



**Análise de Desempenho do Emprego do  
Multi-Acesso em Redes Compostas por  
Sistema Celular de 3<sup>a</sup> Geração e Rede  
Local Sem Fio**

LEONARDO SAMPAIO CARDOSO

Dissertação de Mestrado

Universidade Federal do Ceará  
Campus do Pici  
Centro de Tecnologia  
Departamento de Teleinformática

© Leonardo Sampaio Cardoso, Fortaleza - Ceará, Abril 2006

Tryck:



Universidade Federal do Ceará

Centro de Tecnologia

Departamento de Teleinformática  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia de  
Teleinformática

**Análise de Desempenho do Emprego  
do Multi-Acesso em Redes Compostas  
por Sistema Celular de 3ª Geração e  
Rede Local Sem Fio**

Leonardo Sampaio Cardoso

Fortaleza - Ceará

Agosto - 2006





Universidade Federal do Ceará  
Centro de Tecnologia  
Departamento de Teleinformática  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Teleinformática

# Análise de Desempenho do Emprego do Multi-Acesso em Redes Compostas por Sistema Celular de 3<sup>a</sup> Geração e Rede Local Sem Fio

Autor:

**Leonardo Sampaio Cardoso**

Orientador:

Prof. Dr. Francisco Rodrigo P. Cavalcanti

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

**Fortaleza - Ceará**

**Agosto - 2006**



## Resumo

Com as crescentes demandas pela provisão de serviços de dados em redes celulares, seus operadores tem arcado com os problemas de acomodar as crescentes capacidades enquanto mantém os níveis de qualidade de serviço. As redes de Multi-Acesso (MA) constituem uma maneira eficiente de oferecer estas capacidades, já que oferecem maneiras de agregar os recursos de rádio das Tecnologias de Acesso de Radio (RATs)<sup>1</sup> empregadas.

Apesar do conceito de Multi-Acesso ser interessante, os ganhos providos por sua adoção não são claros. Tais ganhos podem vir de diferentes fontes, tais como, a inclusão de uma nova RAT e do emprego de procedimentos de Seleção de Acesso (AS) adequados. A primeira fonte diz respeito aos ganhos disponibilizados pelo acréscimo de recursos de rádio, enquanto a segunda diz respeito à melhor distribuição dos usuários às RATs.

Este trabalho visa tornar claro o ganho envolvido na adição de uma Rede Local Sem Fio (WLAN) 802.11a a uma *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN), tanto para uma distribuição de usuários homogênea quanto para uma situação de *hotspot*, empregando o conceito de redes de MA como tecnologia habilitadora. Também entra em detalhes sobre as características de alguns procedimentos de AS<sup>2</sup> baseados em cobertura, taxa de transmissão do usuário, vazão estimada da RAT e mista (taxa de transmissão e carga), tentando apontar quais fornecem os melhores desempenhos. A avaliação é baseada em simulações dinâmicas e sistêmicas que contam com modelagem detalhada das tecnologias e conceitos envolvidos.

Os resultados mostram que, considerando a modelagem e pré-suposições, ganhos significativos podem ser conseguidos usando algoritmos de AS inteligentes no cenário do MA envolvendo as redes UTRAN e WLAN.

---

<sup>1</sup>do Inglês, (RAT), *Radio Access Technology*

<sup>2</sup>do Inglês, (AS), *Access Selection*

## Abstract

With the increasing demands for data services over the cellular networks, their operators are faced with the issue of providing the requested capacities while maintaining the service quality levels. The Multi-Access (MA) networks can be a cost effective way of raising those capacities, as it provides means to aggregate radio resources from the adopted Radio Access technologies (RATs) involved.

Although the MA concept seems very promising, the gains concerning its adoption are not quite clear. These gains can come from different sources, such as from the inclusion of a second RAT itself and from the adoption of a suitable Access Selection (AS) procedure. The former concerns the gains available with the increase in the amount of radio resources while the latter concerns the ones available with a more suitable distribution of users among the RATs.

This work aims to clarify the gains concerning the usage of the WLAN IEEE 802.11a in addition to the UTRAN, both in the homogeneous user distribution and hotspot cases, while employing the MA framework as the enabling technology. It also looks into the characteristics of some AS procedures based on coverage, user bit rate, estimated RAT throughput and mixed (user bit rate and load), aiming at clarifying which ones provide the best performance. The evaluation is based on a dynamic system-level multi-access simulator, comprised of a good and detailed level of the modeling concerning the involved technologies and concepts.

Results show that considering the assumptions and modeling, significant capacity gains can be achieved when using intelligent AS algorithms in the UTRAN-WLAN MA networks.

# Sumário

Sumário	ix
Lista de Tabelas	xi
Lista de Figuras	xiii
Lista de Acrônimos	xv
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Motivação e Objetivos . . . . .	1
1.2 Trabalhos Relacionados . . . . .	3
1.3 Escopo desta Dissertação . . . . .	7
1.4 Metodologia . . . . .	9
1.5 Contexto de Desenvolvimento da Dissertação . . . . .	9
1.6 Estrutura da Dissertação . . . . .	9
<b>2 Redes de Multi-Acesso</b>	<b>11</b>
2.1 Definição e Características das Redes de Multi-Acesso . . . . .	11
2.2 Rede de Multi-Acesso Estudada . . . . .	17
2.3 Tecnologias Habilitadoras das Redes de Multi-Acesso . . . . .	23
2.4 Considerações Finais . . . . .	29
<b>3 Seleção de Acesso</b>	<b>31</b>
3.1 Seleção de Acesso em Redes de Multi-Acesso . . . . .	31
3.2 Abordagens Estudadas . . . . .	37
3.3 Considerações Finais . . . . .	44

<b>4</b>	<b>Modelagem, Metodologia e Cenários</b>	<b>45</b>
4.1	Itens de Estudo . . . . .	45
4.2	Modelagem para Simulador de Multi-Acesso . . . . .	47
4.3	Modelagem do Módulo <i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i> . . . . .	60
4.4	Modelagem do Módulo de Rede Local Sem Fio . . . . .	64
4.5	Definição das Métricas de Avaliação . . . . .	65
4.6	Definição dos Cenários . . . . .	69
<b>5</b>	<b>Análise de Desempenho</b>	<b>73</b>
5.1	Impacto da Adição do WLAN ao UTRAN Usando o Multi-Acesso . . . . .	73
5.2	Avaliação da Seleção de Acesso na Rede de Multi-Acesso UTRAN-WLAN . . . . .	81
<b>6</b>	<b>Conclusões e Perspectivas</b>	<b>93</b>
6.1	Conclusões . . . . .	94
6.2	Perspectivas . . . . .	95
6.3	Contribuições . . . . .	97
6.4	Publicações Científicas . . . . .	98
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>101</b>

# Lista de Tabelas

3.1	Restrições e suas classificações . . . . .	34
3.2	Convenções adotadas . . . . .	37
4.1	Modelo da sessão <i>World Wide Web</i> (WWW). . . . .	53
4.2	Principais parâmetros de área de cobertura utilizados nesse trabalho	54
4.3	Parâmetros dos principais modelos de propagação usados nesse estudo. . . . .	55
4.4	Exemplos de mensagens. . . . .	58
4.5	Parâmetros de modelagem do UTRAN. . . . .	62
4.6	Parâmetros de modelagem do Rede Local Sem Fio (WLAN). . . .	65
6.1	Resumo dos resultados do primeiro item de estudo. . . . .	94
6.2	Resumo dos resultados do segundo item de estudo. . . . .	96



# Lista de Figuras

2.1	Estrutura da rede WCDMA/HSDPA. . . . .	19
2.2	Arquitetura de um sistema WLAN . . . . .	22
2.3	Cenário 1: CRRMs instalado em todos RNCs. . . . .	24
2.4	Cenário 2: CRRMs instalado em alguns RNCs. . . . .	24
2.5	Cenário 3: Servidor de CRRM único. . . . .	25
2.6	Arquiteturas de conexão WLAN- <i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i> (UTRAN) . . . . .	26
3.1	Seleção de Acesso . . . . .	32
3.2	Fluxograma do procedimento de Seleção de Acesso. . . . .	36
3.3	Leitura da taxa de transmissão da camada física baseada no modo de transmissão. . . . .	39
4.1	Funcionamento simplificado do simulador de MA. . . . .	48
4.2	Simulador de MA visto de forma abrangente. . . . .	49
4.3	Laço principal e gerência de simulação. . . . .	51
4.4	Linhas de tempo dos blocos UTRAN e WLAN no simulador de Multi-Acesso (MA). . . . .	52
4.5	CRRM . . . . .	57
4.6	Sistema de entrega de mensagens. . . . .	59
4.7	Processamento de mensagens no bloco de CRRM. . . . .	60
4.8	Curva de capacidade exemplo, exaltando as regiões de capacidade. . . . .	68
4.9	AP to sector positioning. . . . .	70
5.1	10º percentil da vazão de sessão para o cenário homogêneo. . . . .	76

5.2	Média da vazão de sessão para o cenário homogêneo. . . . .	76
5.3	90° percentil da vazão de sessão para o cenário homogêneo. . . . .	77
5.4	Satisfação de usuário para o cenário homogêneo. . . . .	78
5.5	CDF da vazão de sessão para o cenário heterogêneo a uma taxa de nascimento de 0.3/1.2 usuários/segundo. . . . .	79
5.6	Satisfação de usuário para o cenário heterogêneo. . . . .	80
5.7	Função de Distribuição Cumulativa (CDF) das taxas estimadas para as cargas baixa e alta. . . . .	83
5.8	CDF das vazão estimadas das Tecnologia de Acesso de Rádios (RATs) para as cargas baixa e alta. . . . .	85
5.9	10° percentil da vazão de sessão para todos algoritmos de Seleção de Acesso (AS). . . . .	86
5.10	Média da vazão de sessão para todos algoritmos de AS. . . . .	87
5.11	90° percentil da vazão de sessão para todos algoritmos de AS. . . . .	88
5.12	Satisfação de usuário para todos os algoritmos de AS. . . . .	89
5.13	10° percentil da vazão de sessão sob a perspectiva da rede UTRAN. . . . .	90
5.14	Média da vazão de sessão sob a perspectiva da rede UTRAN. . . . .	90
5.15	10° percentil da vazão de sessão sob a perspectiva da rede WLAN. . . . .	91
5.16	Média da vazão de sessão sob a perspectiva da rede WLAN. . . . .	92

# Lista de Acrônimos

<b>16-QAM</b>	16 - <i>Quadrature Amplitude Modulation</i>
<b>3GPP</b>	<i>3rd. Generation Partnership Project</i>
<b>3G</b>	3 <sup>a</sup> geração
<b>4G</b>	4 <sup>a</sup> geração
<b>AAA</b>	Autenticação, Autorização e Gerência de Contas
<b>A-DCH</b>	<i>Associated Dedicated Channel</i>
<b>AM</b>	<i>Acknowledged Mode</i>
<b>AMC</b>	Modulação e Codificação Adaptativa
<b>AP</b>	Ponto de Acesso
<b>AS</b>	Seleção de Acesso
<b>APC</b>	<i>Access Point Controller</i>
<b>AVI</b>	<i>Average Value Interface</i>
<b>AWGN</b>	<i>Additive White Gaussian Noise</i>
<b>BSC</b>	<i>Base Station Controller</i>
<b>BSS</b>	<i>Basic Service Set</i>
<b>CAC</b>	Controle de Admissão de Chamadas
<b>CDF</b>	Função de Distribuição Cumulativa
<b>CDMA</b>	<i>Code-Division Multiple Access</i>
<b>CN</b>	Núcleo de Rede
<b>COA</b>	<i>Care of Address</i>
<b>CQI</b>	Indicador de Qualidade do Canal

<b>CSMA/CA</b>	<i>Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance</i>
<b>CTA</b>	<i>Coverage Threshold Algorithm</i>
<b>CTS</b>	<i>Clear-to-Send</i>
<b>CRRM</b>	Gerência Comum de Recursos de Rádio
<b>DAB</b>	<i>Digital Audio Broadcast</i>
<b>DCF</b>	<i>Distributed Coordination Function</i>
<b>DCH</b>	<i>Dedicated Channel</i>
<b>DPCH</b>	<i>Dedicated Physical Channel</i>
<b>DS</b>	<i>Distribution System</i>
<b>DVB</b>	<i>Digital Video Broadcast</i>
<b>EDGE</b>	<i>Enhanced Data Rates for Global Evolution</i>
<b>ERT</b>	<i>Estimated RAT Throughput Algorithm</i>
<b>ESS</b>	<i>Extended Service Set</i>
<b>FA</b>	<i>Foreign Agent</i>
<b>GASP</b>	<i>Generalized Access Selection Problem</i>
<b>GERAN</b>	<i>GSM - EDGE Radio Access Network</i>
<b>GGSN</b>	<i>Gateway GPRS Support Node</i>
<b>GSM</b>	<i>Global System for Mobile communication</i>
<b>HA</b>	<i>Home Agent</i>
<b>HARQ</b>	Requisição de Repetição Automática Híbrida
<b>HLR</b>	<i>Home Location Register</i>
<b>HSDPA</b>	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>
<b>HS-DSCH</b>	<i>High Speed Downlink Shared Channel</i>
<b>HS-SCCH</b>	<i>High Speed Shared Control Channel</i>
<b>IAPP</b>	<i>Inter Access Point Protocol</i>
<b>IEEE</b>	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
<b>IMT-2000</b>	<i>International Mobile Telecommunications - 2000</i>
<b>IP</b>	<i>Internet Protocol</i>
<b>ITU</b>	<i>International Telecommunication Union</i>

<b>IWU</b>	<i>Interworking Unit</i>
<b>MA</b>	Multi-Acesso
<b>MAC</b>	<i>Medium Access Control</i>
<b>MAC-hs</b>	<i>Medium Access Control - High Speed</i>
<b>ME</b>	Mobile Equipment
<b>MG</b>	<i>Mobility Gateway</i>
<b>MSC</b>	<i>Mobile Switching Center</i>
<b>OFDM</b>	<i>Orthogonal Frequency Division Multiplexing</i>
<b>OOP</b>	<i>Object-Oriented Programming</i>
<b>PAN</b>	<i>Personal Area Network</i>
<b>PC</b>	Controle de Potência
<b>PF</b>	<i>Proportional Fair</i>
<b>PHY</b>	Camada Física
<b>PI</b>	Indicador de Desempenho
<b>QBA</b>	<i>Queue-based Algorithm</i>
<b>QoS</b>	Qualidade de Serviço
<b>RAT</b>	Tecnologia de Acesso de Rádio
<b>RLC</b>	<i>Radio Link Control</i>
<b>RMA</b>	<i>Rate Maximization Algorithm</i>
<b>RNC</b>	<i>Radio Network Controller</i>
<b>RNS</b>	<i>Radio Network Subsystem</i>
<b>RRM</b>	Gerência de Recursos de Rádio
<b>RTS</b>	<i>Request-to-Send</i>
<b>SASP</b>	<i>Strict version of the Access Selection Problem</i>
<b>SF</b>	<i>Spreading Factor</i>
<b>SGSN</b>	<i>Service GPRS Support Node</i>
<b>SHO</b>	<i>Soft Handover</i>
<b>SINR</b>	<i>Signal-to-Interference plus Noise Ratio</i>
<b>SNR</b>	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>

<b>STA</b>	<i>Station</i>
<b>TCP</b>	<i>Transport Control Protocol</i>
<b>TM</b>	<i>Transparent Mode</i>
<b>TTI</b>	<i>Transmission Time Interval</i>
<b>UE</b>	<i>User Equipment</i>
<b>UM</b>	<i>Unacknowledged Mode</i>
<b>UMTS</b>	<i>Universal Mobile Telecommunications System</i>
<b>U-NII</b>	<i>Unlicensed National Information Infrastructure</i>
<b>USIM</b>	<i>Universal Subscriber Identification Module</i>
<b>UTA</b>	<i>Utility-based Algorithm</i>
<b>UTRAN</b>	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>
<b>VAP</b>	<i>Virtual Access Point</i>
<b>VHO</b>	<i>Vertical Handover</i>
<b>VoIP</b>	<i>Voice over IP</i>
<b>WCDMA</b>	<i>Wideband CDMA</i>
<b>WLAN</b>	<i>Rede Local Sem Fio</i>
<b>WWW</b>	<i>World Wide Web</i>

# Capítulo 1

## Introdução

O desenvolvimento para o futuro das redes celulares sem fio, conhecida como a 4ª geração (4G), é dividido em duas principais frentes de pesquisa: a concepção de novas Tecnologias de Acesso de Radio (RATs)<sup>12</sup>, com taxas de transmissão mais altas, por volta dos 100 Mbps e o desenvolvimento de esquemas de integração das RATs, existentes visando a sua cooperação para o melhor aproveitamento de suas complementaridades. As redes de Multi-Acesso (MA), fruto desta última frente de pesquisa, são o foco deste trabalho.

