo percentual de satisfação de usuários com terminais conectados, naquele momento, é maior. De forma similar ao LBA, o algoritmo proposto visa balancear tais percentuais. Essa idéia algorítmica nos parece coerente, pois uma proporção momentânea de satisfação mais baixa em uma RAT é um indicativo de um desempenho inferior desta RAT (maiores atrasos e, conseqüentemente, maiores perdas de pacotes).

Sejam os vetores $\mathbf{N} = [N_1 \ N_2 \ \dots \ N_n]$ e $\mathbf{V} = [V_1 \ V_2 \ \dots \ V_n]$, em que N_k e V_k representam, respectivamente, o total de terminais conectados (ou chamadas simultâneas) na RAT_k e o total de usuários satisfeitos na mesma RAT. Nota-se que $N_k \geq V_k$ para todo $k \in \{1, 2, \dots, n\}$. Definimos, então, um vetor \mathbf{P} como a proporção de satisfação momentânea, construído a partir de \mathbf{N} e \mathbf{V} . Assim, para $N_k > 0$, $P_k = \frac{V_k}{N_k}$; e para $N_k = 0$, $P_k = 1$. Neste último caso ($N_k = 0$) admitimos que P_k assume o valor máximo de satisfação quando não há terminais conectados na RAT_k . De fato, pela possibilidade de disponibilizar todos os seus recursos para a nova chamada, esta RAT é mais atrativa.

A função f tem como parâmetro o vetor \mathbf{P} e é dada por

$$i = f(\mathbf{P}) = \text{index_max}(\text{diag}(\mathbf{P}^T \mathbf{U}) + q \cdot (\mathbf{U} - \mathbf{1})) \quad (4.9)$$

para todo $q > 0$.

Para o caso particular $n = 2$ e assumindo também que $\mathbf{U} = [1 \ 1]$, o critério algorítmico, expresso por f , é dado por

$$i = f(P_1, P_2) = \begin{cases} 1, & \text{se } P_1 > P_2 \\ 2, & \text{se } P_1 < P_2 \end{cases} \quad (4.10)$$

Semelhante ao LBA, o SBA tende a balancear a satisfação momentânea de

usuários nas RATs, a saber,

$$\frac{V_1}{N_1} \approx \frac{V_2}{N_2} \quad (4.11)$$

4.7 Comentário Adicional sobre os Algoritmos Estudados

O algoritmo CBA é bastante simples pois leva em consideração apenas a cobertura. Não há necessidade de envio de medidas a entidade CRRM, nem de atualização periódica de medidas, nem de monitoramento das RATs, já que a entidade CRRM tem as informações de prioridade *à priori*. Sua implementação computacional também é deveras simples. No entanto, é difícil definir o(s) melhor(es) critério(s) que evidencie(m) a prioridade de uma RAT sobre outra.

O RMA também é um algoritmo simples, porém mais complexo que o CBA. A entidade CRRM deve obter medidas sobre as taxas mapeadas nas RATs para, então, decidir sobre qual RAT o terminal será conectado. De qualquer forma, assim como no CBA, não há necessidade de monitoramento das RATs por parte das entidades RRM respectivas, nem de atualização periódica de medidas para utilização no algoritmo. Como o RMA é unicamente orientado ao terminal, ele traz como desvantagem a possível decisão por uma RAT já sobrecarregada, o que pioraria o desempenho da rede multiacesso.

Diferente do RMA, o LBA leva em consideração as características das RATs. A comunicação da entidade CRRM com as RATs torna-se necessária somente no momento da seleção de acesso, para que seja reportado, naquele instante, o total de chamadas simultâneas naquela RAT. Vale notar, mais uma vez, que não há necessidade de um freqüente monitoramento das RATs por parte das entidades RRM, nem de atualização de medidas utilizadas no algoritmo. No entanto, conforme esclareceremos adiante, informações prévias sobre as RATs (no caso, suas capacidades), quando da implementação de uma rede multiacesso, correspondem a uma desvantagem prática deste algoritmo. Espera-se que o LBA proporcione ganhos importantes, por conta de as capacidades das RATs serem previamente conhecidas.

No caso do algoritmo proposto, a entidade CRRM precisa obter informações sobre o número de chamadas simultâneas e sobre a FER de cada terminal conectado. No contexto do SBA, as entidades RRM de cada RAT devem monitorar constantemente os terminais, posto que, a cada pacote tratado, a satisfação momentânea do correspondente usuário deve ser computada. Portanto, este algoritmo requer um maior grau de complexidade no monitoramento de medidas

quando comparado aos outros algoritmos. Apesar de ser mais complexo que o LBA, o SBA tem uma grande vantagem em relação àquele: o desconhecimento prévio de informações sobre as RATs. Isso o torna, em termos práticos, mais viável que o LBA.

Análise, Descrição e Avaliação dos Cenários

Neste capítulo, destacamos as considerações, as características e os resultados alcançados para os diferentes cenários multiacesso avaliados. Primeiramente, realizamos uma análise teórica sobre um problema particular de MA, cuja determinação da capacidade de usuários, por meio do nível de satisfação, configura-se em um problema de otimização. Em seguida, apresentamos os principais parâmetros de simulação e os parâmetros diretamente associados ao serviço de VoIP e às RATs, definindo, assim, nosso ambiente MA. Apresentamos também os cenários MA, caracterizados pela proporção de usuários *IN/OUT* e pela posição da microcélula na região de cobertura macrocelular. Os ganhos obtidos são apresentados para diferentes algoritmos de seleção de acesso em comparação com os cenários de referência que são desprovidos de integração das RATs, ou seja, correspondem a cenários sem MA. Por fim, descrevemos o comportamento dos algoritmos em função da carga de terminais conectados à rede.

5.1 Análise Teórica do Problema de Multiacesso

Conforme descrevemos no capítulo 3, a distribuição de usuários nas regiões *IN* e *OUT* é uniforme, garantindo que a densidade de usuários em cada uma destas regiões seja constante. Particularmente, vamos assumir, outrossim, que, na *RAT*₂, a densidade de usuários e ela conectados é constante em qualquer ponto da região *IN*. A mesma consideração é feita para a *RAT*₁, ou seja, a densidade de usuários conectados à *RAT*₁ nessa região também é considerada constante. Para a macrocélula, as diferentes regiões *IN* e *OUT* podem proporcionar diferentes densidades. Sejam

$N_{1(IN)}$ e $N_{1(OUT)}$ o número de chamadas simultâneas dos usuários conectados à RAT_1 nas regiões IN e OUT , respectivamente; e N_2 o número de chamadas simultâneas dos usuários conectados à RAT_2 . As densidades $D_{1(IN)}$, $D_{1(OUT)}$ e D_2 são calculadas a partir das seguintes expressões

$$D_{1(IN)} = \frac{N_{1(IN)}}{A_{IN}} \quad (5.1)$$

$$D_{1(OUT)} = \frac{N_{1(OUT)}}{A_{OUT}} \quad (5.2)$$

$$D_2 = \frac{N_2}{A_{IN}} \quad (5.3)$$

em que A_{IN} e A_{OUT} correspondem às áreas das regiões IN e OUT .

Seja ainda F o fator de densidade, definido como a razão entre $D_{1(IN)}$ e $D_{1(OUT)}$. Ou seja,

$$F = \frac{D_{1(IN)}}{D_{1(OUT)}} \quad (5.4)$$

Para uma quantidade $N_1 = N_{1(OUT)} + N_{1(IN)}$ de terminais conectados à RAT_1 , o fator F indica como está a disposição desses terminais na rede multiacesso. Quanto maior F , mais usuários da RAT_1 estarão localizados na região IN . Do contrário, teremos mais usuários dessa RAT na região OUT .

Um outro parâmetro de extrema importância é a proporção de usuários presentes nas regiões IN e OUT . Conforme aludimos na seção 4.6.3, na prática, é difícil mensurar a disposição de usuários numa dada região, pois tal parâmetro depende de diversos fatores (horário e dia da semana, por exemplo). No entanto, para fins ilustrativos de resultados que iremos obter, assumimos que a proporção instantânea IN/OUT p pode ser mensurada para cada cenário estudado. Assim,

$$p = \frac{N_{1(IN)} + N_2}{N_{1(OUT)}} \quad (5.5)$$

Através da manipulação das equações 5.1, 5.2, 5.3 e 5.5, podemos chegar a seguinte expressão para p

$$p = F \cdot \frac{r_2^2}{r_1^2 - r_2^2} + \frac{N_2}{N_1} \cdot \left(1 + F \cdot \frac{r_2^2}{r_1^2 - r_2^2}\right) \quad (5.6)$$

em que r_1 e r_2 representam os raios da macrocélula e da microcélula respectivamente.

Matematicamente, $N_{1(OVT)} = 0$ não faz parte do domínio das equações 5.4 e 5.5. No entanto, em termos práticos, esta condição corresponde ao caso em que todos os terminais da rede multiacesso se encontram na região de cobertura microcelular. Apesar de possível, tal situação é irreal, pois não faz sentido a existência de uma RAT macrocelular que cubra regiões onde nunca haja terminais conectados. Neste trabalho, não avaliaremos os algoritmos para cenários desse tipo; somente para o caso $N_{1(OVT)} > 0$.

Uma vez que $N_2 \geq 0$, para um dado p , podemos determinar o intervalo de variação de F que garanta a validade da equação 5.6.

A partir das equações 5.2 e 5.4, podemos inferir que $F \geq 0$, pois consideramos $N_{1(OVT)} > 0$. Ademais, como $N_1 > 0$, a razão $\frac{N_2}{N_1} \geq 0$. Portanto, aplicando esta última desigualdade na equação 5.6, chega-se a $F \leq p \cdot \left(\frac{r_1^2 - r_2^2}{r_2^2}\right)$. Logo,

$$0 \leq F \leq p \cdot \left(\frac{r_1^2 - r_2^2}{r_2^2}\right) \quad (5.7)$$

e, conseqüentemente,

$$p \geq \frac{N_2}{N_1} \geq 0 \quad (5.8)$$

A satisfação combinada S é determinada a partir do percentual de usuários satisfeitos considerando o agrupamento das tecnologias de acesso. Sejam as funções $g(F, N_1)$ e $h(N_2)$ o percentual de satisfação na RAT_1 e na RAT_2 para N_1 e N_2 chamadas simultâneas. Assim,

$$S = \frac{g(F, N_1)N_1 + h(N_2)N_2}{N_1 + N_2} \quad (5.9)$$

Como F é um fator característico da RAT_1 , $h(\cdot)$ não depende de F . Por outro lado, a função $g(\cdot)$ depende do fator de densidade, pois, conforme antecipamos na seção 4.6.3, a distribuição de usuários afeta a capacidade da RAT_1 . Logo, para um mesmo N_1 , as curvas de satisfação de g variam quando F varia. A capacidade de chamadas da rede combinada é determinado quando $S = P_{min}$ (vide seção 3.3).