Neste capítulo, a motivação e os objetivos do presente trabalho serão expostos, na seção 1.1. Em seguida, na seção 1.2, os trabalhos relacionados com o presente serão discutidos. Então, o escopo do trabalho é apresentado na seção 1.3. Em seguida, a metodologia adotada é mostrada na seção 1.4. Na sequência, seção 1.5, o contexto no qual o trabalho foi realizado é explicado. Por fim, a estrutura da dissertação será apresentada na seção 1.6.

### 1.1 Motivação e Objetivos

A força motriz por trás dos esforços de pesquisa em telecomunicações sem fio é a capacidade de prover os mais novos serviços demandados pelos

---

<sup>1</sup>do Inglês, (RAT), *Radio Access Technology*

<sup>2</sup>Nesta dissertação, decidimos manter as siglas vinculadas ao nome em inglês por estar em sintonia com as publicações científicas que são em sua maioria, nesta língua.

usuários. Apesar das redes de 3ª geração (3G) estarem sendo instaladas no mundo inteiro, a cada dia novos serviços são lançados. São serviços com requisitos, tais como taxa de transmissão e atraso de pacote, cada vez mais agressivos limitando a capacidades das redes atuais. A busca por novas estratégias que resolvam este problema contribuíram para o estudo da 4G das telecomunicações sem fio.

Uma das tendências da evolução para a 4G, e principal foco deste trabalho, envolve a cooperação entre as tecnologias de acesso de rádio existentes, aproveitando as complementaridades das características destas. Estas redes são chamadas de redes de MA, e podem ser compostas por várias RATs, como por exemplo, satélites de baixa órbita, *Digital Video Broadcast* (DVB), *Digital Audio Broadcast* (DAB), tecnologias celulares de 2.5 e 3ª geração, Redes Locais Sem Fio (WLANs)<sup>3</sup> e *Personal Area Networks* (PANs). Neste trabalho, a rede de MA escolhida é composta da *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN) e da WLAN *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 802.11a, por serem RATs que compõem o estado da arte em termos de comunicações sem fio.

Como consequência de combinar RATs, as redes de MA, dispõem de todos os recursos de rádio, podendo ser alocados sob demanda e de forma otimizada. Esse novo paradigma permite gerenciar os recursos de rádio disponíveis de forma abrangente, alocando adequadamente o recurso, independente da RAT, a qual pertença. Essa vantagem é, no entanto, contra-balanceada pela complexidade extra gerada pelo novo grau de liberdade.

Neste contexto, um procedimento vital é a Seleção de Acesso (AS)<sup>4</sup>, na qual é realizada a escolha da RAT à qual um certo usuário deve realizar a sua conexão inicial. Esse procedimento é muito importante, dado que se realizado de forma descompromissada, pode levar à condição na qual uma RAT tem sua capacidade esgotada enquanto as demais ainda operam em baixa capacidade.

Para que estas redes se tornem realidade, alguns desafios técnicos precisam ser suplantados. Dois destes desafios, para o caso específico do MA envolvendo

---

<sup>3</sup>do Inglês, (WLAN), *Wireless Local Area Networks*

<sup>4</sup>do Inglês, (AS), *Access Selection*

a UTRAN e a WLAN, constituem a motivação deste trabalho:

- **Ausência de estudos dinâmicos das redes de MA UTRAN-WLAN.** Apesar de já terem sido pesquisadas, estudos que consideram dos dinamismos das redes de MA UTRAN-WLAN foram pouco considerados e os que houveram, adotaram uma modelagem simplificada;
- **Ausência de estudos mais profundos sobre a AS.** Existem poucos estudos no que diz respeito ao procedimento de AS. Os que existem, consideram algoritmos de AS concebidos para redes de MA genéricas, que poderiam ser ajustados para obter melhor desempenho no caso do MA UTRAN-WLAN. Por fim, é esperado que algoritmos inteligentes de AS sejam melhores que os simples, propostos na literatura.

O objetivo deste trabalho é estudar o desempenho, provido pela adição da WLAN 802.11a à UTRAN de forma cooperativa, usando a estrutura MA como tecnologia habilitadora e algoritmos inteligentes de AS. Alguns passos necessários para atingir esse objetivo são:

- **Estudar a seleção de acesso em uma rede de MA composta pela UTRAN e WLAN 802.11;**
- **Levantar as configurações em que a rede de MA envolvendo a UTRAN e WLAN se torna vantajosa;**
- **Propor novos algoritmos de AS inteligentes, que melhorem o desempenho da rede de MA;**
- **Construir um simulador dinâmico de MA.**

## 1.2 Trabalhos Relacionados

Nesta seção, uma lista de trabalhos relacionados serão discutidos. Esta listagem não tem a intenção de ser exaustiva, mas apenas de apontar os

trabalhos que contribuíram ou inspiraram o conteúdo do estudo apresentado neste documento.

Órgãos de padronização tratam das redes de MA há algum tempo. Nos padrões desenvolvidos pelo *3rd. Generation Partnership Project* (3GPP), os estudos iniciaram-se em 2003, com a publicação de uma norma [1] sobre as possibilidades referentes a integração das redes 3GPP com as WLANs. Esse documento discute a extensão das funcionalidades 3GPP, tais como a Autenticação, Autorização e Gerência de Contas (AAA)<sup>5</sup>, a segurança e serviços, para as redes WLAN. Também discute sobre possíveis cenários de integração, terminais, posse da WLAN, aspectos de segurança e serviços disponíveis. Como resultado deste trabalho, o 3GPP publicou uma outra norma [2] na qual define os requerimentos para essa integração. Ela especifica as entidades requeridas, modificações para os sistemas do 3GPP e os serviços que podem ser oferecidos. Um outro documento [3] descreve a como o sistema deve ser configurado, apresentando a arquitetura e procedimentos necessários para o acesso da WLAN à internet e ao núcleo AAA, através dos sistemas 3GPP. Ele especifica ainda como esse procedimentos devem ocorrer e também a coordenação necessária entre o Núcleo de Rede (CN)<sup>6</sup> 3GPP e o WLAN. Em outro documento [4], mais detalhes sobre a arquitetura, interfaces e procedimentos necessários para a integração dos sistemas 3GPP com o WLAN são descritos. Ainda sobre o assunto de MA, apesar de não tratar diretamente sobre a integração 3GPP-WLAN, há dois documentos [5,6] que discorrem sobre a arquitetura e integração das entidades de Gerência Comum de Recursos de Rádio (CRRM)<sup>7</sup>, responsáveis pelo gerenciamento dos recursos de rádio de todas as RATs. Ainda relacionado ao tópico, mas não diretamente ligado a este trabalho, podemos citar documentos que lidam com a factibilidade de serviços baseados em localidades [7], definições de tais serviços [8], questões de Qualidade de Serviço (QoS)<sup>8</sup> [9] e aspectos de

---

<sup>5</sup>do Inglês, (AAA), *Authentication, Authorisation and Accounting*

<sup>6</sup>do Inglês, (CN), *Core Network*

<sup>7</sup>do Inglês, (CRRM), *Common Radio Resource Management*

<sup>8</sup>do Inglês, (QoS), *Quality of Service*

protocolos e políticas [10].

Como pode ser visto, a maioria dos trabalhos produzidos pelo 3GPP focam em aspectos como arquitetura, AAA, protocolos e políticas. No entanto, poucos apresentam uma análise do desempenho de tais propostas. Ainda assim esses padrões foram úteis por guiar a escolha de cenários e restringir as possibilidades dentro do âmbito do MA.

Há também trabalho em MA sendo realizado em institutos de pesquisa, que ligam as empresas às entidades acadêmicas. Projetos realizados nestes institutos abordam tanto forma direta como também indireta, esse tema. O projeto Monasidre [11], publicou relatórios no qual faz recomendações sobre a implementação e as políticas de interação entre as várias tecnologias integrantes do MA. Ele propõe um arcabouço para a cooperação das RATs com um programa de gerenciamento para esse propósito. Há também o projeto WINNER [12], que introduz uma nova tecnologia de acesso de rádio e prevê a sua interconexão com as existentes. Nela, requisitos para o multi-acesso são traçados, levando em consideração questões como o tipo de serviço, a sua qualidade e implementação. Este projeto não só serviu de exemplo no que diz respeito à arquitetura da rede de MA, mas também disponibilizou avaliações de desempenho interessantes. Há também o projeto EVEREST [13], que lida com redes heterogêneas. Nele, a integração do *GSM - EDGE Radio Access Network* (GERAN), UTRAN e WLAN é definida, com a especificação de critérios de qualidade, arquitetura e procedimento de gerenciamento de recursos de rádio. Outro projeto que estuda os conceitos das redes de MA é o *Ambient Networks* [14]. Neste projeto, várias RATs como GERAN/UTRAN, WLAN e bluetooth, podem ser integradas em uma rede de MA. A inclusão de entidades de controle dos recursos é realizada em todas as camadas da rede, podendo atuar em qualquer nível. O projeto ainda prevê a adição de uma camada de controle de enlace genérica, que procura tanto servir como interface entre as várias redes utilizadas quanto filtrar as informações necessárias para o controle de recursos.

Considerando a literatura puramente acadêmica, vários trabalhos

relacionado ao assunto foram publicados. No entanto, os que tem maior correlação com o trabalho foco desta dissertação serão discutidos.

Alguns trabalhos tem estudado o desempenho da adoção do conceito do MA. O trabalho realizado por Doufexi *et al.* [15] afirma que o ganho de capacidade provido pela adição do MA é significativo, particularmente quando a parcela da área coberta pela rede WLAN é alta em relação ao da rede 3G. O trabalho realizado por Liu *et al.* [16] afirma que melhorias de capacidade podem ser alcançadas com a adoção do WLAN com cobertura de 50% da área da rede 3G, para o serviço de vídeo. As conclusões desses trabalhos foram baseadas em simulações que fizeram uso de modelagem simplificada.

Um número considerável de trabalhos relacionados à AS tem sido publicados. Furuskär foi um dos pioneiros nessa frente de pesquisa, com o trabalho realizado em [17]. Nele, Furuskär realiza um estudo abrangente no que diz respeito às redes de MA e a alocação de serviços. No trabalho em [18], Furuskär *et al.* especifica um esquema de AS baseado na diferenciação de serviços, que usa o perfil do serviço para assinalar um usuário à RAT mais adequada, maximizando a capacidade conjunta da rede de MA. Yilmaz *et al.* [19, 20] aprofunda a pesquisa em AS, realizando um estudo da influência da carga da RAT neste procedimento. Esse trabalho também mostra que pode-se conseguir ganhos no cenário macrocelular-*hotspot*<sup>9</sup> com o emprego da informação de carga na AS. Ambos trabalhos realizados em [17] e [20] serviram de inspiração para este trabalho, guiando na escolha das RATs, problema e cenário.

Ainda sobre a AS, o trabalho realizado por de Sousa Jr. *et al.* em [21, 22], identifica os cenários que se mostram atrativos para o uso de um algoritmo de AS inteligente. Nele, de Sousa Jr. *et al.* afirma que uma rede de MA composta por uma macrocélula e um *hotspot*, se torna atrativo para um algoritmo de AS inteligente quando a proporção de usuários de dentro para fora do *hotspot* for alta. Em outro trabalho por de Sousa Jr. *et al.* [23], o estudo do *Generalized Access Selection Problem* (GASP) é conduzido. O

---

<sup>9</sup>Neste documento usaremos o termo *hotspot* para determinar uma concentração grande de usuários em uma certa área

GASP é considerado o melhor caso de AS, e visa maximizar uma função objetivo. Essa estratégia é comparada ao *Strict version of the Access Selection Problem* (SASP), que compõe a versão tradicional da AS. O trabalho mostra que ganhos consideráveis podem ser alcançados com o GASP, e que este define um limiar máximo para os ganhos alcançáveis. Em [24, 25], de Sousa Jr. *et al.*, define uma solução de meio termo entre o GASP e o SASP, baseado na realocação de alguns usuários durante o processo de AS. Esse procedimento é chamado de AS com Realocação de Conexões. Este estudo mostra que ganhos superiores aos do SASP podem ser alcançados com esse procedimento e que tais ganhos são limitados pelo limiar máximo, definido pelo GASP. Em [26], de Sousa Jr. *et al.* estuda o desempenho de algoritmos de AS em redes de MA. Finalmente em [27], da Silva *et al.* apresenta uma análise de desempenho similar, mas voltada ao serviço de *Voice over IP* (VoIP). Assim como no caso dos outros trabalhos, estes são baseados em modelagem genérica das RATs, não levando em consideração suas características. Além deste fato, a modelagem empregada foi simplificada.