A partir das equações 5.6 e 5.9, formulamos o seguinte problema particular de otimização:

$$\begin{aligned}
& \textit{maximizar} \quad N_1 + N_2 \\
& \quad \{N_1, N_2, F\} \\
& \textit{sujeito a} \\
& \quad \frac{N_2}{N_1} = \frac{p - F \cdot r}{1 + F \cdot r} \\
& \quad \frac{g(F, N_1)N_1 + h(N_2)N_2}{N_1 + N_2} \geq P_{min} \\
& \quad N_1 > 0 \\
& \quad N_2 \geq 0 \\
& \quad 0 \leq F \leq \frac{p}{r}
\end{aligned} \tag{5.10}$$

em que $p \geq 0$, $r = \frac{r_2^2}{r_1^2 - r_2^2}$ e $0 \leq P_{min} \leq 100$.

Definindo o parâmetro S apropriado, uma solução ótima do problema 5.10 - precisando verificar se ele é ou não côncavo - é aquela que maximiza $N_1 + N_2$, para $F \in [0, \frac{p}{r}]$. No entanto, a análise ou resolução do problema pode ser deveras complexa ou até impossível pela via analítica. No entanto, através da abordagem computacional, podemos nos aproximar de uma das soluções ótimas (ou da solução ótima). Uma alternativa, neste caso, seria determinar, por meio de simulação, a curva de satisfação $h(N_2)$ e as curvas de $g(F, N_1)$ para algumas amostras de F . Assim, para cada F , determinaríamos $N_1 + N_2$, de forma que a solução encontrada seria aquela cujo F maximizasse $N_1 + N_2$. Quanto mais amostras tivéssemos de F , mais próximos poderíamos estar do ótimo. A solução computacional encontrada serviria como um parâmetro de comparação que evidenciaria o quão distante as soluções, decorrentes dos algoritmos estariam dela. Apesar de ser um problema interessante, este trabalho não apresenta esta solução. Em termos práticos, o mais natural é que as tecnologias de acesso de uma rede MA a ser implementada sejam autoconfiguráveis, isto é, as funções $g(F, N_1)$ e $h(N_2)$ não precisam ser conhecidas *a priori*. Mesmo *a posteriori*, a determinação de tais funções de satisfação é deveras complexa.

É importante notar que nem todo algoritmo de seleção de acesso apresenta solução que satisfaça as equações 5.6 e 5.9. De fato, dependendo da política algorítmica, as densidades de usuários nas RATs podem perder a uniformidade na região IN . Se quiséssemos englobar qualquer categoria de algoritmo, deveríamos

considerar densidades em função das coordenadas dos usuários na região de cobertura da rede MA. Neste caso, o problema seria ainda mais complexo e sua apresentação está fora do escopo desta dissertação.

Para avaliarmos os algoritmos estudados, é necessário comparar o desempenho destes num dado cenário MA com aquele do cenário de referência (para cada cenário multissistêmico temos um cenário de referência associado). Este cenário corresponde ao caso combinado das RATs em que não há multiacesso, ou seja, não há integração e cooperação entre as RATs. A distribuição de usuários em cada RAT é uniforme pois as tecnologias de acesso são tratadas isoladamente (vide seção 4.6.3).

5.2 Parâmetros de Simulação

Os parâmetros de simulação correspondem às configurações básicas necessárias para a execução de uma simulação. Destacamos aqui, o instante inicial de salvamento de métricas, o período de salvamento e o número total de sessões finalizadas. O instante para início de salvamento é configurado de tal forma que o período de transiente, i.e., período em que o número de chamadas simultâneas no sistema converge, não seja computado. Este instante é configurado de maneira a garantir a passagem do transitório independente da taxa de chegada de novas chamadas. O período de salvamento deve ser escolhido de forma a garantir uma importante quantidade de amostras sem comprometer o desempenho da simulação. Outro parâmetro importante de simulação é o número total de sessões finalizadas; parâmetro este utilizado como critério de parada do simulador. Quanto maior o valor desse parâmetro, maior o número de amostras armazenadas e, conseqüentemente, maior precisão na apresentação dos resultados. Vale ressaltar que é necessário não uma única simulação para um dado cenário específico, mas algumas simulações, garantindo, assim, resultados mais confiáveis.

5.3 Parâmetros do Serviço de VoIP

Conforme apresentamos na Seção 3.1, quando abordamos o tráfego de VoIP, alguns parâmetros foram descritos, tais como a duração média da chamada de VoIP, os períodos de atividade e inatividade, a taxa de chegada de novas chamadas e a taxa de codificação do CODEC. Utilizamos, neste trabalho, valores típicos para tais parâmetros. O valor médio da duração da chamada em nosso simulador é de 90 s. Os períodos de atividade e inatividade são de 3 s cada [44].

Com base na taxa de chegada de novas chamadas, determinamos o número médio

de chamadas simultâneas \overline{N} através da expressão

$$\overline{N} = \frac{\text{tempo médio da chamada}}{\text{taxa de chegada de novas chamadas}} \quad (5.11)$$

O parâmetro \overline{N} está associado à carga de terminais na rede. Quanto maior \overline{N} , mais carregada estará a rede MA. Para a apresentação dos resultados, utilizamos uma faixa de cargas que varia desde cargas mais baixas (consideradas leves) até cargas mais elevadas (consideradas pesadas).

A taxa de codificação do AMR utilizada é de 12.2 *kbps* [21]. Um frame de voz de 244 *bits* é gerado a cada 20 *ms*.

O efeito das camadas da pilha de protocolos é considerado no simulador pela concatenação dos cabeçalhos RTP, UDP e IP ao frame de 244 *bits* gerado pelo CODEC. Conforme [21], temos 160 *bits* para o cabeçalho IP (no caso, IPv4), 64 *bits* para o UDP e 108 *bits* referentes ao protocolo RTP, sendo que destes, 96 *bits* referem-se ao cabeçalho e 12 *bits* são incorporados ao *payload* do pacote de voz. Assim, o pacote de VoIP, utilizado neste trabalho, contém fixos 576 *bits*.

O tempo máximo admissível da comunicação VoIP de um pacote com nível aceitável de QoS, considerado, nesta dissertação, no escopo das RATs, é de 100 *ms* [2].

5.4 Parâmetros das Redes de Acesso de Rádio

Apresentamos, a seguir, a configuração dos parâmetros relativos à cobertura e à adaptação de enlace. Os valores descritos na Tabela 5.1, utilizados no simulador, correspondem a valores típicos para macro e microcélulas [2, 8].

Procuramos nos inspirar em tecnologias já conhecidas, visando, assim, aproximar o sistema adotado ao máximo possível do estado de prática atual. A macrocélula, por exemplo, tem como mecanismo de transmissão o de rajadas, o qual é semelhante a um dos processos paralelos MAC-hs¹ do sistema HSDPA [3]. Ainda em consonância com este sistema, utilizamos um TTI de 2 *ms*, uma taxa de transmissão máxima de 4 *Mbps* e uma frequência de operação de 2 *GHz* [3]. No que diz respeito à microcélula, seu mecanismo de transmissão pouco se assemelha ao mecanismo DCF² de uma WLAN, uma vez que este último é baseado em acessos aleatórios [49]. O mecanismo utilizado para a RAT₂ é o simplificado, o qual permite a transmissão de um único pacote VoIP por TTI (vide seção 3.2.6). O TTI utilizado para a RAT₂ é

¹do inglês, *Medium Access Control - high speed*

²do inglês, *Distributed Coordination Function*

Tabela 5.1: Parâmetros de cobertura e de adaptação de enlace

Parâmetro	Valor
Microcélula	
<i>Potência de Transmissão do Ponto de Acesso</i>	<i>20 dBm</i>
<i>Potência do Ruído</i>	<i>-86 dBm</i>
<i>Margem contra Sombreamento</i>	<i>4 dBm</i>
<i>Desvio Padrão do Sombreamento</i>	<i>4 dB</i>
<i>Perda de Percurso Máxima</i>	<i>96.5 dB</i>
<i>Perda de Percurso Mínima</i>	<i>52.5 dB</i>
<i>SNR_{max}</i>	<i>53.5 dB</i>
<i>SNR_{req}</i>	<i>6 dB</i>
<i>SNR_{min}</i>	<i>5.5 dB</i>
<i>R_{max}</i>	<i>54 Mbps</i>
<i>R_{req}</i>	<i>576 kbps</i>
<i>R_{min}</i>	<i>0</i>
<i>Raio de Cobertura Estimado</i>	<i>100 m</i>

de 1 *ms*. Apesar da diferença entre o mecanismo simples e o mecanismo DCF de uma WLAN, procuramos aproximar alguns parâmetros da RAT_2 genérica ao padrão IEEE 802.11a WLAN, atribuindo o valor de 54 *Mbps* à taxa máxima de transmissão e 5 *GHz* para a frequência de operação [2].

A microcélula está posicionada dentro da região de cobertura macrocelular, a uma distância de 120 *m*. Esta posição refere-se a distância entre as antenas transmissoras da estação base e do ponto de acesso.

Com o intuito de determinar as capacidades das RATs em estudo, cabe-nos, neste ponto, configurar os parâmetros de QoS do sistema, aplicados a todos os cenários estudados. Conforme descrevemos na seção 5.3, o tempo máximo de transmissão de um pacote no escopo das RATs é de 100 *ms*. Além deste tempo, os pacotes são descartados e, portanto, considerados perdidos. Reportando-nos à seção 3.3, a taxa máxima de perda de pacotes FER_{max} define um usuário satisfeito. O valor considerado aqui é de 2 % [62]. A capacidade da rede MA é determinada considerando $P_{min} = 90$ %. Este valor corresponde à satisfação combinada S do problema de otimização 5.10.

A Figura 5.1 apresenta as funções $g(F, N_1)$, para alguns valores de F , e $h(N_2)$, determinadas por meio de simulação. Nota-se que à medida que F aumenta, as curvas de satisfação da RAT_1 se deslocam para a direita. Podemos inferir que a capacidade da RAT_2 é inferior àquela da RAT_1 para todo F . Tal afirmação nos parece razoável eis que, com o aumento do fator de densidade, mais usuários da RAT_1 estarão próximos a antena de sua estação base, melhorando, assim, a

qualidade do enlace. O conhecimento de $g(F, N_1)$ será útil quando investigarmos o comportamento das soluções dos algoritmos.

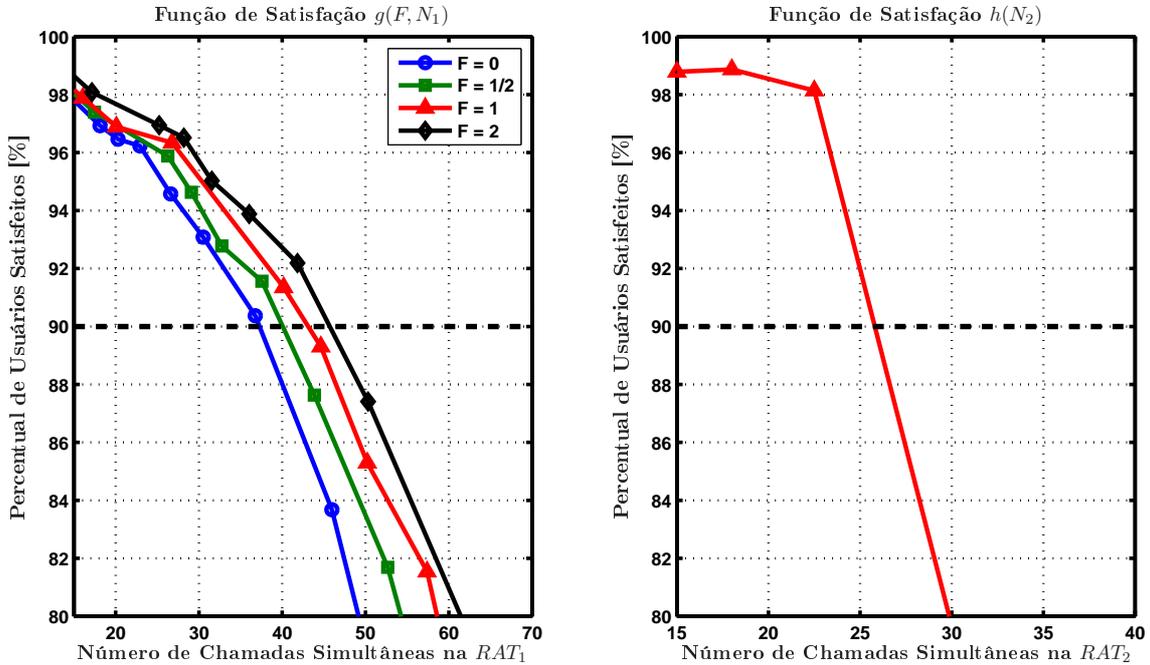


Figura 5.1: Função de satisfação das RATs.

Analisemos as RATs isoladamente. A partir de [63, 64], verificamos que uma WLAN tem capacidade inferior a uma rede HSDPA para o serviço de VoIP. Além disso, a RAT_2 sofre maior impacto no que concerne a queda do percentual de satisfação, à medida que o número de chamadas simultâneas aumenta, o que está em consonância com o *efeito avalanche* descrito por Pimentel em [2]. Assim, ambas as constatações evidenciam uma complementar similaridade entre o modelo adotado para a RAT_2 e uma WLAN. Nesta situação em que as RATs são tratadas isoladamente, os valores encontrados para 90 % de usuários VoIP satisfeitos na RAT_1 e na RAT_2 foram 43 e 26, respectivamente. Conforme aduzimos na seção 4.6.3, esses valores são parâmetros de normalização do algoritmo de seleção de acesso LBA.

5.5 Análise da Distribuição de Usuários para os Algoritmos

Conforme abordado na seção 5.1, a política de seleção de acesso de um dado algoritmo não garante uniformidade de usuários em cada RAT na região IN . Dessa maneira, é preciso analisar para todos os algoritmos estudados a distribuição dos usuários nessa região e verificar se essa condição de uniformidade é satisfeita.

Primeiramente, apresentamos o comportamento de uma distribuição uniforme numa região circular. Definimos esta região com um raio igual ao da microcélula, para fins de comparação futura com os algoritmos. Cada amostra nesta região tem um par de coordenadas cartesianas (x,y) associado, que varia no intervalo $[20\ 220]$ para a coordenada x e no intervalo $[-100\ 100]$ para a coordenada y . A Figura 5.2 mostra os histogramas de posições x e y para 10000 amostras.

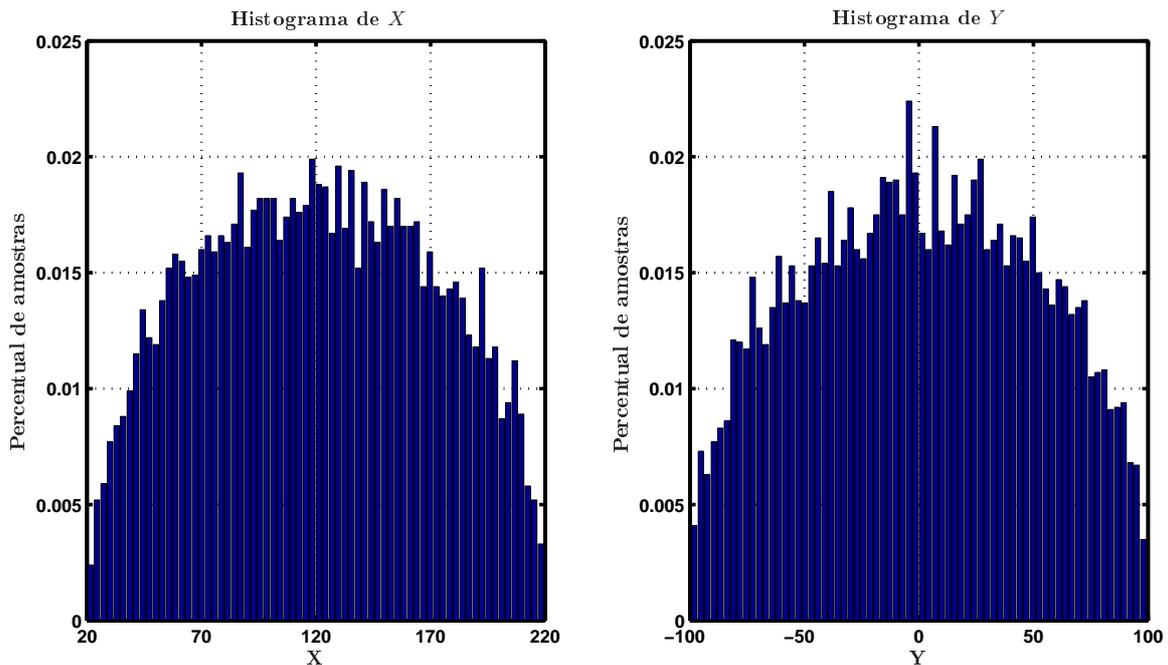


Figura 5.2: Distribuição uniforme numa região circular.

Sejam μ_x e σ_x^2 a média e a variância para o conjunto de coordenadas x das amostras; e μ_y e σ_y^2 a média e a variância para as coordenadas y . Os valores aproximados calculados para esse conjunto de 10000 amostras foram: $\mu_x \approx 120$, $\sigma_x^2 \approx 2500$, $\mu_y \approx 0$ e $\sigma_y^2 \approx 2500$.

No contexto desta dissertação, as amostras correspondem aos usuários e as coordenadas (x,y) suas respectivas posições dadas em metros. Assim, após a aplicação dos algoritmos, analisamos, para ambas as RATs, os histogramas de posição x e y dos usuários e determinamos as respectivas média e a variância. Dessa maneira, é possível inferir, mesmo que de forma aproximada, sobre a condição de uniformidade em cada RAT.

A Figura 5.3 apresenta os histogramas de posições x e y dos usuários da RAT_2 , após a aplicação do algoritmo CBA. Praticamente todos os terminais na região

IN conectaram-se à *RAT*₂, daí o motivo de não apresentarmos histogramas para a *RAT*₁. Os histogramas assemelham-se àqueles apresentados na Figura 5.2.

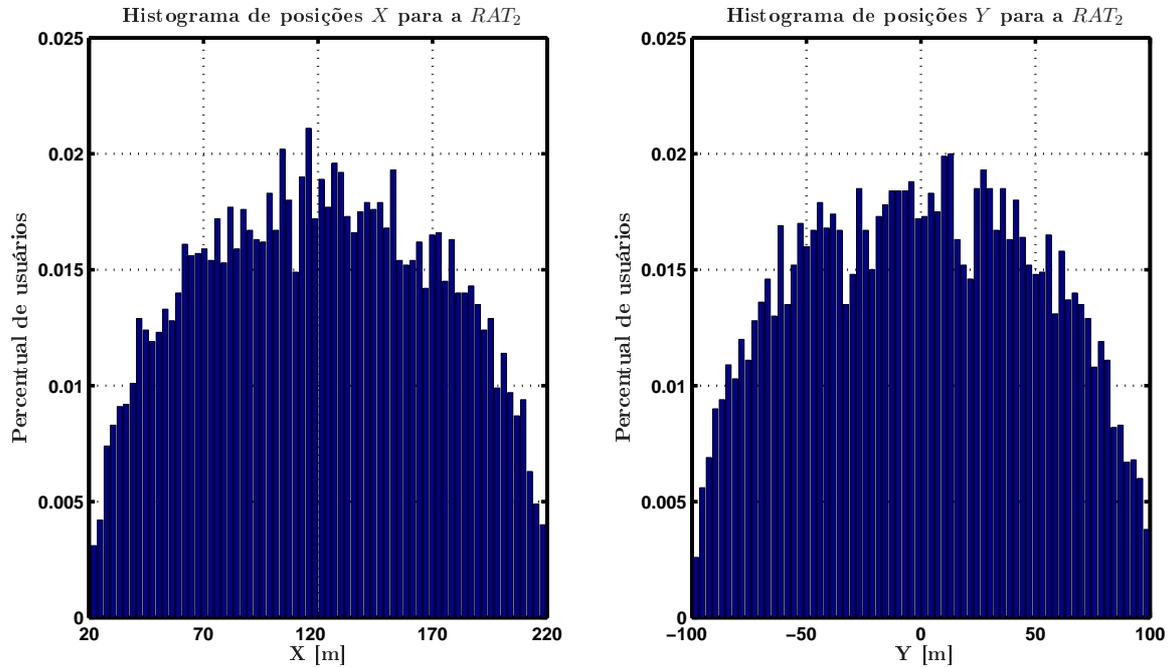


Figura 5.3: Distribuição de usuários para o CBA.