Como visto na bibliografia disponível, nenhum dos trabalhos focam na avaliação das redes de MA considerando suas características dinâmicas intrínsecas. Este trabalho visa preencher essa lacuna, realizando um estudo de desempenho das redes de MA UTRAN-WLAN considerando essas características.

### 1.3 Escopo desta Dissertação

Já que as redes de MA constituem um universo de possibilidades, é importante limitar o escopo de estudo dentro do tema. Este trabalho visa estudar o serviço de melhor esforço *World Wide Web* (WWW) em uma rede de MA composta pelo sistema celular UTRAN (empregando a interface *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA)) e pela WLAN IEEE 802.11a. Ainda que esta seja a rede alvo, algumas discussões e suposições serão feitas sobre as redes de MA de forma geral.

Este trabalho tem seu escopo dividido em duas principais vertentes:

- **O estudo do impacto da adição de um AP WLAN à UTRAN, usando o MA como tecnologia habilitadora.** Conhecer os ganhos envolvidos no emprego da estratégia de MA é uma questão estratégica para as operadoras de redes celulares já que estas deverão expandir suas redes para acomodar um número crescente de usuários. Há uma importante relação a ser focada: custo *versus* desempenho. Observando sob a perspectiva do custo, uma operadora celular poderia instalar uma segunda RAT de forma complementar à rede celular, entretanto sem interconectá-las. Isto reduziria os custos de implantação enquanto ampliando a sua capacidade oferecida. Esta abordagem iria restringir as opções do usuário, tais como a mobilidade. As redes de MA oferecem resposta a essas questões, mas é necessário comparar os ganhos frente aos custos envolvidos. Alguns trabalhos disponíveis lidam com seus custos como em [28]. No entanto, poucos lidam com questões sobre seu desempenho. O trabalho atual visa preencher uma parte desta lacuna, oferecendo resposta à questão dos ganhos da rede de MA composta pelas redes UTRAN e WLAN.
- **O estudo da AS envolvendo algoritmos inteligentes no cenário UTRAN-WLAN.** Os algoritmos de seleção de acesso são estudados em alguns trabalhos [18, 19, 26]. Eles mostram o desempenho de algoritmos de seleção de acesso baseados em cobertura, taxa, carga e vazão. Apesar de oferecerem resultados interessantes, apenas modelagem simplificada foi usada nessas avaliações. Além disso, uma investigação mais profunda sobre a aplicabilidade de algoritmos inteligentes de AS no contexto do MA UTRAN-WLAN ficou em aberto. No presente trabalho esses algoritmos serão avaliados em um ambiente de simulação dinâmico, empregando uma modelagem detalhada das redes MA. É esperado que com maior nível e detalhamento dos modelos, resultados mais aplicáveis se tornem disponíveis e que forneçam uma maior compreensão sobre a cooperação destas duas RATs.

## 1.4 Metodologia

A avaliação realizada neste trabalho requer uma representação detalhada do ambiente MA UTRAN-WLAN e de suas características. Devido à complexidade apresentada pela rede de MA a abordagem analítica se mostrou incapaz de realizar a sua modelagem. Para contornar tal problema, uma ferramenta de simulação sistêmica e dinâmica foi desenvolvida em C++ durante o transcorrer deste trabalho. A ferramenta é modular e aceita futuras adições de redes ou algoritmos se necessário. Então, a metodologia deste trabalho se inicia com o estudo do problema, proposta de soluções e avaliação de desempenho através de simulações computacionais.

## 1.5 Contexto de Desenvolvimento da Dissertação

Esta dissertação foi desenvolvido junto ao GTEL (Grupo de Pesquisas em Telecomunicações sem Fio) do Departamento de Engenharia de Teleinformática da UFC. Este grupo vem trabalhando na consolidação de pesquisa aplicada e desenvolvimento na área de telecomunicações na UFC através de projetos com parceiros acadêmicos e do setor industrial.

O trabalho aqui apresentado está em consonância com o projeto: “*ADVANCED COMMON RADIO RESOURCE MANAGEMENT FOR MULTI-ACCESS MULTI-SERVICES WIRELESS NETWORKS*”. Este projeto está enquadrado no contexto da cooperação técnico-científica com a Ericsson do Brasil.

## 1.6 Estrutura da Dissertação

Neste trabalho detalharemos o conceito de redes de MA no capítulo 2 onde, serão tratados aspectos como, sua história, objetivos, procedimentos e níveis de acoplamento. Ainda neste capítulo será apresentada a rede de MA estudada e as tecnologias que suportam de seu funcionamento. No capítulo 3, a seleção

de acesso é apresentada. A sua importância para a rede de MA é enfatizada, mostrando as situações nas quais ela se torna imperativa. Seu funcionamento básico é explanado juntamente com a exposição dos algoritmos de seleção de acesso estudados neste trabalho. O capítulo 4 expõe a metodologia empregada no estudo dos algoritmos de seleção de acesso além da modelagem envolvida. Será também realizada neste capítulo a apresentação das métricas de desempenho adotadas no estudo. No capítulo 5 os resultados dos estudos de desempenho são apresentados e discutidos. Finalmente, no capítulo 6, as conclusões e perspectivas do trabalho são apresentadas.

# Capítulo 2

## Redes de Multi-Acesso

Os conceitos de integração de redes não é novo. Órgãos de padronização vêm trabalhando com estas questões desde a década de 90 com as redes de 3ª geração (3G). As redes de Multi-Acesso (MA) vão além da integração de Tecnologias de Acesso de Radio (RATs)<sup>1</sup> também permitindo a cooperação das RATs e a mobilidade irrestrita dos usuários.

Neste capítulo, as redes de MA serão introduzidas na seção 2.1, mostrando sua definição e história. Ainda nessa seção, algumas características tais como os níveis de acoplamento e procedimentos necessários serão discutidos. Em seguida, a seção 2.2 apresenta e detalha a rede de MA avaliada no presente trabalho. Sua composição e as tecnologias que habilitam o seu funcionamento, são listados na seção 2.3. Por fim, na seção 2.4, as considerações finais são estabelecidas.

### 2.1 Definição e Características das Redes de Multi-Acesso

O conceito das redes de MA pode ser sucintamente estabelecido na seguinte frase:

---

<sup>1</sup>do Inglês, (RAT), *Radio Access Technology*

Redes de MA são sistemas onde duas ou mais tecnologias de acesso são integradas de forma a cooperar entre si afim de aproveitar a complementaridade das qualidades de cada uma no provimento de serviços de telecomunicações diversos.

Para que essa integração entre as tecnologias de acesso de rádio habilite a sua cooperação plena, é necessário que os padrões, as interfaces e os procedimentos de inter-operabilidade estejam bem especificados. Órgãos de padronização, como o *3rd. Generation Partnership Project* (3GPP), têm especificado essas interfaces há algum tempo. A seguir, apresentamos um breve histórico das redes de MA e dos trabalhos envolvendo a sua padronização.

## Histórico

A idéia de usar múltiplas tecnologias de acesso em cooperação não é nova. Desde o final da década de 90, com a criação do *International Mobile Telecommunications - 2000* (IMT-2000) pelo *International Telecommunication Union* (ITU), as redes de terceira geração foram definidas incluindo o uso de diversas tecnologias de acesso que abrangiam desde as redes celulares às redes de satélites de baixa órbita [29]. Desde a criação do *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) [29, 30], foi especificada a interação entre redes *Wideband CDMA* (WCDMA) e as redes *Global System for Mobile communication* (GSM)/*Enhanced Data Rates for Global Evolution* (EDGE).

O 3GPP, seguindo uma tendência crescente, também liderou a investigação da integração das redes Rede Local Sem Fio (WLAN)<sup>2</sup> aos sistemas compatíveis com o 3GPP [1–4, 7–10]. Essa tendência ganhou mais inércia com a crescente popularização das redes WLAN derivadas da família de padrões do *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 802.11.

---

<sup>2</sup>do Inglês, (WLAN), *Wireless Local Area Network*

## 2.1. DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DAS REDES DE Multi-Acesso<sup>3</sup>

Redes compostas dessa tecnologia estão sendo instaladas no mundo inteiro em *hotspots* como parques, hotéis e aeroportos [31].

Atualmente, algumas operadoras de telefonia celular estão se associando a operadoras de redes WLAN ou investindo nessa tecnologia de alguma outra forma [32]. Nesses casos, a integração WLAN-celular, é apenas a nível de Autenticação, Autorização e Gerência de Contas (AAA)<sup>3</sup>, sem uma real cooperação entre as redes. Portanto, a cooperação entre a rede WLAN e a rede celular tem se tornado uma opção interessante, permitindo não só um melhor uso dos recursos de rádio disponíveis, mas também a possibilidade de mobilidade irrestrita para o usuário.

Vários projetos estão estudando arquiteturas de redes de MA há algum tempo [1, 11–13, 33–35]. Estes projetos se concentram desde redes de MA simples, como as integradas pelo *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN)-WLAN, quanto a redes bastante ambiciosas que envolvem tecnologias de curto alcance (*Bluetooth*), celulares (*GSM - EDGE Radio Access Network* (GERAN) e UTRAN), redes metropolitanas de difusão (*Digital Audio Broadcast* (DAB) e *Digital Video Broadcast* (DVB)) e satélites de baixa órbita.

### Características

Além de agregar os recursos de rádio das RATs, as redes de MA possibilitam mobilidade irrestrita e melhoria de Qualidade de Serviço (QoS)<sup>4</sup> entre outros. Algumas dessas funções constituem as principais características das redes de MA. Uma listagem destas características são:

- **Agregação e diversificação dos recursos de rádio.** O objetivo mais notório das redes de MA é a agregação de recursos das RATs. Assim, uma operadora poderia aumentar, por exemplo, a vazão total disponível incluindo mais uma RAT. Os recursos de cada RAT tem características diferentes e podem ser adaptados a tipos distintos de serviços.

---

<sup>3</sup>do Inglês, (AAA), *Authentication, Authorisation and Accounting*

<sup>4</sup>do Inglês, (QoS), *Quality of Service*

- **Mobilidade irrestrita.** As redes de MA tem a possibilidade de permitir o tráfego de usuários entre as RATs sem perda de conexão. Assim, usuários podem manter sua conexão durante um trajeto qualquer, sem necessitar de uma re-conexão.
- **Melhoria da QoS.** Redes heterogêneas têm melhor chance de servir de forma adequada um certo usuário, escolhendo a tecnologia de acesso que mais se adapta ao serviço requisitado. Se o usuário se utilizar de mais de um fluxo, cada um pode ser roteado para as RATs mais adequadas de forma a garantir a melhor QoS possível. Há a possibilidade de que com a melhor distribuição dos usuários pelas RATs constituintes da rede de MA, mais recursos fiquem disponíveis possibilitando melhor QoS.
- **Aumento e melhoria da cobertura.** As redes de MA foram projetadas para operar em níveis hierárquicos que correspondem às coberturas das tecnologias de acesso. Nestas redes, sistemas mais adequados a servir uma determinada área de cobertura podem ser usadas para tal fim. Como exemplo, o WLAN pode ser usado para servir um *hotspot*, liberando os recursos de uma rede celular para usuários de alta mobilidade. Por fim, RATs podem ser usadas para o aumento de cobertura e ainda para melhorar a cobertura de locais nos quais RATs já instaladas não conseguem boa qualidade de sinal.
- **Aumento de capacidade.** Geralmente, a capacidade de uma rede de MA é a soma da capacidade das RATs participantes. Com uma gerência de recursos de rádio inteligente, é possível ampliar essa capacidade, ultrapassando o limite da soma das capacidades de cada rede em separado.
- **Controle de carga.** Múltiplas redes operando cooperativamente podem ser usadas para amenizar uma situação de alta carga, em uma dada rede, fazendo transferência de usuários ou fluxos da rede congestionada para uma livre. Esse controle de carga pode ser realizado

## 2.1. DEFINIÇÃO E CARACTERÍSTICAS DAS REDES DE Multi-Acesso<sup>5</sup>

durante a conexão de um novo usuário, na ocorrência de um evento de congestionamento ou em intervalos de tempo regulares.

- **Custo.** Já que as redes de MA fazem uso de RATs prontamente disponíveis, nenhum investimento em uma nova tecnologia é necessário, prolongando a vida dos gastos em redes e espectro de rádio.

A implementação de tais características depende de arquiteturas, protocolos e procedimentos. Os detalhes sobre as arquiteturas e procedimentos são mostrados em detalhes na seção 2.3. Em seguida mostraremos quais desses procedimentos são desejáveis nestas redes.

### Procedimentos Necessários

As redes de MA tem que ser capazes de executar os seguintes procedimentos quando necessário:

- **Seleção de Acesso (AS)<sup>5</sup>:** é a escolha inicial da RAT para a conexão do usuário. Essa escolha pode ser baseada no usuário, onde a RAT selecionada será aquela que melhorar a QoS do usuário, ou baseada na rede, onde a RAT escolhida será aquela que maximizar o desempenho da rede como um todo.
- **Vertical Handover (VHO):** é um procedimento no qual usuários podem trocar de RAT. O VHO pode ser disparado por vários tipo de eventos, incluindo a manutenção de mobilidade, melhoria de QoS ou até mesmo por um congestionamento em uma RAT.
- **Controle de congestionamento:** procedimento no qual a rede de MA identifica uma situação de congestionamento, e pra aliviá-la, realiza a troca da RAT de um ou mais usuários de forma a melhorar o desempenho global do sistema. Geralmente, o controle de congestionamento usa os procedimentos de AS, de VHO ou ambos simultâneamente.

---

<sup>5</sup>do Inglês, (AS), *Access Selection*

- **Controle de fluxo:** é a orientação de fluxos de dados de um usuário para a rede mais capaz de servi-lo. Por exemplo, um usuário de vídeo-telefonia pode ter seu fluxo de vídeo enviado por uma rede de maior vazão enquanto seu fluxo de áudio é enviado por uma rede com QoS garantido, mas com taxa inferior.

Entre os procedimentos apresentados, apenas o de AS é foco deste trabalho. A AS é detalhada no capítulo 3. Os procedimentos mostrados acima não são mandatórios para uma rede de MA, mas acabam por definir sua estrutura e nível de integração. Quanto maior for a integração das RATs, mais as redes de MA serão capazes de executar procedimentos mais refinados. Esses níveis de acoplamento são especificados à seguir.

## Níveis de Acoplamento

Para que a cooperação entre as RATs seja possível, além dos fatores técnicos, tem-se ainda os fatores de legislação, econômicos e comportamentais relacionados. Configurações específicas destas características definem o nível de integração das tecnologias de acesso pertencentes a rede de MA e especificam seus limites de operação. De forma superficial, podemos classificar os níveis de integração como listados a seguir e definidos em [31, 36].