A Figura 5.4 apresenta os histogramas de posições x e y para o algoritmo RMA. Um comportamento similar ao uniforme foi verificado apenas para a *RAT*₂. No caso da *RAT*₁ é notável que a distribuição de usuários na região de cobertura microcelular não é uniforme.

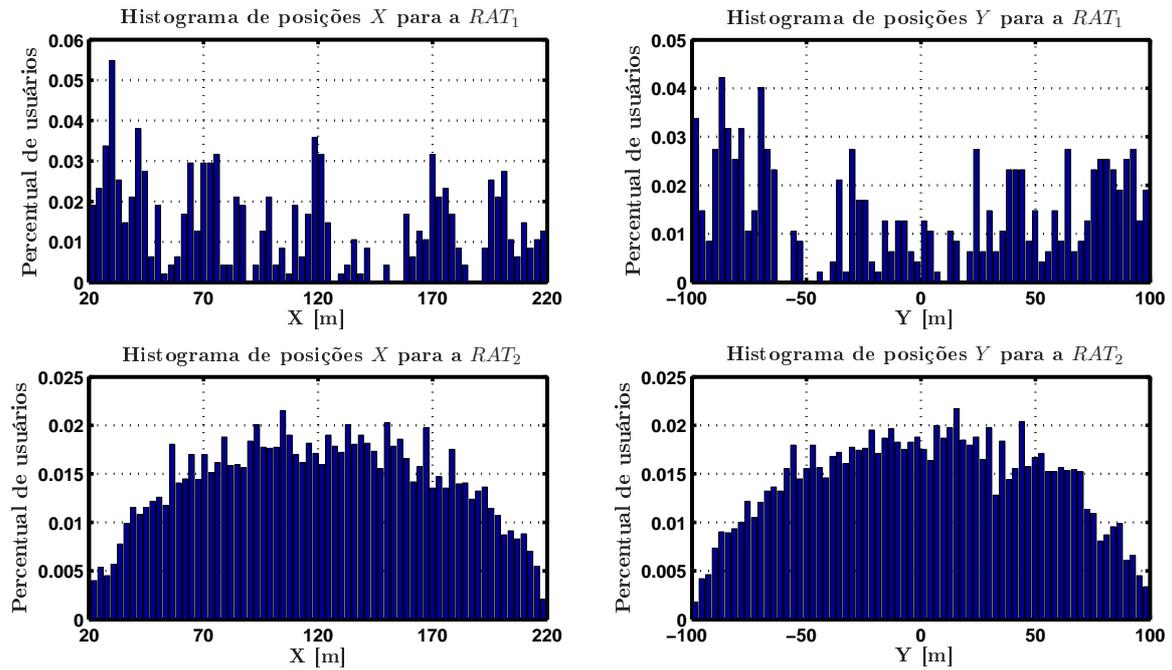


Figura 5.4: Distribuição de usuários para o RMA.

As Figuras 5.5 e 5.6 apresentam os histogramas de posições x e y para os algoritmos LBA e SBA. Para ambas as RATs temos uma distribuição de usuários ao longo de x e de y semelhante àquela uniforme.

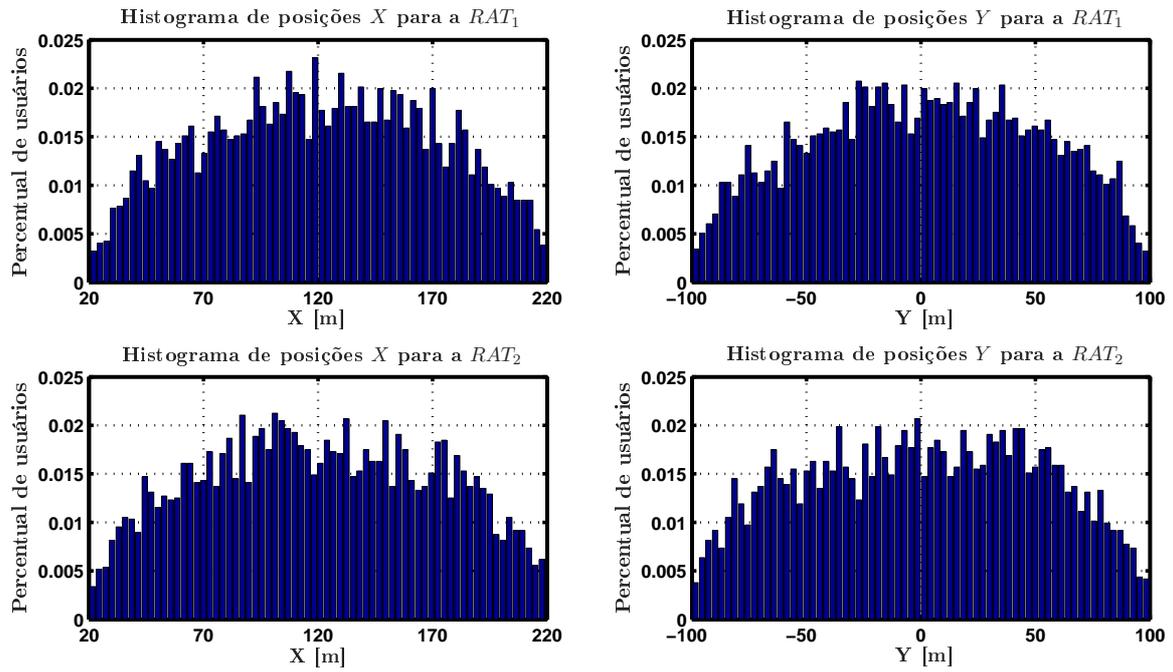


Figura 5.5: Distribuição de usuários para o LBA.

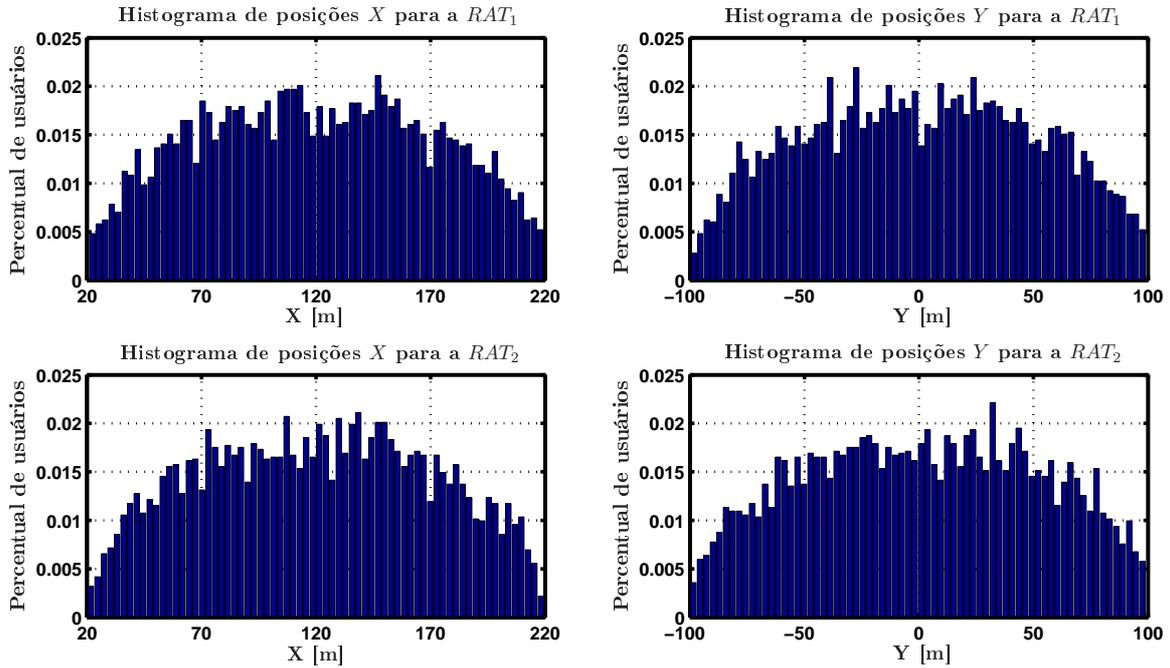


Figura 5.6: Distribuição de usuários para o SBA.

Vale ressaltar que apenas a análise dos histogramas não é suficiente para inferirmos que esta ou aquela distribuição pode ser considerada uniforme. Por isso, a média e a variância devem ser determinadas em cada caso e comparadas com os valores obtidos no caso uniforme. A Tabela 5.2 apresenta os valores encontrados após a aplicação dos algoritmos para uma amostra de 10000 usuários na região *IN*.

Tabela 5.2: Média e variância após a aplicação dos algoritmos.

Algorithm	<i>RAT</i> ₁				<i>RAT</i> ₂			
	μ_x	σ_x^2	μ_y	σ_y^2	μ_x	σ_x^2	μ_y	σ_y^2
<i>CBA</i>	-	-	-	-	120.35	2492	-0.24	2527
<i>RMA</i>	104.99	3832	-2.07	4473	120.25	2435	0.76	2398
<i>LBA</i>	121.42	2423	1.13	2443	120.23	2517	0.17	2581
<i>SBA</i>	120.05	2516	0.60	2481	120.02	2487	1.08	2568

Concluimos que a distribuição de usuários pode ser considerada uniforme em cada RAT quando a rede é submetida aos algoritmos CBA, LBA e SBA. De fato, os valores encontrados para a média e para a variância e os histogramas de posições foram próximos daqueles no caso uniforme. Já no caso do RMA, tanto os histogramas quanto a média e a variância apresentaram um comportamento diferente do uniforme para o caso da *RAT*₁. Logo, ao RMA não se aplica o tratamento teórico da seção

5.1, pois, naquela ocasião, consideramos as densidades $D_{1(IN)}$ e D_2 constantes.

Para complementar as conclusões sobre a disposição de usuários na região IN , a Figura 5.7 apresenta as posições dos usuários após a aplicação dos algoritmos. Os pontos em azul representam os usuários da RAT_1 , enquanto os pontos em vermelho, os usuários da RAT_2 .