- **Sem acoplamento:** nesse nível de acoplamento não há nenhuma interação entre RATs que operam na mesma área de cobertura. Mesmo que o usuários conectados possuam os terminais necessários para acessar qualquer RAT não podem passar para outra rede sem a perda de conexão.
- **Acoplamento fraco:** é caracterizado por redes compostas por diferentes RATs operando na mesma área de cobertura e compartilhando a mesma base de dados do usuário, porém de forma desconjunta. Ambas as redes se conectam à *Internet* de forma separada, através de seus próprios pontos de conexão. A passagem de usuários de uma rede para

a outra é possível com ou sem perda de conexão, geralmente incorrendo em atrasos no acesso do serviço durante o procedimento.

- **Acoplamento forte:** as RATs geralmente operam de forma cooperativa e o usuário é visto da mesma forma, independente de qual tecnologia esteja conectado. Além de dividir as estruturas de AAA, ambas RATs se conectam à *Internet* através de um ponto de conexão, compartilhando um roteador. A troca de redes pelo usuário é possível de forma transparente e com atrasos mais controlados.
- **Acoplamento muito forte:** no nível de acoplamento forte a conexão entre as RATs ocorre através do Núcleo de Rede (CN)<sup>6</sup>. O acoplamento muito forte introduz uma integração mais forte entre as RATs, com ligações diretas entre elas. Dessa forma, esse nível de acoplamento permite procedimentos interessantes como o controle de fluxo, por exemplo.

Esta descrição dos níveis e acoplamento foi superficial por não considerar os aspectos de arquitetura. Tais aspectos serão apresentados na seqüência, na seção 2.3.

## 2.2 Rede de Multi-Acesso Estudada

Dentre as RATs citadas na seção 2.1, esse estudo se concentra na rede de MA envolvendo o sistema UTRAN (com foco na interface *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA)) e o WLAN 802.11a. Esta rede de MA segue de uma tendência em curso, com um crescente uso de *hostpots* WLAN sendo empregados em áreas públicas e do crescente interesse por operadoras de celular nessa tecnologia. Na seqüência, mais detalhes serão expostos sobre as características das RATs envolvidas.

---

<sup>6</sup>do Inglês, (CN), *Core Network*

## ***UMTS Terrestrial Radio Access Network***

O sistema celular escolhido para integrar o ambiente de MA foi o WCDMA rel.99/rel.5 [30, 37]. Esta escolha decorre do fato de que o sistema UTRAN é a tecnologia escolhida para a evolução das redes de 2G e 2.5G. O UTRAN é um sistema celular que emprega o *Code-Division Multiple Access* (CDMA) como múltiplo acesso, ocupando uma banda de 5 MHz.

O trabalho foca principalmente na interface padronizada a partir do rel.5 das normas, chamada de HSDPA. O HSDPA é um sistema de melhor esforço com um canal compartilhado de altas taxas, cujo esquema de adaptação de enlace é similar ao já disponível no sistema EDGE. É composta da Modulação e Codificação Adaptativa (AMC)<sup>7</sup> e da Requisição de Repetição Automática Híbrida (HARQ)<sup>8</sup>. O HSDPA conta ainda com o canal *High Speed Downlink Shared Channel* (HS-DSCH), usado para a transmissão de dados em altas taxas no enlace direto.

### **Estrutura da UTRAN**

A estrutura do sistema UTRAN é mostrada na figura 2.1. Nesta figura, pode-se observar as três principais divisões, que são: *User Equipment* (UE), UTRAN e CN. O UE é a parte que diz respeito ao usuário e consiste na estação móvel, terminal de acesso (ambos representados pelo *Mobile Equipment* (ME)) e o *Universal Subscriber Identification Module* (USIM), que carrega a identificação do usuário e códigos de autenticação. O USIM é importante para a conexão inicial do usuário à rede UTRAN. A parte que compõe a rede UTRAN é dividida entre as *Radio Network Subsystems* (RNSs), que são compostas por *Radio Network Controllers* (RNCs) e Node Bs. Enquanto a RNC controla o uso dos recursos e participa na cadeia de transmissão, os Node Bs contém os circuitos que compõe o transceptor e são responsáveis por realizar os passos mais próximos à transmissão propriamente dita. Apesar do CN ser composto por um número maior de estruturas, apenas as importantes

---

<sup>7</sup>do Inglês, (AMC), *Adaptive Modulation and Coding*

<sup>8</sup>do Inglês, (HARQ), *Hybrid Automatic Repeat Request*

para este estudo são mostradas na figura 2.1. O CN é dividido em duas partes de acordo com os tipos de conexões que gerencia: orientada à pacote e orientada a circuito. O *Mobile Switching Center* (MSC) tem o papel de controlar a parte que lida com as conexões orientadas à circuito, enquanto o *Service GPRS Support Node* (SGSN) controla a que lida com as orientadas a pacote. O *Home Location Register* (HLR) realiza a gerência da conexão do usuário do ponto de vista da rede.

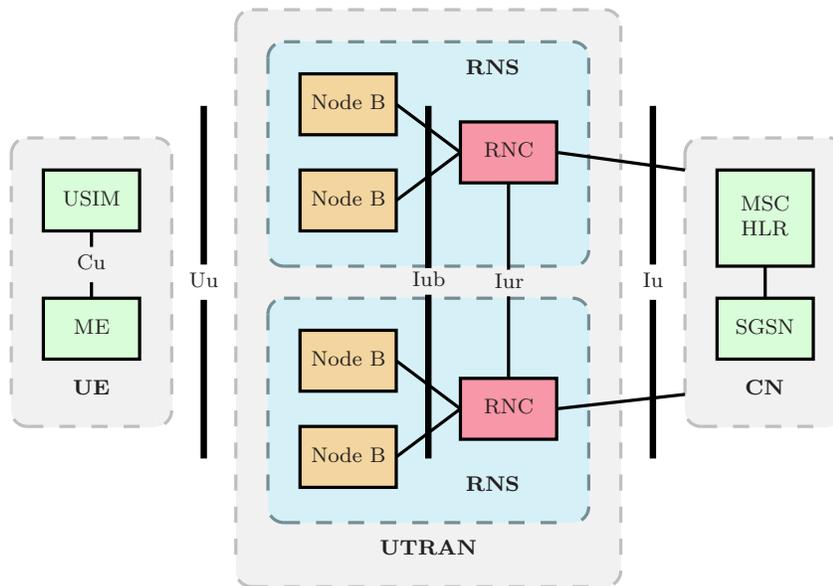


Figura 2.1: Estrutura da rede WCDMA/HSDPA.

### Aspectos Importantes da Rede UTRAN em Relação ao MA

Alguns aspectos do sistema UTRAN são mais relevantes para a sua análise dentro do contexto do MA. Tais características são:

- **Esquema de múltiplo acesso.** Como dito anteriormente, a rede UTRAN adota o esquema de múltiplo acesso CDMA para todas as suas interfaces aéreas. Desta forma, a interferência aparece como um fator limitante para esta rede. Ela limita a sua capacidade e apresenta uma degradação da qualidade se serviço com o aumento da carga.

- **Gerência de recursos de rádio.** Outro aspecto importante da rede UTRAN são seus procedimentos de Gerência de Recursos de Rádio (RRM)<sup>9</sup>, já que suas decisões podem causar algum impacto sobre a operação do Gerência Comum de Recursos de Rádio (CRRM)<sup>10</sup>. Como técnicas de RRM, o sistema UTRAN dispõe de Controle de Potência (PC)<sup>11</sup>, *Soft Handover* (SHO) and Controle de Admissão de Chamadas (CAC). O PC se encarrega do uso da potência, regulando a qualidade de potência que cada canal usa. O SHO habilita a mobilidade de usuários por entre setores e ainda pode oferecer a opção de expor a diversidade oferecida pelas múltiplas células. O CAC é responsável pela admissão de novas chamadas na rede UTRAN e não só decide se o usuário pode ser admitido como também em que setor isso ocorrerá. A decisão do CAC é baseada em disponibilidade de potência e código.
  
- **Camada física e controle de acesso ao meio.** A Camada Física (PHY) do HSDPA é capaz de oferecer até 10 Mbps [30]. Esta taxa pode ser alcançada por meio do emprego de modulações de ordem mais alta (16 - *Quadrature Amplitude Modulation* (16-QAM)), codificador turbo e transmissão usando múltiplos códigos (15 códigos SF-16). O AMC é capaz de escolher entre 30 Esquemas de Modulação e Codificação (MCSs)<sup>12</sup> que realizam o ajuste fino dos parâmetros de transmissão de acordo com a condição do canal informada pelo Indicador de Qualidade do Canal (CQI)<sup>13</sup>. Também conta com o mecanismo de re-transmissão HARQ. Este mecanismo pode fazer uso tanto do *chase combining* quanto da redundância incremental para aumentar as chances de uma correta recepção no caso de uma re-transmissão.

---

<sup>9</sup>do Inglês, (RRM), *Radio Resource Management*

<sup>10</sup>do Inglês, (CRRM), *Common Radio Resource Management*

<sup>11</sup>do Inglês, (PC), *Power Control*

<sup>12</sup>do Inglês, (MCS), *Modulation and Coding Scheme*

<sup>13</sup>do Inglês, (CQI), *Channel Quality Indicator*

## Rede Local Sem Fio

A rede WLAN escolhida para integrar o ambiente de MA foi o IEEE 802.11a [38]. Apesar de não ser tão popular quanto as 802.11b e 802.11g, esta versão foi escolhida devido as suas taxas altas, baixa interferência e uso da banda de frequência *Unlicensed National Information Infrastructure* (U-NII). Essa versão compartilha das mesmas características *Medium Access Control* (MAC) das outras versões e uma camada física muito similar à do 802.11g. Portanto, os resultados gerados nessa dissertação podem ser estendidos ao 802.11g. É um sistema de melhor esforço que adota um esquema de múltiplo acesso baseado no *Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance* (CSMA/CA) para o compartilhamento do meio e o esquema de sinalização *Request-to-Send* (RTS)/*Clear-to-Send* (CTS) [39].

O 802.11a opera na banda não licenciada de 5 Ghz [38]. Esta faixa de frequência é dividida em 11 canais não sobrepostos, de forma que dificilmente sofre de interferência co-canal.

### Estrutura da WLAN

A arquitetura de um sistema WLAN pode ser vista na figura 2.2. Os papéis das entidades mostradas são:

- **STA:** O *Station* (STA), é a estação móvel utilizada pelo usuário para acessar a rede WLAN. Contém o terminal WLAN.
- **AP:** O Ponto de Acesso (AP)<sup>14</sup>, é o ponto de conexão utilizado pelos STAs para acessar outras estações ou a rede fixa. Se comporta tal qual um STA porém oferece serviços de distribuição de dados, algo similar a um roteamento.
- **BSS:** O *Basic Service Set* (BSS), é o conjunto de estações que é controlado por uma função de coordenação (geralmente papel de um AP).

---

<sup>14</sup>do Inglês, (AP), *Access Point*

- **DS:** O *Distribution System* (DS), define a interconexão entre as BSSs e possivelmente com a *Internet*. É composto dos backbones de interconexão e o roteador de acesso.
- **ESS:** O *Extended Service Set* (ESS), é uma entidade lógica que consiste em um conjunto de BSSs.

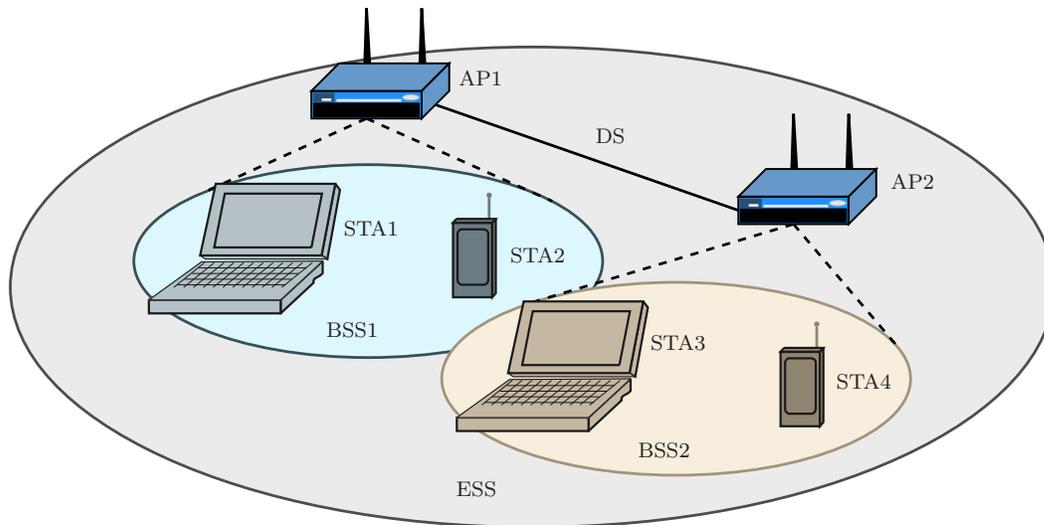


Figura 2.2: Arquitetura de um sistema WLAN

### Aspectos Importantes da Rede WLAN em Relação ao MA

Alguns aspectos do sistema WLAN são mais relevantes para a sua análise dentro do contexto do MA. Tais características são:

- **Esquema de múltiplo acesso.** Ao contrário do que acontece com o sistema UTRAN, o CSMA/CA opera liberando o canal para um usuário por vez e então não sofre de interferência co-canal (interferências de outras fontes podem existir pelo fato de fazer uso de uma banda não licenciada). Devido ao seu esquema de múltiplo acesso, o WLAN sofre de um pobre uso de seu espectro. O tempo de transmissão da carga útil tem que coexistir não só com os cabeçalhos dos protocolos mas também

com as transmissões de sinalização. Portanto, ao aumento de carga, quando um certo limiar seja atingido, o sistema sofre de uma abrupta degradação no seu QoS, devido a uma ocorrência chamada de "efeito avalanche" [40].

- **Gerência de recursos de rádio.** Apesar de algumas propostas de RRM para o WLAN terem sido publicadas, nenhuma foi incorporada às normas do 802.11a. Isto enfatiza a característica de melhor esforço do WLAN, que não se preocupa com controle de qualidade.
- **Camada física e controle de acesso ao meio.** O WLAN 802.11a é capaz de transmitir a taxas de até 54 Mbps. Assim como no caso do UTRAN, o WLAN adota um esquema de AMC com 8 modos de transmissão, escolhidos de acordo com as condições do canal, modulações de ordem mais alta e codificador convolucional.