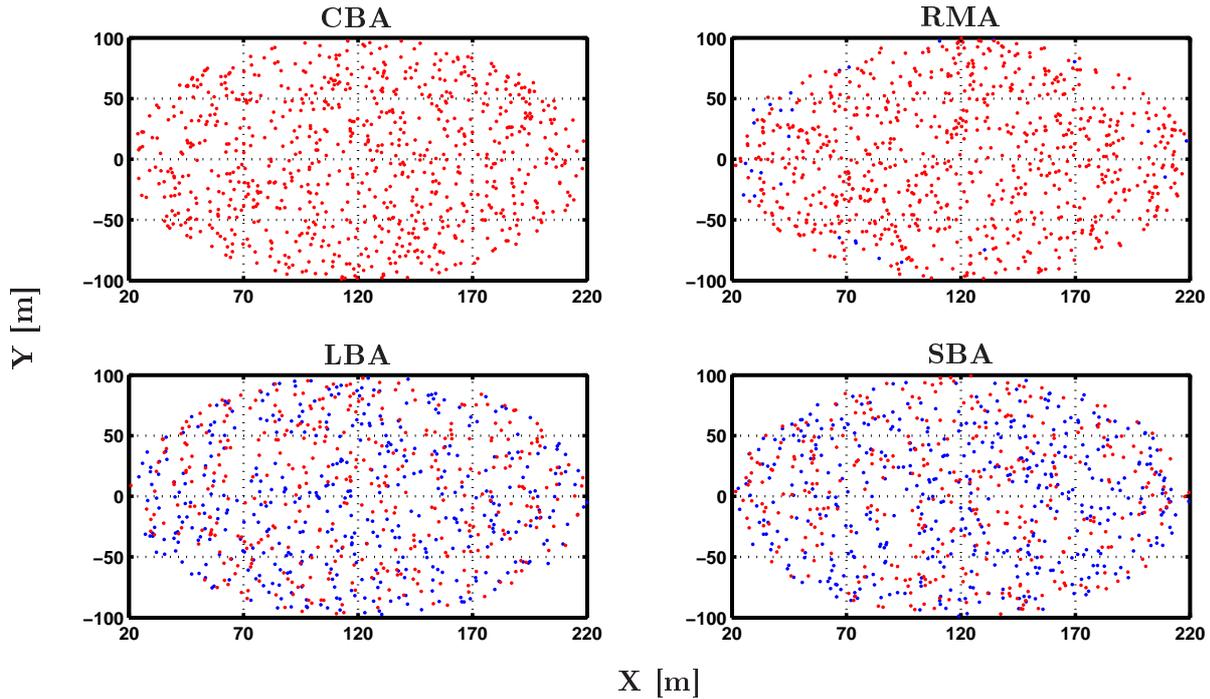


Figura 5.7: Distribuição de usuários na região IN .

Cabe-nos fazer um comentário adicional sobre os algoritmos. No caso do RMA, os usuários da RAT_1 se concentraram próximos à borda da microcélula e, em maior escala, próximos a antena da estação base da RAT_1 . De fato, como este algoritmo baseia-se na taxa mapeada do terminal e esta depende da posição do usuário, o RMA tende a não-uniformizar a distribuição de usuários em cada RAT na região IN . No caso dos outros algoritmos, os critérios para seleção de acesso não têm relação com a posição do terminal, isso explica o caráter uniforme apresentado por eles em ambas as RATs (no caso do CBA, considera-se unicamente a RAT_2).

A análise da distribuição dos usuários em cada RAT é importante para identificarmos algoritmos que satisfaçam as equações 5.6 e 5.9. Dessa maneira, a solução de capacidade multissistêmica apresentada por estes algoritmos podem ser comparadas com a solução ótima do problema 5.10.

5.6 Avaliação dos Cenários

Neste trabalho, avaliamos dois cenários específicos, denominados A1 e A2, que correspondem, respectivamente, às proporções $p = 1/2$ e $p = 1/1$. Optamos por não avaliar cenários cujas proporções são superiores a $1/1$ por não nos parecer razoável, uma vez que, nesses casos, a concentração de usuários seria extremamente alta numa área microcelular bastante restrita.

A Figura 5.8 mostra as curvas de satisfação para o cenário A1. Observa-se que praticamente não há ganhos em relação ao cenário de referência. Além disso, os algoritmos apresentam curvas de satisfação combinada semelhantes.

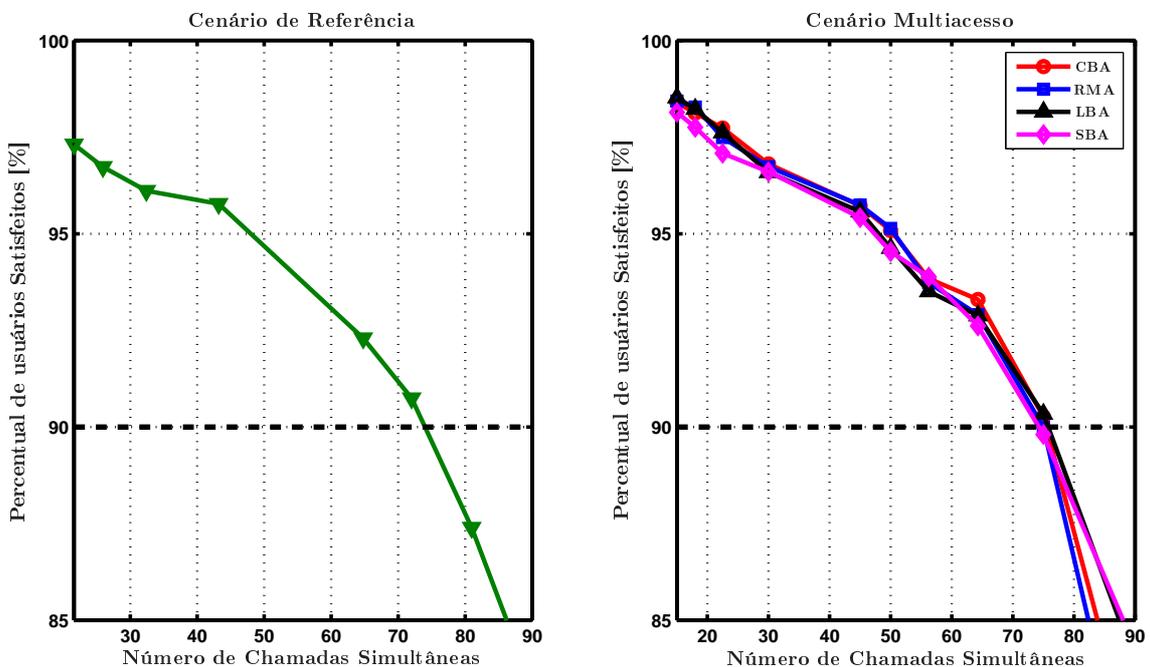


Figura 5.8: Avaliação do Cenário A1 em que $p = 1/2$.

Todos os algoritmos proporcionaram um valor de aproximadamente 75 chamadas simultâneas para a capacidade da rede, o que corresponde, praticamente, à capacidade limite no cenário de referência. Assim, numa situação em que $p = 1/2$, os algoritmos não trazem soluções atraentes em relação ao cenário sem MA. Vale ressaltar que a ausência de ganhos por parte dos algoritmos CBA, LBA e SBA não implica que as soluções por eles encontradas estejam distante do ponto ótimo do problema 5.10. É possível que para essa proporção não haja condições suficientes para concepção de algoritmos mais eficientes, uma vez que a própria solução combinada do cenário de referência pode estar muito próxima da solução ótima.

A Figura 5.9 apresenta as curvas de satisfação para o cenário A2. Nota-se que os algoritmos LBA e SBA apresentaram ganhos consideráveis em relação ao cenário de referência, enquanto que o CBA não apresentou ganhos e o RMA pouco contribuiu para um melhor desempenho do ambiente multissistêmico.

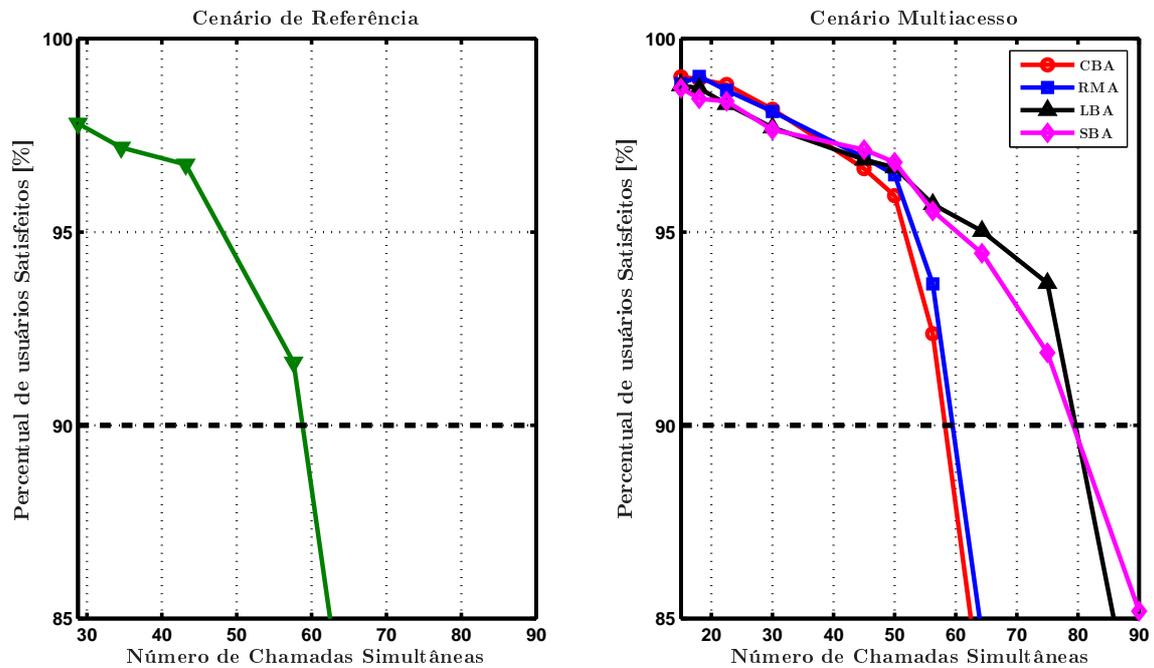


Figura 5.9: Avaliação do Cenário A2 em que $p = 1/1$.

Para o cenário de referência encontramos uma capacidade aproximada de 58 chamadas simultâneas. Os algoritmos CBA, RMA, LBA e SBA apresentaram, respectivamente, capacidades aproximadas de 58, 59, 79 e 79 chamadas simultâneas.

Os gráficos da Figura 5.10 mostram os ganhos de capacidade e de satisfação obtidos para os algoritmos no cenário A2.

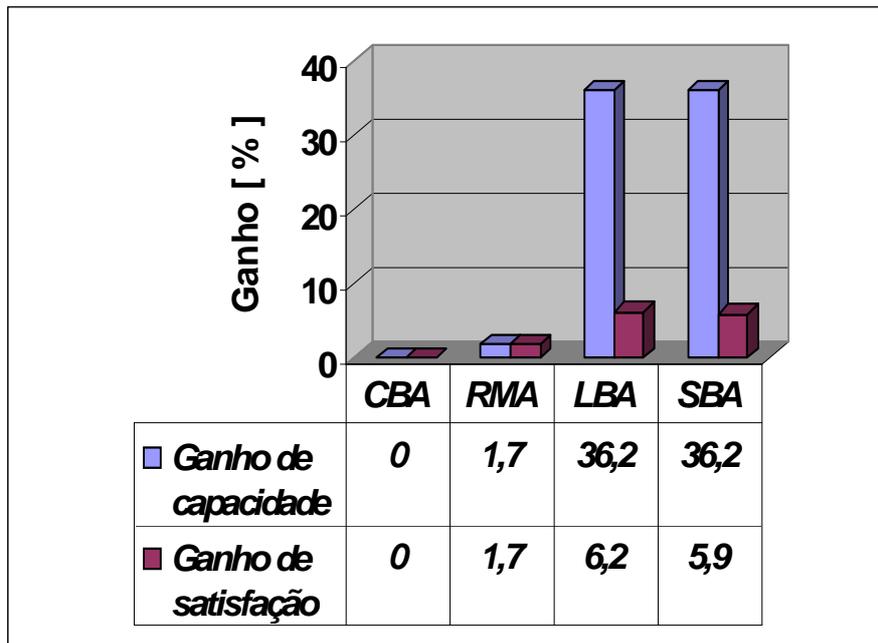


Figura 5.10: Avaliação do Cenário A2 em que $p = 1/1$.

Considerando o problema 5.10, para uma proporção $p = 1/1$, podemos inferir que o algoritmo CBA apresentou uma solução de capacidade distante da solução ótima, uma vez que outros algoritmos proporcionaram soluções mais eficientes. Apesar de os ganhos obtidos pelos algoritmos LBA e SBA serem semelhantes, este último apresenta vantagens práticas de implementação, pois o LBA necessita do conhecimento prévio das capacidades das redes (vide seção 4.6.3). No entanto, o SBA requer um monitoramento mais complexo e constante de medidas, porém completamente realizável.

O resultado apresentado pelo RMA mostra que o desempenho deste algoritmo está atrelado ao serviço utilizado. Conforme mencionamos, alguns trabalhos sobre o serviço WWW [7, 8, 61] evidenciaram ganhos importantes para o RMA. Neste trabalho, verifica-se, entretanto, que o serviço de VoIP contribui para o baixo desempenho deste algoritmo. As taxas mapeadas para os terminais na RAT_2 são, em geral, mais elevadas que aquelas na RAT_1 , de forma que o algoritmo, na maioria das vezes, optará por aquela RAT. No entanto, o mecanismo de transmissão da RAT_2 é mais crítico (apenas um pacote por TTI), de maneira que é indiferente a transmissão do pacote de VoIP a 576 kbps ou a 54 Mbps. Assim, o RMA tende a sobrecarregar mais a RAT_2 e subutilizar a RAT_1 que proporcionaria maior transmissão de pacotes.

A análise do fator de densidade F em função do número de chamadas simultâneas

no sistema configura-se numa maneira elegante de apresentação do funcionamento dos algoritmos e traz informações complementares às das curvas de satisfação. A Figura 5.11 ilustra o comportamento funcional dos algoritmos CBA, LBA e SBA para os cenários A1 e A2.

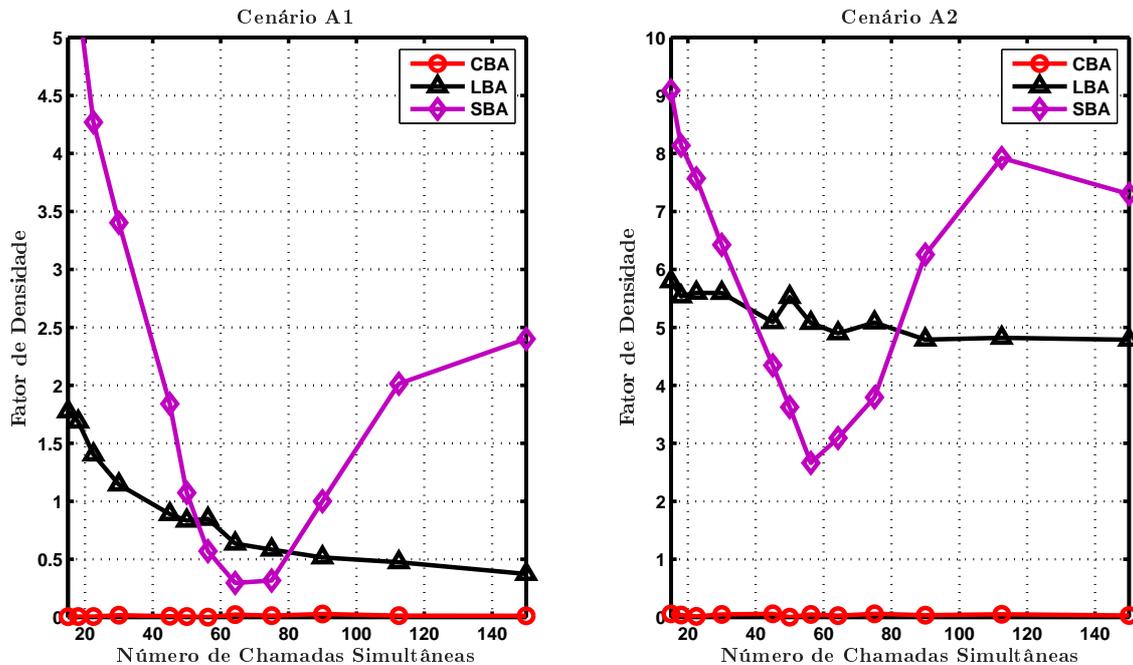


Figura 5.11: Avaliação funcional dos algoritmos CBA, LBA e SBA.

O CBA apresentou, em ambos os cenários, um fator de densidade praticamente nulo para qualquer carga de usuários no sistema, pois os poucos usuários da RAT_1 que surgiram na região IN foram aqueles com baixa SNR por conta do desvanecimento de larga escala.

Os fatores de densidade F dos algoritmos LBA e SBA variam com a carga do sistema. Neste trabalho, definimos este fenômeno como *polarização algorítmica*. De fato, esses algoritmos, em determinadas condições, tendem a selecionar com maior frequência uma RAT. O algoritmo LBA, por exemplo, tem como parâmetro de normalização as capacidades das RATs. Como tais capacidades são discrepantes, o balanceamento da equação 4.8 só ocorrerá quando a seleção de acesso se polarizar com maior intensidade numa RAT. Com base nos cenários da Figura 5.11, verificamos que o aumento do número de chamadas simultâneas implica na diminuição e estabilização do fator de densidade. De fato, quanto maior o número de chamadas no sistema, maiores serão as razões $\frac{N_1}{C_1}$ e $\frac{N_2}{C_2}$ e menos sensíveis elas serão

à seleção de uma mesma RAT aos terminais, implicando, assim, numa diminuição da polarização.

No caso do SBA, a variação é bem mais acentuada. Para entendermos o comportamento de F , é preciso analisar o nível de perda de pacotes em cada RAT. Num primeiro momento, verifica-se, por simulação, que o percentual de usuários satisfeitos é maior na RAT_2 . Com o aumento do número de chamadas, este percentual tende a diminuir, se aproximando do percentual $\frac{V_1}{N_1}$, o qual é menos sensível à perda de pacotes (a inclinação das curvas $g(F, N_1)$ e $h(N_2)$ na Figura 5.1 nos traz informação sobre essa sensibilidade). Isso explica a diminuição de F e a conseqüente preferência do algoritmo pela RAT_2 para cargas mais leves. Num segundo momento, quando $\frac{V_1}{N_1}$ ultrapassa $\frac{V_2}{N_2}$, o processo se inverte e a preferência de acesso recai sobre a RAT_1 , até o ponto em que $\frac{V_1}{N_1}$ volta a ser superado por $\frac{V_2}{N_2}$. O processo de funcionamento do SBA é cíclico e tende a se estabilizar para cargas bem elevadas.

Para o algoritmo RMA, o comportamento funcional do algoritmo não pode ser analisado a partir do fator de densidade F . No entanto, a razão entre o número de chamadas simultâneas nas RATs $\frac{N_2}{N_1}$ em função do total de chamadas nos permite realizar tal avaliação funcional. A Figura 5.12 apresenta o comportamento funcional do algoritmo RMA.

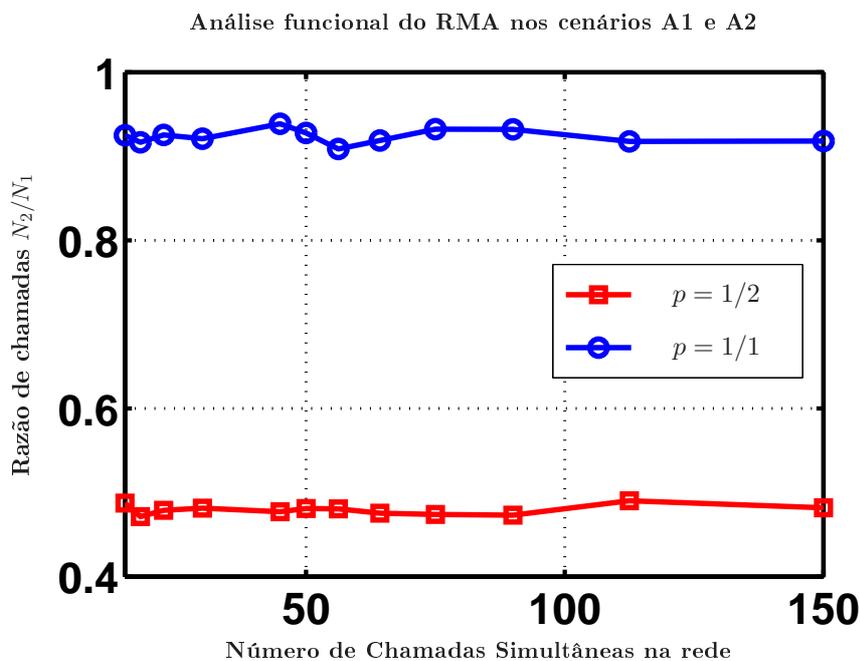


Figura 5.12: Avaliação funcional do algoritmo RMA.