## 2.3 Tecnologias Habilitadoras das Redes de Multi-Acesso

A rede de MA não depende somente das RATs para seu funcionamento. Entidades, interfaces e protocolos presentes no núcleo da rede definem seu funcionamento e determinam a abrangência de sua operabilidade. Desta forma, para entender o funcionamento de uma rede de MA precisa-se conhecer a sua arquitetura. Nesta seção será mostrada a arquitetura da rede de MA estudada, com ênfase nos elementos necessários para o estudo.

### Gerência Comum de Recursos de Rádio (CRRM)

Uma das entidades mais importantes da rede de MA é o CRRM. Nela se dá o conjunto de regras que controlam todas as operações entre RATs. O CRRM geralmente é uma entidade lógica, situada em um servidor físico. Pode ser centralizado (como visto em [5, 6]) ou distribuído (como em [14]). Como este

trabalho visa a integração da UTRAN com a WLAN, a proposta do 3GPP de um CRRM centralizado [5, 6] foi escolhido.

O relatório técnico [6] também especifica que a CRRM seja instalado nas RNCs ou *Base Station Controllers* (BSCs) (no caso do GERAN). Já que um sistema UTRAN completo pode conter várias RNCs, esse documento também especifica três cenários de localização dos CRRMs, vistos nas figuras 2.3, 2.4 e 2.5.

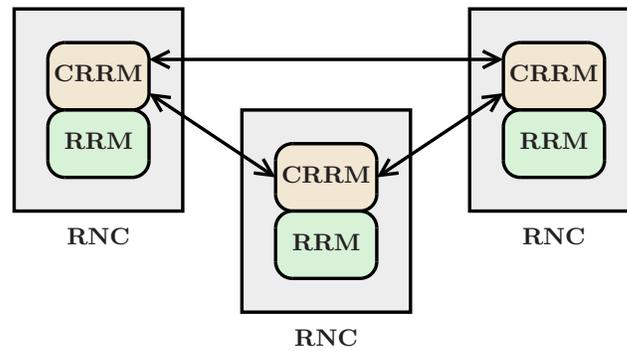


Figura 2.3: Cenário 1: CRRMs instalado em todos RNCs.

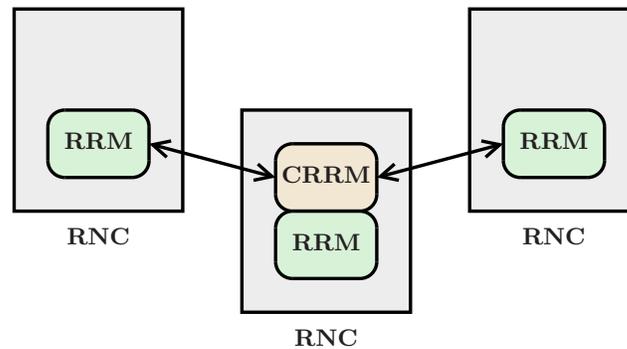


Figura 2.4: Cenário 2: CRRMs instalado em alguns RNCs.

No cenário 1, é especificado que as entidades de CRRM dividam os mesmos servidores do RNCs/BSCs. As interfaces que realizam a suas interconexões, mostradas na figura 2.3, seriam utilizadas majoritariamente para a fins de distribuição de informações. A operação distribuída da CRRM é caracterizada

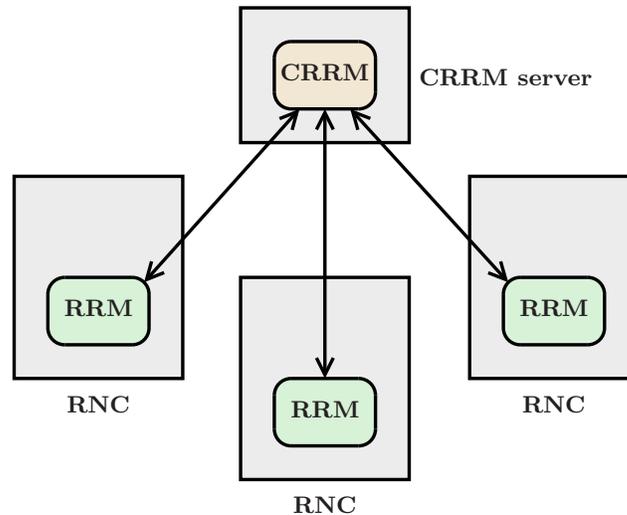


Figura 2.5: Cenário 3: Servidor de CRRM único.

nesse cenário, com seu escopo limitado ao RNC/BSC ao qual pertence. No cenário 2, as entidades de CRRMs dividem o espaço com alguns RNCs/BSCs, como visto na figura 2.4. Nesse cenário, as entidades de RRM vizinhas tanto enviam informações quanto recebem decisões através das interfaces. Este caso representa um cenário semi-distribuído com o um conjunto de RNCs/BSCs sendo o escopo do CRRM. Finalmente, no cenário 3, um servidor de CRRM é adotado, como visto na figura 2.5. Nesse caso, as interfaces transportam tanto informações quanto decisões e caracterizam a arquitetura centralizada. Já que o foco deste trabalho é na integração UTRAN-WLAN – e que a estrutura da rede WLAN não consegue acomodar uma entidade de CRRM –, o cenário 3 foi escolhido para integrar a arquitetura estudada.

Com a discussão das formas de interação entre as RATs e a entidade de CRRM, passamos para a discussão sobre como esse integração se dá a nível de interconexões de estruturas.

## Arquiteturas de Acoplamento

As arquiteturas de acoplamento definem a forma com que as RATs interagem, compartilhando informações de AAA e acesso à *Internet*. De

acordo com [41], as arquiteturas possíveis entre a UTRAN e a WLAN são mostradas na figura 2.6. Nela, as interconexões possíveis entre a rede WLAN e os elementos do CN 3GPP são especificados.

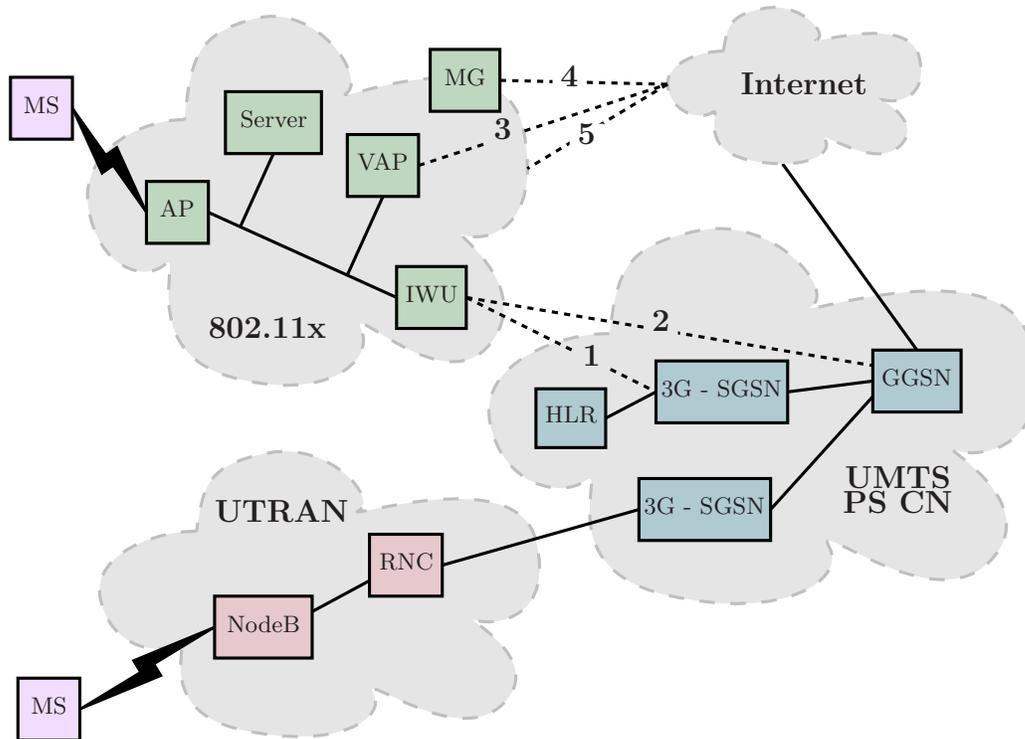


Figura 2.6: Arquiteturas de conexão WLAN-UTRAN

As conexões possíveis são:

### Alternativa de Conexão 1: IWU-SGSN

O *Interworking Unit* (IWU) é uma entidade lógica, localizada no *Access Point Controller* (APC), que faz a interface da WLAN com a UTRAN [41]. Tem funcionalidade de *gateway* e aparece para a UTRAN como uma RNC. Na conexão 1, figura 2.6, o IWU se conecta ao SGSN, fazendo o papel da RNC da UTRAN. Dessa forma, a WLAN opera como escrava da rede UTRAN, com as gerências de mobilidade e segurança ocorrendo em entidades da última. Os usuários conectados à UTRAN ou WLAN são vistos como

usuários UTRAN. Essa conexão implementa o acoplamento forte, descrito anteriormente. Vantagens dessa conexão são a facilidade da manutenção das informações de conta de usuário, a segurança na transmissão de dados provido pelo uso do USIM e mudanças mínimas à rede UTRAN. Como desvantagens podemos citar os gargalos impostos pela infraestrutura da UTRAN e a sinalização extra.

#### **Alternativa de Conexão 2: IWU-GGSN**

Na figura 2.6 a conexão 2 mostra mais uma possível interligação entre as duas RATs envolvendo o IWU. Desta vez, esta entidade se liga ao *Gateway GPRS Support Node* (GGSN). Aqui a situação é bem parecida com a da conexão 1, porém, agora o IWU age como um SGSN. A conexão 2 também configura um acoplamento forte. As suas desvantagens são gargalos e sinalização. A sua vantagem sobre a estratégia anterior é a redução de cabeçalhos e a possibilidade de pode oferecer altas taxas para o WLAN, caso a GGSN seja pré-configurada para uma largura de banda maior.

#### **Alternativa de Conexão 3: *Virtual Access Point* (VAP)**

O VAP inverte os papéis das redes UTRAN e WLAN no que diz respeito à relação mestre-escravo. O sistema UTRAN passa a ser reconhecido como um AP para o WLAN. Agora, a mobilidade é gerenciada pelo protocolo *Inter Access Point Protocol* (IAPP) e o VAP faz com que a rede UTRAN inteira seja vista como uma BSS. Essa estratégia não oferece vantagens claras sobre as outras, no entanto, ainda não é claro como se dará o funcionamento em conjunto do VAP com outros APs. Além disso, mais cabeçalhos serão incluídos, reduzindo a eficiência no transporte de dados.

#### **Alternativa de Conexão 4: *Mobility Gateway* (MG)**

O MG é uma espécie de servidor *proxy* que fica situado entre as redes UTRAN e WLAN. Todos os acessos à rede externa são roteados por este servidor. Desta forma, ele divide a conexão em duas partes: estação móvel

- servidor *proxy* e servidor *proxy* - rede externa. Quando a estação móvel sofre uma troca de RAT apenas a conexão estação móvel - servidor *proxy* é reestabelecida para nova RAT. Do ponto de vista do servidor na rede externa, a conexão se mantém a mesma, e desta forma não há quebra de contexto. Neste caso o roteamento é simplificado e a sinalização diminuída. O servidor *proxy* pode ainda agir baseado no contexto do serviço, filtrando os dados de forma a otimizar a conexão em baixas taxas. No entanto, há adição de novos protocolos e também a quebra da semântica fim-a-fim do *Transport Control Protocol* (TCP)/*Internet Protocol* (IP). Além destes fatos, a estrutura baseada em *proxies* não foi padronizada, restringindo a solução à estratégias proprietárias.

### Alternativa de Conexão 5: *Mobile IP*

A quinta conexão baseia-se na estratégia do *Mobile-IP*. Aqui a ligação entre as redes envolve a própria *Internet*, não havendo ligação dedicada entre as duas RATs. Este caso implementa a ausência de acoplamento. Aqui, há o emprego de dois agentes, o *Home Agent* (HA) e o *Foreign Agent* (FA). No momento da conexão inicial, a estação móvel recebe uma identificação chamada de *Care of Address* (COA), associada com o ponto inicial de conexão. Qualquer pacote a ele destinado é processado pelo HA, que o roteia ao destino. Já o FA se encarrega de redirecionar os pacotes recebidos da estação móvel ao seu destino, ou ao HA correspondente através de um túnel, afim de ser roteado ao seu destino.

### Arquitetura de Acoplamento Adotada

No caso específico da rede de MA UTRAN-WLAN, os operadores tem buscado uma relação entre o custo inerente e o benefício oferecido. É uma questão importante, já que apesar da popularidade e taxas elevadas do WLAN, devemos notar que sua integração a uma rede celular 3G, como a UTRAN, não é uma tarefa fácil. Para atingir uma bom nível de mobilidade, o acoplamento forte se faz necessário, juntamente com elementos de rede e

infraestruturas de interconexão. Apesar dos custos envolvidos na instalação desse nível de acoplamento, é esperado que aumento de desempenho justifique os investimentos. No entanto, não devemos esquecer que problemas como os cabecalhos, sinalização, gargalos de transmissão e atrasos inerentes aos procedimentos podem limitar o desempenho esperado. No acoplamento fraco infraestrutura também é necessária para permitir o uso integrado das entidades de AAA e segurança, mas como o desempenho da mobilidade é inferior, o custo extra pode não compensar. Finalmente, há a possibilidade de adotar o total desacoplamento das RATs. No entanto, a cooperação entre as RATs seria sacrificada.

Como este trabalho foca principalmente no desempenho e não em questões como custo, o acoplamento forte foi preferido, por prover uma maior integração entre as RATs.

## 2.4 Considerações Finais

Neste capítulo introduzimos a definição, história e estado da arte em termos de redes de MA. Seus procedimentos, objetivos e níveis de acoplamento foram apresentados. A rede de MA escolhida foi apresentada, com ênfase em suas RATs participantes e questões de integração. No próximo capítulo apresentaremos em detalhes um procedimento essencial para a rede de MA e foco deste trabalho: a seleção de acesso.



# Capítulo 3

## Seleção de Acesso

A Seleção de Acesso (AS)<sup>1</sup> é uma operação fundamental para a cooperação das Tecnologias de Acesso de Radio (RATs)<sup>2</sup>, decidindo para qual delas um novo usuário deve conectar. Nesse capítulo, os conceitos envolvendo a seleção de acesso em redes Multi-Acesso (MA) serão detalhados. Inicialmente, a AS será descrita na seção 3.1. Em seguida as estratégias de AS estudadas neste trabalho são apresentadas na seção 3.2. Por fim, as considerações finais são apresentadas na seção 3.3.