O RMA apresentou um comportamento praticamente constante para diferentes cargas em ambos os cenários. Isso significa que à medida que o número de chamadas simultâneas na RAT_1 aumenta, o total de chamadas simultâneas na RAT_2 também aumenta na mesma proporção. Tal afirmação nos parece razoável pelo fato de o RMA ser unicamente orientado à taxa mapeada do terminal, não levando em consideração outras condições como as de rede. Nota-se também que para o cenário A2 ($p = 1/1$) a razão $\frac{N_2}{N_1}$ foi superior àquela do cenário A1 ($p = 1/2$), o que é completamente coerente, já que uma maior proporção IN/OUT p implica em mais chamadas na RAT_2 para este algoritmo.

A razão $\frac{N_2}{N_1}$ também poderia ser utilizada para análise dos outros algoritmos. No entanto, optamos pelo fator de densidade F porque desejamos investigar o comportamento das soluções daqueles algoritmos em função da distribuição dos usuários. Analisando as curvas de satisfação e dos fatores de densidade para os algoritmos LBA e SBA, podemos notar que, para o percentual de satisfação estabelecido ($S = 90$), F é maior no cenário A2 do que no cenário A1. Curiosamente, os maiores ganhos de capacidade obtidos em relação ao cenário de referência surgiram justamente no cenário A2 para esses dois algoritmos. Somando-se a isso, temos ainda que a capacidade da RAT_1 aumenta com o fator de densidade, pois $g(F, N_1) \leq g(F + \Delta F, N_1)$ para todo $N_1 > 0$ e $\Delta F \geq 0$, conforme ilustrado na Figura 5.1. Assim, poderíamos imaginar que a solução ótima poderia ser alcançada para valores de F elevados. No entanto, tal dedução é especulativa, uma vez que é baseado em cenários específicos. É necessário um estudo mais abrangente e aprofundado do problema de otimização 5.10 que traga informações consistentes sobre a solução ótima.

Capítulo 6

Conclusões e Perspectivas

Nesta dissertação de mestrado foi possível avaliar o desempenho de algoritmos de seleção de acesso a partir de uma ferramenta de simulação dinâmica multissistêmica. De maneira geral, algoritmos mais eficientes ainda precisam ser desenvolvidos, com o intuito de otimizar os recursos disponíveis no sistema.

Apresentamos, a seguir, as principais conclusões do trabalho, bem como as perspectivas futuras possíveis.

6.1 Conclusões

Destacam-se as seguintes conclusões deste trabalho:

- ▶ A formulação matemática do problema de capacidade em redes multiacesso é bastante complexa ou até mesmo impossível, se desconsiderarmos uniformidade de usuários para cada RAT dentro da região IN ;
- ▶ No caso em que as densidades $D_{1(IN)}$ e D_2 são constantes, podemos, analiticamente, formular um problema que pode admitir solução ótima. No entanto, ao restringir nosso campo de atuação, estaremos desconsiderando casos em que a capacidade pode ser superior àquela maximizada pelo referido problema;
- ▶ Os algoritmos estudados, com exceção o RMA, satisfazem às equações que compõem o problema 5.10, por garantir uniformidade dos usuários para cada RAT na região de seleção de acesso;
- ▶ O algoritmo RMA, no entanto, proporcionou uma concentração de usuários na borda da microcélula e, em maior escala, próxima à antena da estação base.

Dessa maneira, concluímos que o RMA se enquadra no grupo de algoritmos que podem admitir capacidade multissistêmica superior àquela maximizada pelo problema 5.10;

- ▶ Os ganhos obtidos de satisfação e de capacidade dependem do cenário escolhido. Para o caso em que a proporção IN/OUT foi $1/2$, não houve ganhos significativos. Por outro lado, para $p = 1/1$, alguns algoritmos proporcionaram ganhos em relação ao cenário de referência;
- ▶ Para o caso em que a distribuição de usuários na região IN é uniforme em ambas as RATs, é possível conceber algoritmos eficientes desde que o cenário definido proporcione margem para tal realização. A solução ótima do problema 5.10 para um dado cenário indica o limite máximo em que um algoritmo a ser concebido pode admitir ganho de capacidade;
- ▶ O desempenho dos algoritmos no cenário A2 ($p = 1/1$) se comportou conforme esperado. De fato, o CBA e o RMA sobrecarregaram a RAT_2 enquanto a RAT_1 permaneceu subutilizada. Por isso, eles apresentaram pior desempenho. Por outro lado, os algoritmos LBA e SBA admitiram ganhos consideráveis em relação ao cenário referenciado;
- ▶ Apesar de o algoritmo SBA requerer maior complexidade no que concerne ao monitoramento das RATs, ele apresenta uma vantagem prática em relação ao LBA: a política do SBA adequa-se a RATs autoconfiguráveis;
- ▶ A estimação de $g(F, N_1)$ e $h(N_2)$ poderia fornecer informações importantes para concepção de algoritmos cuja capacidade de multiacesso fosse próxima da solução ótima do problema 5.10. De fato, os algoritmos estudados que apresentaram os maiores fatores de densidade F , proporcionaram maiores ganhos de capacidade na rede. Esta última implicação nos fornece, portanto, informações adicionais para concepção de um algoritmo otimizado. No entanto, conforme já comentamos, é difícil determinar as funções de satisfação $g(F, N_1)$ e $h(N_2)$.

Como conclusão geral, a utilização de redes multiacesso proporciona maiores benefícios em comparação com as redes não cooperativas atualmente existentes. De fato, em cenários onde há uma alta concentração de usuários, é possível conceber soluções algorítmicas que viabilizem a utilização otimizada dos recursos disponíveis

pelas tecnologias de acesso existentes. Ademais, a implementação de uma rede multissistêmica requer baixo custo, uma vez que toda infra-estrutura das RATs é aproveitada.

6.2 Perspectivas

Quanto às perspectivas futuras deste trabalho, apresentamos as seguintes:

- ▶ Avaliação dos algoritmos no caso da microcélula estar posicionada em outra região. Por exemplo, distante da estação base. Neste caso, uma primeira prospecção sobre o RMA, por exemplo, seria uma maior aproximação de seu desempenho àquele do CBA, uma vez que a taxa mapeada na camada física na RAT_1 é menor à medida que a distância para a antena da base aumenta;
- ▶ Investigação mais aprofundada do comportamento da capacidade da rede multiacesso em função do fator de densidade F , de forma que seja possível desenvolver algoritmos mais eficientes;
- ▶ Inclusão de outros perfis de mobilidade que não o estático. Dessa maneira, torna-se necessário, outrossim, implementar o procedimento de VHO para que haja garantia de uma melhor utilização dos recursos disponíveis;
- ▶ Adição de outros serviços à rede. A inclusão de novos serviços abre um leque de possibilidades de pesquisas: novas estratégias de escalonamento, implementação do procedimento de controle de fluxo, etc;
- ▶ Consideração de interferência. Assim, será possível verificar seu impacto nos algoritmos implementados;
- ▶ Formulação matemática mais abrangente do problema de capacidade. Deve-se considerar os algoritmos que não-uniformizam as densidades das RATs dentro da região IN .

Referências Bibliográficas

- [1] P. Mehta e S. Udani, “Voice over IP,” *IEEE Potentials*, vol. 20, no. 4, pp. 36–40, Novembro 2001.
- [2] J. F. Pimentel, “Novos Algoritmos para Controle de Admissão de Chamadas para o Serviço de Voz sobre IP em Redes Locais Sem Fio Infra-Estruturadas,” Master’s thesis, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, Junho 2006.
- [3] B. Wang, K. I. Pedersen, T. E. Kolding, e P. E. Mogensen, “Performance of VoIP on HSDPA,” *IEEE Vehicular Technology Conference*, Junho 2005.
- [4] S. Garg e M. Kappes, “Admission Control for VoIP Traffic in IEEE 802.11 Networks,” *IEEE Global Telecommunications Conference*, vol. 6, pp. 3514–3518, Dezembro 2003.
- [5] A. Furuskär, “Radio Resource Sharing and Bearer Service Allocation for Multi-Bearer Service, MA Wireless Networks - Methods to Improve Capacity,” Ph.D. dissertation, Ph.D. dissertation, Royal Institute of Technology - KTH, 2003.
- [6] H. Liu, H. Bhaskaran, D. Raychaudhuri, e S. Verma, “Capacity analysis of a cellular data system with 3g/wlan interworking,” *58th IEEE Vehicular Technology Conference - VTC Fall*, 2003.
- [7] O. Yilmaz, “Access Selection in Multi-Access Cellular and WLAN networks,” Master’s thesis, Master’s Thesis - Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, Fevereiro 2005.