### 3.1 Seleção de Acesso em Redes de Multi-Acesso

A AS é o procedimento no qual a decisão do acesso inicial de um usuário é tomada. Ela ocorre no momento da chegada de um novo usuário à rede de MA. A entidade de Gerência Comum de Recursos de Rádio (CRRM)<sup>3</sup> deve selecionar em qual das RATs disponíveis esse usuário deve conectar. A AS deverá ser capaz de alocar da melhor forma os usuários, evitando uma possível situação de congestionamento. É portanto um procedimento muito importante, visto que, se realizada de forma descuidada, pode levar a uma situação na qual uma RAT tem sua capacidade máxima violada enquanto as

---

<sup>1</sup>do Inglês, (AS), *Access Selection*

<sup>2</sup>do Inglês, (RAT), *Radio Access Technology*

<sup>3</sup>do Inglês, (CRRM), *Common Radio Resource Management*

demais estão operando abaixo de seus limites. Na seqüência, definimos a AS de acordo com seus critérios e restrições.

## Definição

O funcionamento básico de um algoritmo de AS é mostrado na figura 3.1. Nela, um usuário  $i$  recém chegado sofrerá a decisão do algoritmo de AS que usa a função  $f$  para selecionar a RAT dentre as disponíveis  $(1, 2, \dots, n)$ .

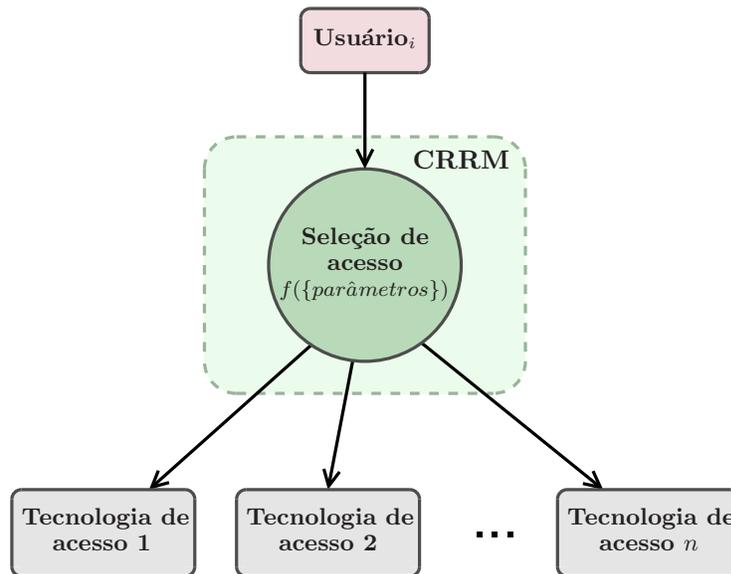


Figura 3.1: Seleção de Acesso

Portanto, podemos dizer que a AS é representada pela equação:

$$RAT_i = f(\{parâmetros\}) \quad (3.1)$$

sendo,  $\{parâmetros\}$  qualquer sub-conjunto do conjunto possível de parâmetros da função de AS  $f$  e  $RAT_i$ , a RAT escolhida para o usuário  $i$ .

A AS depende de três aspectos: os critérios modelados por  $f$  para a decisão do acesso, os indicadores de desempenho, modelados pelos parâmetros, e as restrições, intrínsecas à função de AS. A seguir detalharemos cada um destes aspectos.

## Critérios

A função que representa a AS é baseada em um ou mais critérios, usados para determinar como esta decisão será tomada. Esses critérios são regras adotadas para a AS e podem variar desde a detecção de cobertura de uma RAT específica à maximização de alguma medida, como por exemplo, a taxa de transmissão de dados.

## Indicadores de Desempenho

Para a tomada de decisão, a AS depende de medidas de desempenho do ponto de vista do usuário ou da rede como um todo para cada RAT participante. Estas métricas são chamadas de Indicadores de Desempenho (PIs)<sup>4</sup> e podem trazer informações como cobertura, taxa de transmissão de dados, vazão agregada, vazão prevista do usuário e carga da RAT. Do ponto de vista da equação 3.1, os PIs são os parâmetros de  $f$ , sendo escolhidos de acordo com a sua relevância para a AS.

## Restrições

Por fim, existem ainda as restrições as quais  $f$ , na equação 3.1, está sujeita. Estas restrições podem refletir as limitações do usuário, serviço ou RAT e são geralmente incorporadas na função  $f$  ou seus parâmetros. Algumas destas restrições são listadas na tabela 3.1.

## Processo de Seleção de Acesso Simplificado

A AS é constituída de um conjunto de procedimentos de rede que culminam na associação de um o usuário a uma RAT. Esses procedimentos são mostrados, de forma abrangente, na figura 3.2 para o caso em que duas RATs estão envolvidas, podendo ser extrapolado para qualquer número de RATs. No início do procedimento, dá-se o evento de ativação da estação móvel, que deve consistir de dois terminais. Nesse momento ambos os terminais iniciam

---

<sup>4</sup>do Inglês, (PI), *Performance Indicator*

Tabela 3.1: Restrições e suas classificações

<b>Restrição</b>	<b>Breve descrição</b>
<b>Ponto de vista do usuário</b>	
Perfis de assinatura	Prioridade no acesso a um serviço, por exemplo: <i>normal</i> , <i>premium</i> ou <i>gold</i> .
Localização	Restrições quanto à abrangência do ponto de acesso, por exemplo: <i>hotspot</i> ou macro-celular.
Mobilidade	Usuários veiculares ou pedestres
Custo da assinatura	Custos distintos para cada RAT limitando o acesso pelo orçamento do usuário.
<b>Ponto de vista do serviço</b>	
Atraso máximo	Atraso máximo suportado pelo serviço para a garantia da qualidade mínima aceitável.
Vazão mínima	Vazão mínima suportada pelo serviço para a garantia da qualidade mínima aceitável.
Taxa de perda de pacotes máxima	Taxa de perda de pacotes máxima suportada pelo serviço para a garantia da qualidade mínima aceitável.
<b>Ponto de vista da rede</b>	
Carga máxima suportada	Carga máxima suportada pelo sistema, onde, acima da mesma haverá degradação na vazão agregada da rede.
Interferência máxima suportada	Nível máximo de interferência que o sistema comporta.
Vazão máxima suportada	Máxima vazão disponível na rede para um usuário.

o processo de busca de rede tal qual especificados nos padrões de cada RAT. No evento de um ou mais terminais terem sinal suficiente para a conexão, as medidas dos seus PIs são iniciados. Já no caso de que o nível de sinal não seja forte o suficiente, este se mantém no estado de busca, avaliando o canal em intervalos regulares. Após a realização destas medidas, uma requisição de conexão é enviada à entidade de CRRM. Ao receber essa requisição, a entidade de CRRM processa os PIs e as políticas de AS para decidir qual

RAT se adequa mais às necessidades dos usuários. Quando essa escolha é realizada, a decisão é informada à estação móvel, que ativa a transmissão de dados para o terminal contemplado. O outro terminal passa para modo de busca e pode ser ativado em um momento posterior no caso de um *Vertical Handover* (VHO) ou controle de congestionamento.

## Classificação da Seleção de Acesso

As técnicas de seleção de acesso podem ser divididas de acordo com os seus critérios. Pode-se classificar a seleção de acesso em:

- **Orientado a cobertura.** Não leva em consideração as condições das RATs ou do usuário a conectar. Os algoritmos que selecionam a RAT quando sob sua cobertura podem ser tomados como exemplo desta classificação. A simplicidade é sua maior vantagem, já que esses algoritmos não requerem troca de informações e medidas, além da presença do sinal.
- **Orientado a serviço.** A classificação se concentra nos tipos de serviços mais adequados às RATs. Usuários de voz poderiam ser assinalados a uma rede orientada a circuito, enquanto os de *World Wide Web* (WWW) seriam associados às redes orientadas a pacotes. Um exemplo para essa classificação é o algoritmo proposto por Furuskär em [18].
- **Orientada a usuário.** Leva em consideração as condições do usuário quando conectado a uma RAT como, por exemplo, sua taxa de transmissão, vazão estimada, atraso de pacotes ou satisfação. Uma desvantagem desses algoritmos é que somente as condições dos usuários são usadas, desconsiderando as das RATs. Isto introduz a possibilidade de usuários serem assinalados a uma RAT que não tem condições de servi-los. Um algoritmo que se encaixa nessa categoria é apresentado em [19].
- **Orientada a Tecnologia de Acesso de Rádio.** Esta classificação inclui todos as abordagens de AS que focam as condições das RATs

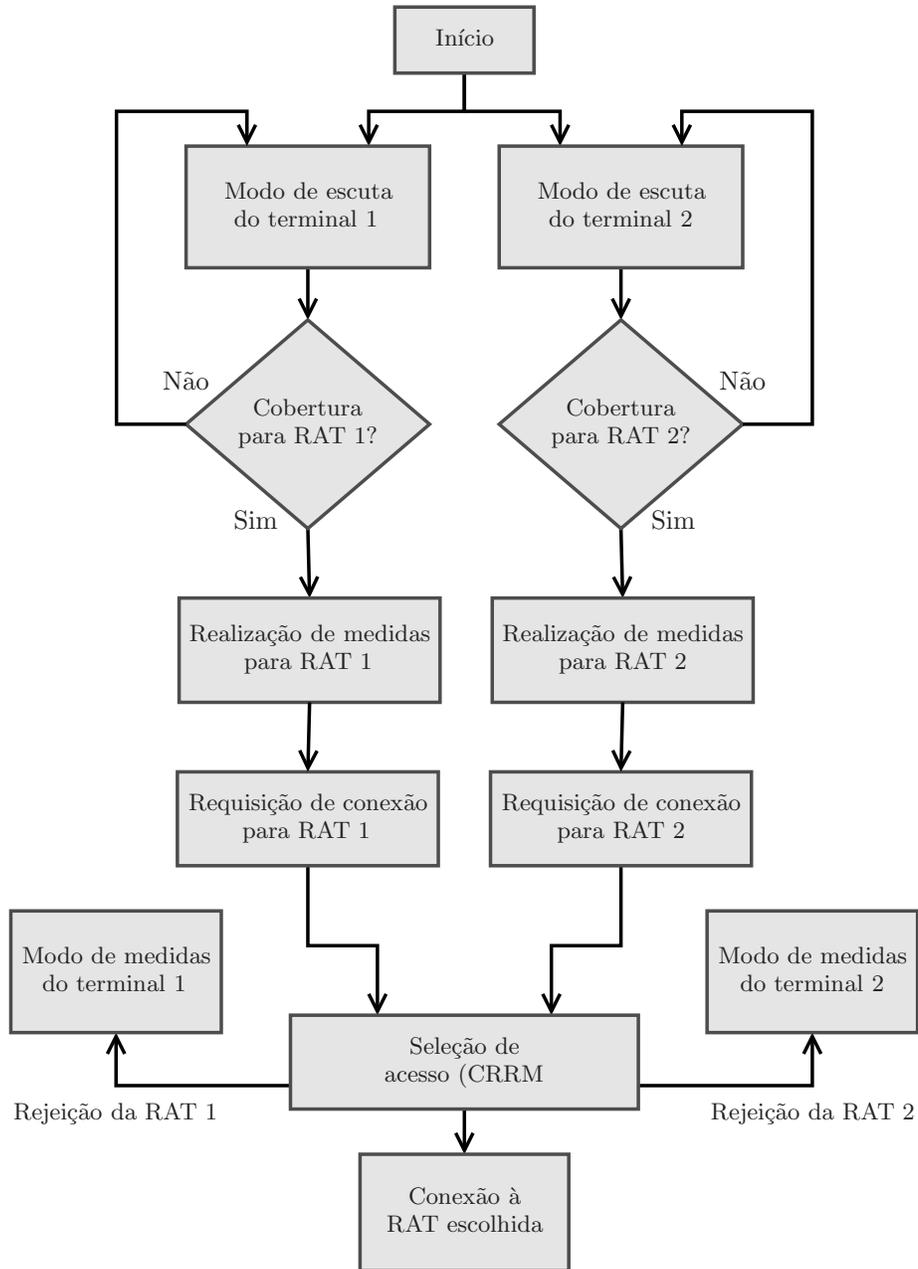


Figura 3.2: Fluxograma do procedimento de Seleção de Acesso.

como capacidade, carga e vazão agregada. Alguns desses algoritmos pode incluir estimativas do impacto que o usuário irá causar na

Tabela 3.2: Convenções adotadas

Convenção	Descrição
$X^U$	$X$ refere ao UTRAN
$X^W$	$X$ refere ao WLAN
$Y_i$	$Y$ refere ao usuário $i$

Qualidade de Serviço (QoS)<sup>5</sup> dos demais já conectados. Assim como no caso orientado a usuário, predição é necessária o que pode requerer recursos computacionais e de sinalização adicionais. Um exemplo desta classificação pode ser visto em [26].

- **Orientada a RAT e usuário.** Agora, ambas as condições dos usuários e das RATs são empregadas na AS. Para estes algoritmos, é necessário prever as condições que usuário irá experimentar e o efeito que este irá causar na rede, quando conectado. Portanto, é esperado que estas abordagens sejam mais complexas que as anteriores. O algoritmo proposto, mostrado no final deste capítulo, se enquadra nesta categoria.

## 3.2 Abordagens Estudadas

Nesta seção, os algoritmos de AS abordados neste trabalho serão expostos. Visando facilitar o entendimento da matemática apresentada, a tabela 3.2 resume as convenções adotadas. Já que a discussão a ser apresentada inclui previsões de implementações relativas à rede de MA *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN)-Rede Local Sem Fio (WLAN)<sup>6</sup>, os algoritmos serão descritos de acordo com este cenário. Aqui o UTRAN será referido como sistema macro-celular e o WLAN como sistema *hotspot*.

### Seleção por Cobertura

De maneira simplificada, a AS baseada em cobertura decide pela RAT que serve o *hotspot* quando o usuário percebe sua cobertura. Esse algoritmo de

<sup>5</sup>do Inglês, (QoS), *Quality of Service*

<sup>6</sup>do Inglês, (WLAN), *Wireless Local Area Networks*

AS é usado, por exemplo, por Yilmaz *et al.* em [19, 20]. Nesse trabalho, a presença da cobertura é considerada quando a distância do usuário ao Ponto de Acesso (AP)<sup>7</sup> é menor que o valor especificado. Um algoritmo similar é adotado no trabalho por de Sousa Jr. *et al.* [23]. Já que este trabalho é baseado em uma modelagem mais realista da rede de MA escolhida, a AS baseada na cobertura teve de ser ajustada de acordo.

O algoritmo de AS por cobertura, doravante chamado de *Coverage Threshold Algorithm* (CTA), baseia seu teste de cobertura no nível de sinal percebido, que é medido através da *Signal-to-Noise Ratio* (SNR). Para o CTA, a equação 3.1 pode ser redefinida como:

$$RAT_i = f(SNR_i^W) \quad (3.2)$$

sendo,  $RAT_i$  é a RAT, escolhida para a conexão do usuário  $i$ ,  $SNR_i^W$  é a sua SNR para a WLAN e  $f$  é dado por,

$$RAT_i = \begin{cases} \text{WLAN,} & \text{se } SNR_i^W \geq \text{limiar} \\ \text{UTRAN,} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.3)$$

sendo, *limiar* o limiar de cobertura, i.e., a SNR mínima requerida para a conexão do ponto de vista da WLAN.

A única restrição no caso do CTA é, portanto, o limiar de SNR mínima para a cobertura. Esse limiar é fruto do projeto de implantação da rede WLAN, na fase de planejamento do enlace de rádio.

Este algoritmo de AS é bastante interessante, já que não requer nenhuma inteligência extra. Sua implementação para a rede de MA UTRAN-WLAN requer apenas uma requisição de conexão para os APs WLAN dos quais a estação móvel detectou cobertura. O CRRM por sua vez precisa apenas consultar uma lista de regras, no caso exposto “conectar à WLAN caso haja cobertura”, e realizar a decisão

---

<sup>7</sup>do Inglês, (AP), *Access Point*

É esperado que a escolha da WLAN para o acesso inicial seja uma boa decisão, já que esta oferece as maiores taxas e tem maior capacidade se comparada à UTRAN. Desta forma, o CTA consegue aliar bom desempenho à simplicidade de implementação. Entretanto, o CTA não consegue resolver os casos em que apesar de haver cobertura para a WLAN, a conexão à UTRAN é mais interessante. Estas situações podem ser associadas com uma condição de enlace pobre no WLAN ou com um congestionamento nesta RAT.

### Seleção por Taxa de Transmissão

A abordagem baseada em taxa de transmissão utiliza esta medida de enlace para cada RAT afim de decidir para qual delas o usuário será assinalado. Como no caso do CTA, esse algoritmo de AS foi inicialmente proposto por Yilmaz *et al.* em [19, 20] e em seguida foi avaliado por de Sousa Jr. *et al.* em [23]. Como visto nesses trabalhos, o algoritmo baseado em taxa, doravante chamado de *Rate Maximization Algorithm* (RMA), usa a informação da taxa de transmissão de dados da camada física que é estimada a partir da análise conjunta do modo de transmissão do usuário baseado na sua SNR. Para uma dada SNR, o modo de transmissão especifica a modulação, o tamanho do bloco de transmissão e a taxa de codificação. A leitura desta taxa é realizada tal qual mostrado na figura 3.3.

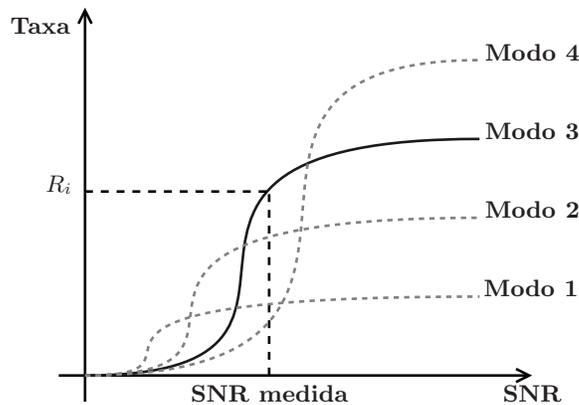


Figura 3.3: Leitura da taxa de transmissão da camada física baseada no modo de transmissão.

A função de seleção de acesso para o RMA é,

$$RAT_i = f(R^U(SINR_i^U), R^W(SNR_i^W)) \quad (3.4)$$

sendo,  $R^U(SINR_i^U)$  a taxa vista na UTRAN dado a *Signal-to-Interference plus Noise Ratio* (SINR) do usuário neste sistema,  $R^W(SNR_i^W)$  o equivalente para a WLAN e  $f$  dado por,

$$RAT_i = \begin{cases} \text{WLAN,} & \text{se } R^W(SNR_i^W) \geq R^U(SINR_i^U) \\ \text{UTRAN,} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.5)$$

O RMA é um algoritmo classificado como *orientado a usuário*, já que leva em consideração apenas as condições do usuário. Seu desempenho esperado é superior ao do CTA, já que escolhe a rede que oferece maior taxa de transmissão, favorecendo os usuários com enlaces de rádio ruins para o WLAN. Da mesma forma que com o CTA, espera-se que o RMA tenha baixo desempenho em casos nos quais a WLAN encontra-se congestionada.

O RMA usa as taxas de transmissão do enlace direto como métrica de decisão. Já que o algoritmo usa uma informação prontamente disponível nas estações rádio-base e pontos de acesso, sua implementação é um tanto simplificada. Essa informação pode ser coletada da *Radio Network Controller* (RNC) (no caso do UTRAN) ou do *Interworking Unit* (IWU) (no caso do WLAN) pela CRRM quando necessário.

## Seleção por Vazão

O *Estimated RAT Throughput Algorithm* (ERT) é um algoritmo orientado à rede, baseado na estimativa da vazão da RAT. Esse algoritmo foi inicialmente proposto por de Sousa Jr. *et al.* em [26]. A métrica é baseada na estimativa da vazão média do sistema. É calculada como a média das vazões de todos os usuários conectados a uma RAT. A equação 3.6 mostra essa estimativa para uma rede  $k$  com  $N^k$  usuários conectados.

$$T_i^k = \frac{1}{N^k} \sum_{i=1}^{N^k} T_i^k \quad (3.6)$$

A função AS deste algoritmo é,

$$RAT_i = f(T_i^U, T_i^W) \quad (3.7)$$

sendo,  $T^U$  a vazão estimada de acordo com a equação 3.6 na UTRAN,  $T^W$  a vazão estimada da mesma forma na WLAN e  $f$  dado por,

$$RAT_i = \begin{cases} \text{WLAN,} & \text{se } T_i^W \geq T_i^U \\ \text{UTRAN,} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3.8)$$

É esperado que o ERT ofereça vantagens em relação ao CTA, já que os usuários que tentam conexão para a WLAN e experimentam uma baixa vazão estimada, serão alocados para UTRAN. No entanto, a estimação da vazão não leva em consideração as condições do enlace do usuário, e o mesmo pode conectar a uma RAT, para a qual uma baixa taxa de transmissão é vista, caracterizando uma situação indesejável. Além deste fato, vale ressaltar que esta estimativa de vazão é grosseira, já que usuários recém conectados e com poucos dados transmitidos podem aumentar o espalhamento estatístico da medida (poucas amostras).

Em termos de implementação, o ERT é mais complexo que os algoritmos anteriormente expostos, já que depende do histórico de todas as transmissões dos usuários conectados em uma RAT específica. Como esta vazão é medida a nível de aplicação, essa métrica não está prontamente disponível na estação de rádio-base, APs ou nas RNCs. Desta forma, a vazão deve ser reportada da estação móvel e salva na estação de rádio-base. No entanto, isto requereria memória extra, sinalização adicional sobre a interface aérea e protocolos de relatórios que ainda não foram definidos.

## Seleção por Função Utilidade

O algoritmo baseado em função utilidade, doravante chamado de *Utility-based Algorithm* (UTA) é um algoritmo orientado a usuário e RAT. Utiliza a taxa de transmissão de enlace do usuário e o atraso de pacotes médio da RAT. Esse algoritmo foi inicialmente proposto por de Sousa Jr. *et al.* em [26]. Sua função utilidade é descrita por:

$$U_i^k = \frac{R_i^k}{DL^k}, \quad (3.9)$$

onde  $R_i^k$  é a taxa de transmissão de enlace do usuário em questão na RAT  $k$  e  $DL^k$  corresponde ao atraso médio de pacotes de todos os usuários nesta RAT.

O algoritmo de AS do UTA é descrito por:

$$RAT_i = f(U_i^U, U_i^W), \quad (3.10)$$

onde  $f$  é:

$$RAT_i = \begin{cases} \text{WLAN} , & \text{se } U_i^W \geq U_i^U \\ \text{UTRAN} , & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.11)$$

O UTA beneficia-se da combinação usuário-RAT que provê maiores taxas e menores atrasos de pacote. Sendo orientado a usuário e RAT, é esperado que este algoritmo ofereça vantagens sobre todos os anteriores, já que considera as condições de usuário e de rede (o atraso médio de pacotes da rede pode ser considerado uma forma de medida de carga). Esta expectativa é apoiada por Yilmaz em [20].

## Seleção por Tamanho da Fila

A abordagem baseada em fila de pacotes também é classificada como orientada à usuário e RAT. O algoritmo desta abordagem, chamado de *Queue-based Algorithm* (QBA), constitui a nossa proposta de algoritmo de

AS inteligente. Sua maior diferença do UTA reside no fato de que ele usa o tamanho da fila de pacotes do ponto de conexão (setor no UTRAN e AP no WLAN) para estimar a carga da RAT. Uma fila de pacotes cheia significa que a RAT não está sendo capaz de servir o tráfego oferecido, enquanto uma fila de pacotes pequena significa que a RAT está ociosa. Neste caso, uma função utilidade também é definida como:

$$Q_i^k = \frac{R_i^k}{Nb^k}, \quad (3.12)$$

onde  $R_i^k$  é a taxa de transmissão de enlace do usuário em relação à RAT  $k$  e  $Nb^k$  corresponde ao número de *bits* esperando na fila de transmissão do ponto de conexão requisitado da RAT.

A seleção de acesso QBA é dado por:

$$RAT_i = f(Q_i^U, Q_i^W), \quad (3.13)$$

onde  $f$  é:

$$RAT_i = \begin{cases} \text{WLAN} , & \text{se } Q_i^W \geq Q_i^U \\ \text{UTRAN} , & \text{caso contrário.} \end{cases} \quad (3.14)$$

Como no caso do UTA, o QBA se beneficia de levar em consideração ambas as condições de usuário e da RAT. Em termos de desempenho, é esperado que o QBA tenha um desempenho ligeiramente pior que o do UTA, já que o número de *bits* na fila não é uma medida confiável de carga. Isto acontece devido à diferença das taxas de enlace providas pelas RATs. Então, apesar de um grande número de *bits* na fila de transmissão indicar uma sobrecarga em uma RAT, esta pode esvaziar a fila de transmissão mais rapidamente que uma outra RAT cuja fila está vazia. Não obstante, as perdas do QBA em relação ao UTA podem ser compensadas pela sua maior simplicidade de implementação, já que a primeira depende do número de *bits* presente na fila de transmissão, uma métrica prontamente disponível nas entidades correspondentes e, portanto, requer apenas pequenas modificações na infra-estrutura existente.

### 3.3 Considerações Finais

Neste capítulo, o conceito de AS foi introduzido e discutido. Sua definição, procedimento, características e classificações foram descritas e usadas como fundamentação das abordagens apresentadas. Os algoritmos de AS CTA, RMA, ERT, UTA e QBA foram discutidos com suas vantagens e desvantagens esperadas.

Os algoritmos apresentados servirão como base para a análise de desempenho executada nesse trabalho. No próximo capítulo, a ferramenta de simulação que comporta esses algoritmos será apresentada em detalhes, com ênfase na sua modelagem.

# Capítulo 4

## Modelagem, Metodologia e Cenários

Redes celulares, como as redes de Multi-Acesso (MA), são sistemas complexos envolvendo diversos processos estocásticos. A representação detalhada de seu funcionamento é uma tarefa difícil, sendo impossível de ser executada usando modelagem puramente analítica. Nesse caso, o uso de simuladores torna-se indispensável, possibilitando emular este sistema complexo, para prever seu comportamento sujeito às condições que se deseja estudar.

Este capítulo tratará da metodologia adotada para a avaliação de desempenho executada neste trabalho. Na seção 4.1, os itens do estudo serão expostos, mostrando como a avaliação será conduzida. Em seguida, a modelagem do simulador utilizado será mostrada nas seção 4.2. Na sequência, será realizada uma discussão sobre as métricas adotadas para a análise de desempenho na seção 4.5. Em seguida, na seção 4.6, os cenários utilizados na avaliação serão mostrados.

### 4.1 Itens de Estudo

Para que o estudo realizado no presente trabalho seja proveitoso e que seus resultados sejam aplicáveis em situações realistas, é necessário uma criteriosa definição da abordagem do estudo e da seleção de cenários. Esta seleção de

cenários será mostrada em detalhes na seção 4.6. Na presente seção, os itens de estudo serão levantados para cada um dos objetivos do trabalho.

## Impacto da Adição de um AP WLAN à UTRAN

Para lidar com as crescentes demandas de capacidade e Qualidade de Serviço (QoS)<sup>1</sup>, as operadoras de rede celulares dispõem de uma solução eficiente em termos de custo: a adoção de outra Tecnologia de Acesso de Rádio (RAT)<sup>2</sup> para complementar o seu conjunto de recursos de rádio. A adição de uma segunda RAT à original requer um nível de cooperação entre elas para manter as conexões o mais transparente possível em termos de seleção de RAT e gerência de mobilidade. Essas características podem ser providas pelas redes de MA.

Apesar da adição de outra RAT parecer tentadora, os ganhos envolvidos não são óbvios e precisam ser apontados. Para apreciar melhor esses ganhos, o estudo que diz respeito ao impacto da adição de um Ponto de Acesso (AP)<sup>3</sup> Rede Local Sem Fio (WLAN)<sup>4</sup> a uma *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN) é dividido em duas abordagens: **homogênea** e **heterogênea**.

A parte homogênea investiga o caso no qual um operador de rede celular UTRAN quer adicionar um AP WLAN usando a abordagem de MA para aumentar a capacidade e QoS. Isso seria bastante interessante na situação em que esta operadora quer lidar com uma condição de sobrecarga, oferecendo mais recursos sob demanda. A análise procura estabelecer quais os ganhos de desempenho ao adicionar um AP WLAN a uma UTRAN e se estes ganhos são palpáveis a ponto de justificar esta adição. Esta questão não tem resposta simples, já que apesar da WLAN contribuir com altas taxas em comparação à UTRAN, a cobertura do AP é muito pequena o que faz com que essas taxas sejam disponíveis apenas a uma pequena porção de usuários.

---

<sup>1</sup>do Inglês, (QoS), *Quality of Service*

<sup>2</sup>do Inglês, (RAT), *Radio Access Technology*

<sup>3</sup>do Inglês, (AP), *Access Point*

<sup>4</sup>do Inglês, (WLAN), *Wireless Local Area Network*

A parte heterogênea investiga o caso no qual um operador de rede celular quer servir uma condição de *hotspot* com a adição de um AP WLAN, usando o arcabouço de MA. Esse caso é também muito interessante já que o *hotspot* é servido pela WLAN ao invés de sobrecarregar a UTRAN, uma situação que sacrifica o desempenho dos usuários tanto dentro quanto fora do *hotspot*. Na abordagem heterogênea, a análise é similar ao do caso homogêneo, só que desta vez o AP WLAN é posicionado sobre um *hotspot*, cuja densidade de usuários é superior à densidade do resto da área de cobertura. Apesar dos ganhos dessa situação serem mais claros, ainda é interessante quantificá-los.