- [8] L. Sampaio, “Performance Assessment of a Multi-Access Networks Composed by 3G Cellular and Wireless LAN,” Master’s thesis, Federal University of Ceará, Fortaleza, Brazil, Abril 2006.
- [9] D. Mariz, I. Cananéa, D. Sadok, e G. Fodor, “Simulative Analysis of Access Selection Algorithms for Multi-Access Networks,” *International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, Junho 2006.
- [10] J. Csirik e D. S. Johnson, “Bounded Space On-line Bin Packeting: Best is better than first,” *ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, pp. 309–319, 1991.
- [11] M. R. Kibria e A. Jamalipour, “On Designing Issues of the Next Generation Mobile Network,” *IEEE Network*, vol. 21, pp. 6–13, Fevereiro 2007.
- [12] C. Kappler, P. Poyhonen, M. Johnsson, e S. Schmid, “Dynamic Network Composition for Beyond 3G Networks: A 3GPP Viewpoint,” *IEEE Network*, vol. 21, pp. 47–52, Fevereiro 2007.
- [13] F. Bari e V. C. M. Leung, “Automated Network Selection in a Heterogeneous Wireless Network Environment,” *IEEE Network*, vol. 21, pp. 34–40, Fevereiro 2007.
- [14] W. Song, W. Zhuang, e Y. Cheng, “Load Balancing for Cellular/WLAN Integrated Networks,” *IEEE Network*, vol. 21, pp. 27–33, Fevereiro 2007.
- [15] US Phone Brasil, “Uma breve história,” <http://www.usphone.us>, 2007.
- [16] Which VoIP, “The Hystory of VoIP,” <http://www.whichvoip.com>, Março 2006.
- [17] Frank Ohrtman, *VoIP over 802.11*. Artech House, 2004.
- [18] D. Fortes, “VoIP: A Primeira Revolução do Século 21,” *Revista INFO*, no. 228, Março 2005.
- [19] M. Obando, “Comparação do Desempenho dos Codificadores de Voz G.711, G.729, G.723.1 e iLBC em Transmissão com Perda de Pacotes,” Master’s thesis, Universidade de Brasília - UnB, Brasília, Brasil, Dezembro 2005.
- [20] A. S. Tanenbaum, *Computer Networks*, 4th ed. Prentice Hall PTR, Agosto 2002.

- [21] 3GPP, “Packet Switched Conversational Multimedia Applications: Transport Protocols,” 3rd Generation Partnership Project, Tech. Rep. TS 26.236 v7.1.0 - Release 7, Outubro 2006. [Online]. Available: <http://www.3gpp.org>
- [22] K. D. Wong, *Wireless Internet Telecommunications*, ser. Mobile Communications Series. Artech House, 2005.
- [23] H. Zheng, G. Rittenhouse, e M. Recchione, “The Performance of Voice over IP over 3G Downlink Shared Packet Channels under Different Delay Budgets,” *IEEE Global Telecommunications Conference -GLOBECOM*, pp. 2501–2505, Outubro 2003.
- [24] D. Niculescu, S. Ganguly, K. Kim, e R. Izmailov, “Performance of VoIP in a 802.11 Wireless Mesh Network,” *INFOCOM 2006 - 25th IEEE International Conference on Computer Communications. Proceedings*, pp. 1–11, Abril 2006.
- [25] T. S. Rappaport, *Wireless Communications: Principles and Practice*, 2nd ed., ser. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series. Prentice Hall PTR, 2002.
- [26] H. Holma e A. Toskala, *WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communication*, 3rd ed. John Wiley and Sons, Ltd, 2004.
- [27] 3GPP, “Feasibility Study on 3GPP System to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking,” 3rd Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, Tech. Rep. TR 22.934 v6.2.0 - Release 6, Setembro 2003.
- [28] —, “Requirements on 3GPP System to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking,” 3rd Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, Tech. Rep. TS 22.234 v7.3.0 - Release 7, Dezembro 2005.
- [29] —, “3GPP System to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking; System Description,” 3rd Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, Tech. Rep. TS 23.234, Dezembro 2005.
- [30] —, “3GPP System to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking Functional and Architectural Definition,” 3rd Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, Tech. Rep. TR 23.934, Agosto 2002.

- [31] —, “Feasibility Study on Location Services (LCS) for Wireless Local Area Networks (WLAN) Interworking,” 3rd Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, Tech. Rep. TR 22.935 v7.0.0 - Release 7, Setembro 2005.
- [32] —, “LCS Architecture for 3GPP Interworking WLAN,” 3rd Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, Tech. Rep. TR 23.837 v0.1.0 - Release 7, Janeiro 2006.
- [33] —, “Quality of Service (QoS) and Policy Aspects of 3GPP - Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking,” 3rd Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, Tech. Rep. TR 23.836 v1.0.0 - Release 7, Setembro 2005.
- [34] —, “3GPP System to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking User Equipment (UE) to Network Protocols,” 3rd Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, Tech. Rep. TS 24.234, Dezembro 2005.
- [35] C. Bader, V. Friderikos, I. Ganchev, A. S. Jahan, G. Morabito, R. Narcisi, M. O’Droma, S. Paskalis, e N. Passas, “Definition of the Always Best Connected Concepts,” ANWIRE IST-2001-38835, Tech. Rep., Tech. Rep., Fevereiro 2003.
- [36] S. A. et al, “Top-level Architecture for Providing Seamless QoS, Security, Accounting and Mobility to Applications and Services,” MIND IST-2000-28584, Tech. Rep., Tech. Rep., Novembro 2002.
- [37] P. K. et al, “Target Scenarios Specification: Vision at Project Stage 1,” EVEREST IST-2002-001858, Tech. Rep., Tech. Rep., Abril 2004.
- [38] E. S. de la Fuente et al, “UMTS, MBS and DBS Network and Service Management System Architecture: Technical Requirements and Functionality Description,” MONASIDRE IST-2000-26144, Tech. Rep., Tech. Rep., Junho 2001.
- [39] N. Niebert, H. Flinck, R. Hancock, H. Karl, e C. Prehofer, “Ambient Networks - Research for Communication Networks Beyond 3G,” 13th IST Mobile and Wireless Communications Summit, Tech. Rep., Junho 2004.
- [40] A. K. Salkintzis, “Radio Resource Management in Cellular Digital Packet Data Networks,” *IEEE Personal Communications*, Dezembro 1999.

- [41] J. Zander, S.-L. Kim, M. Almgren, e O. Queseth, *Radio Resource Management for Wireless Networks*. ser. Mobile Communications Series - Artech House Publishers, 2001.
- [42] D. Gavalas, D. Greenwood, M. Ghanbari, e M. O'Mahony, "A hybrid Centralised-distributed Network Management Architecture," *IEEE International Symposium on Computers and Communications*, pp. 434–441, Junho 1999.
- [43] 3GPP, "UTRAN Overall Description," 3rd Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, Tech. Rep. TS 25.401 v7.4.0 Release 7, Junho 2007.
- [44] UMTS, "Selection Procedures for the Choice of Radio Transmission Technologies of the UMTS," ETSI, UMTS TR 101.112 v.3.2.0, Tech. Rep., Abril 1998.
- [45] S. Casner e V. Jacobson, "Bandwidth Efficient AMR Operation for VoIP," *IEEE Workshop Proceedings - Speech Coding*, pp. 150–152, Outubro 2002.
- [46] ITU-T, "One-way Transmission Time," ITU-T G.114, Tech. Rep., Tech. Rep., Setembro 2003.
- [47] T. J. Kostas, M. S. Borella, I. Sidhu, G. M. Schuster, J. Grabiec, e J. Mahler, "Real-time Voice over Packet-Switched Networks," *IEEE Network*, vol. 12, pp. 18–27, Janeiro 1998.
- [48] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Sköld, e P. Beming, *3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband*, 1st ed. Elsevier, 2007.
- [49] B. Bing, *Wireless Local Area Networks - The New Wireless Revolution*. John Wiley and Sons, Inc., 2002.
- [50] J. P. Castro, *The UMTS Network and Radio Access Technology*. John Wiley and Sons, Ltd, 2001.
- [51] European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research EURO-COST 231, "Urban Transmission Loss Models for Mobile Radio in the 900 and 1800 MHz Bands," Revision 2, The Hague, Tech. Rep., Setembro 1991.

- [52] H. Shimizu, H. Masui, M. Ishii, e K. Sakawa, "LOS and NLOS Path-loss and Delay Characteristics at 3.35 GHz in a Residential Environment," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 2, pp. 1142–1145, Junho 2000.
- [53] P. Cardieri, "Resource Allocation and Adaptive Antennas in Cellular Communications," Ph.D. dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, USA, September 2000.
- [54] V. A. de Sousa Jr., R. A. de O. Neto, F. de S. Chaves, L. S. Cardoso, J. F. Pimentel, e F. R. P. Cavalcanti, "Performance of Access Selection Strategies in Cooperative Wireless Networks Using Genetic Algorithms," *WWRP*, 2005.
- [55] V. A. de Sousa Jr., R. A. de O. Neto, F. de S. Chaves, A. P. da Silva, e F. R. P. Cavalcanti, "Conception and Evaluation of Access Selection Algorithms for Cooperative Beyond 3G Systems," *VI International Telecommunications Symposium - ITS*, Setembro 2006.
- [56] Y. Ofuji, A. Morimoto, S. Abeta, e M. Sawahashi, "Comparison of Packet Scheduling Algorithms Focusing on User Throughput in High Speed Downlink Packet Access," *The 13th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications*, vol. 3, pp. 1462–1466, Setembro 2002.
- [57] O. Yilmaz, A. Furuskär, J. Petterson, e A. Simonsson, "Access Selction in WCDMA and WLAN Multi-Access Networks," *Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st*, vol. 4, pp. 2220–2224, Junho 2005.
- [58] A. Furuskär, "Allocation of Multiple Services in Multi-Access Wireless Networks," *Mobile and Wireless Communications Network. 4th International Workshop*, pp. 261–265, Dezembro 2002.
- [59] A. P. da Silva, F. R. P. Cavalcanti, e R. A. de O. Neto, "VoIP Capacity Analysis of Wireless Multi-Access Networks Using Access Selection Schemes," *PIMRC - Athens*, Setembro 2007.
- [60] 3GPP, "Improvement of RRM across RNS and RNS/BSS," *3rd Generation Partnership Project*, Tech. Rep. TS 25.881 v5.0.0 - Release 5, Dezembro 2001.

-
- [61] V. A. de Sousa Jr., R. A. de O. Neto, F. de S. Chaves, L. S. Cardoso, J. F. Pimentel, e F. R. P. Cavalcanti, “Access Selection with Anticipatory Vertical Handover for Multi-Access Networks,” *PIMRC - Finland*, Setembro 2006.
- [62] H. Zhai, J. Wang, e Y. Fang, “Providing Statistical QoS Guarantee for Voice over IP in the IEEE 802.11 Wireless LANs,” *IEEE Wireless Communications*, vol. 13, no. 1, pp. 36 – 43, Fevereiro 2006.
- [63] L. R. N. Sousa, M. L. Carvalho, E. B. Rodrigues, L. Sampaio, e F. R. P. Cavalcanti, “Quality of Service Evaluation of VoIP over HSDPA,” *VI International Telecommunications Symposium - ITS*, Setembro 2006.
- [64] S. Garg e M. Kappes, “Can I Add a VoIP Call?” *IEEE International Conference on Communications*, vol. 2, pp. 779 – 783, Maio 2003.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)