Para as duas abordagens, a avaliação é iniciada com a análise do desempenho da UTRAN sem o emprego do MA. Em seguida, a análise de desempenho será repetida com um AP WLAN posicionado no centro do setor UTRAN. Os resultados serão comparados entre si e o impacto da adição será registrado.

### **Avaliação dos Algoritmos de Seleção de Acesso**

Nesse item de estudo, a investigação foca em como um operador de rede celular pode melhorar os ganhos da adição do AP WLAN operando sobre um *hotspot* com uma melhor abordagem de Seleção de Acesso (AS)<sup>5</sup>. Para a avaliação dos algoritmos de AS, apenas a *abordagem heterogênea* será empregada. Nesta análise, um AP WLAN será posicionado sobre um *hotspot* localizado no centro do setor UTRAN. Procura-se classificar quais os algoritmos fornecem os maiores ganhos. A avaliação também analisa como esses ganhos se comportam em termos de cargas relativas entre as duas RATs.

## **4.2 Modelagem para Simulador de Multi-Acesso**

Para a avaliação neste trabalho, um simulador sistêmico e dinâmico foi construído. Simuladores sistêmicos visam modelar o comportamento da rede

---

<sup>5</sup>do Inglês, (AS), *Access Selection*

celular como um todo, representando seu funcionamento, uso de recursos e funcionalidades. Já os simuladores dinâmicos visam modelar o dinamismo dos sistemas que compõe a rede celular, suas características de tráfego de dados, nascimento e morte de usuários, mobilidade e variações nas condições de canal.

O simulador de MA foi construído baseado em *Object-Oriented Programming* (OOP) usando a linguagem C++. Conceitos de orientação a objeto foram adotados com o intuito de fomentar a reusabilidade e a modularidade. Dessa forma, o simulador é escalável, permitindo futuras adições de blocos ou de RATs, se necessário.

De forma sucinta, podemos descrever o funcionamento do simulador de MA, como mostrado na figura 4.2. O ciclo de vida de um usuário inicia-se com seu nascimento, onde este é configurado com um ou mais terminais de acesso, perfil de mobilidade e tipo de sessão de dados. Em seguida, o usuário sofre o processo de AS, onde será determinado para qual RAT será encaminhado. Quando conectado, o usuário inicia seu tráfego de dados. Tão logo a sessão de tráfego acabe, as suas métricas referentes à RAT são calculadas e armazenadas. Por fim, os procedimentos de finalização da sessão e do usuário são realizados.

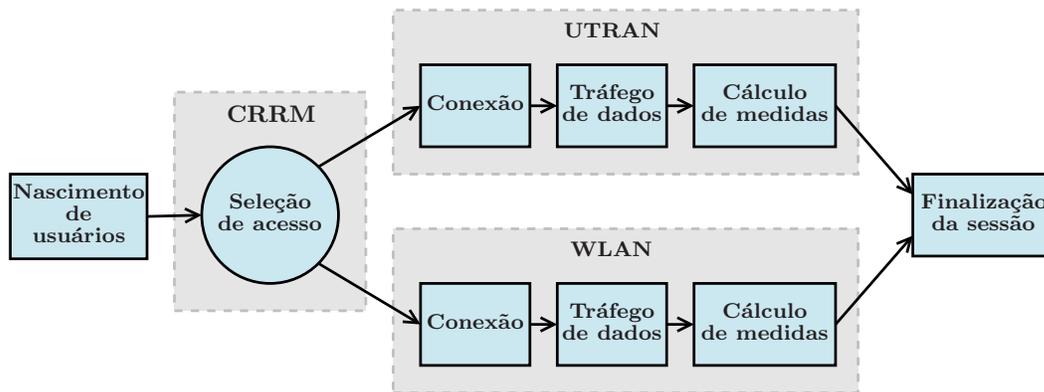


Figura 4.1: Funcionamento simplificado do simulador de MA.

Para melhor entendimento de como o simulador de MA realiza essas operações, deve-se olhar detalhadamente suas partes. De forma abrangente, a estrutura do simulador de MA pode ser vista na figura 4.2. O simulador

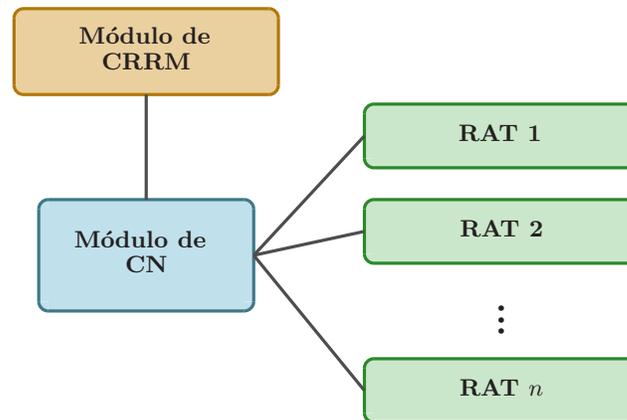


Figura 4.2: Simulador de MA visto de forma abrangente.

é dividido em módulos de Núcleo de Rede (CN)<sup>6</sup>, RAT (1,2,...,n) e Gerência Comum de Recursos de Rádio (CRRM)<sup>7</sup>. O módulo de CN é responsável pela conexão entre todos os outros módulos, permitindo que haja troca de informações. As características das RATs e interfaces aéreas são emuladas pelos módulos de RAT. O módulo de CRRM toma conta dos procedimentos de gerência de recursos de rádio, como a AS. Até o momento, apenas duas RATs foram implementadas, a UTRAN e a WLAN.

Nesta seção, as principais sub-divisões do simulador de MA, serão detalhados. Na sequência, os blocos comuns e independente das RATs serão apresentados, seguido dos módulos de CN e CRRM. Em seguida, os módulos das RATs serão apresentados. Contudo, para entender como esses blocos integram entre si, iniciaremos com uma apresentação da gerência de simulação.

## Gerência de Simulação

A gerência de simulação organiza a execução de todas as funcionalidades do simulador. Entre outras características, controla o tempo de simulação, que é um aspecto chave da simulação dinâmica. Uma ilustração das atribuições da gerência de simulação pode ser vista na figura 4.3, onde o laço principal da

<sup>6</sup>do Inglês, (CN), *Core Network*

<sup>7</sup>do Inglês, (CRRM), *Common Radio Resource Management*

simulação é mostrado. A simulação começa com sua inicialização, momento no qual toda a configuração inicial ocorre, com o carregamento de mapas de propagação, construção do sistema e posicionamento de APs e células. Tão logo a simulação comece, os processos de nascimento de usuários geram novos usuários que serão enviados às RATs. Então, a gerência de simulação executa uma interação de cada RAT. Na sequência, a entidade de CRRM é chamada para processar todos os eventos entre sistemas. Por fim, todas as mobilidades de usuários são atualizadas e os procedimentos de finalização de sessão ocorrem.

A ferramenta de simulação de MA é simultaneamente orientada a evento e a tempo. A gerência de simulação e o módulo UTRAN compõem a parte orientada a tempo, enquanto o módulo WLAN compõe a parte orientada a evento. Portanto, o tempo de simulação é controlado com um paradigma de orientação a tempo, e a parte orientada a evento foi ajustada para funcionar de acordo. O tempo de simulação é incrementado em passos que consistem no *slot* do UTRAN (0.6667 ms).

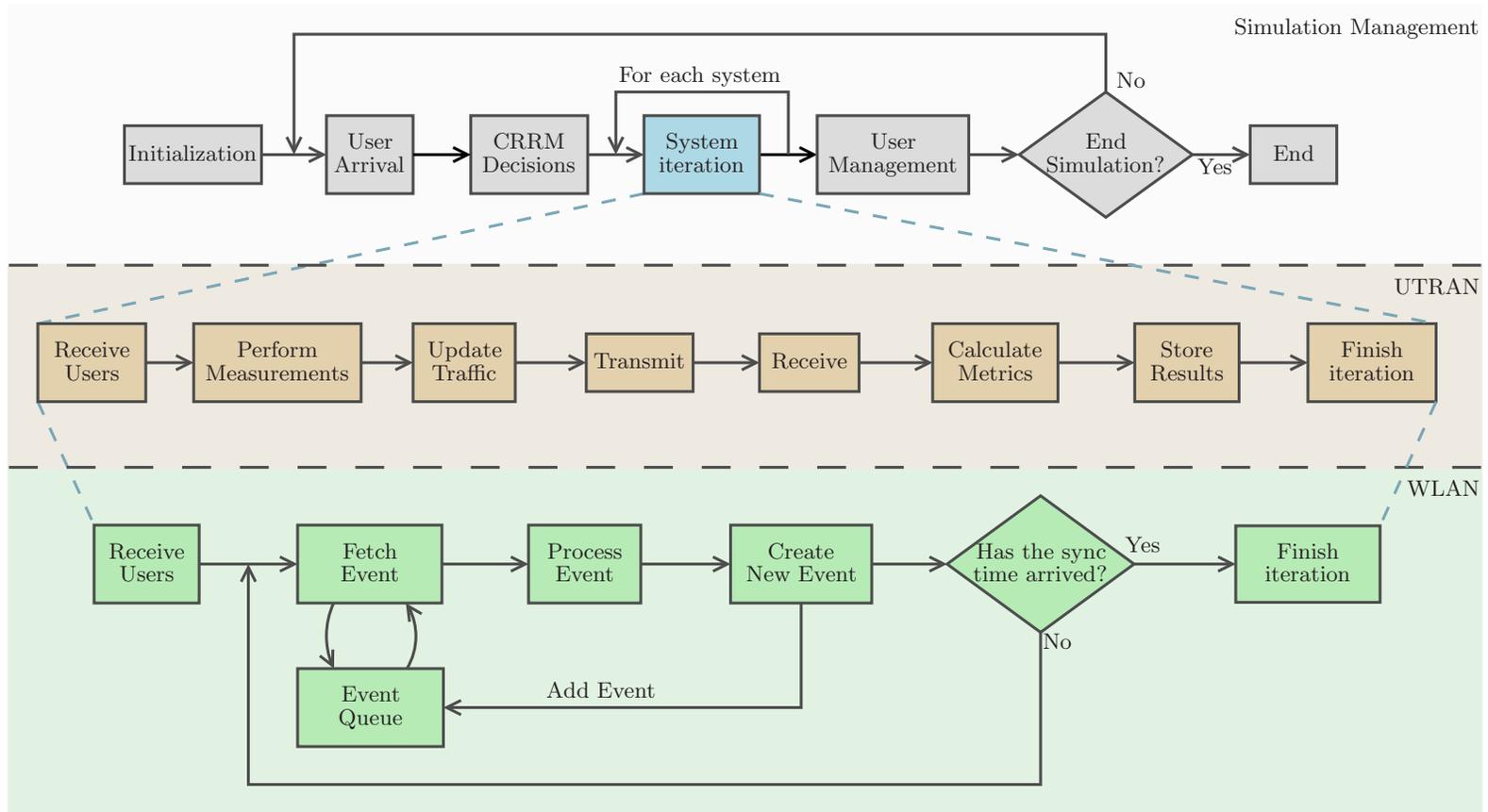


Figura 4.3: Laço principal e gerência de simulação.

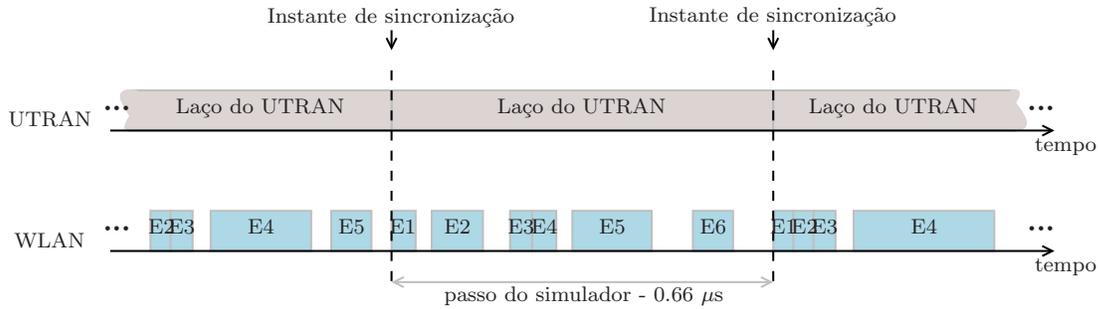


Figura 4.4: Linhas de tempo dos blocos UTRAN e WLAN no simulador de MA.

Uma questão muito importante no que diz respeito ao tempo de simulação é garantir que ambos os blocos das RATs estejam sincronizadas no tempo, especialmente por causa da orientação diferente das máquinas de simulação (orientada a tempo *versus* orientada a evento). Para suplantarmos este problema, a sincronização do tempo é garantida, permitindo que cada sistema rode durante um intervalo de sincronização, o qual foi escolhido como o *slot* do UTRAN. Durante esse intervalo, o UTRAN roda um laço de slot completo, atualizando seu tempo para o limiar superior do intervalo de sincronização, enquanto o WLAN executa todos os eventos escalonados até este mesmo limiar. Portanto, quando o limiar superior do tempo de sincronização chega, ambas as RATs estão no mesmo instante de tempo. A representação gráfica do esquema de sincronização pode ser vista na figura 4.4.

A gerência de simulação também controla a sua finalização, verificando se a quantidade mínima de amostras foram coletadas para todas as RATs.

## Módulos Comuns e Módulos Independentes de RAT

Algumas características que compõem a estrutura do simulador de MA estão fora do escopo das RATs. Outras, apesar de estarem no escopo das RATs, representam elementos cujo desenvolvimento não foi ligado às elas, como por exemplo, protocolos externos. Todas essas características foram então modeladas independentemente em blocos reusáveis que podem ser facilmente conectados aos módulos de simulação das RATs no simulador de MA. A

descrição desses blocos é o foco dessa parte.

### Modelagem das Fontes de Tráfego e Protocolos de Camada Superior

Uma parte importante do sistema de MA refere-se à modelagem das fontes de tráfego e protocolos. Uma ampla variedade de aplicações estão atualmente disponíveis na *Internet*, variando desde de vídeos em tempo real à recepção de arquivos em plano de fundo. Essas aplicações são habilitadas por um igualmente amplo conjunto de protocolos, cujos mecanismos inerentes têm um impacto substancial no desempenho do MA. Ainda que um conjunto de modelos para diferentes fontes de tráfego estejam disponíveis no simulador de MA, apenas o *World Wide Web* (WWW) é usado neste trabalho. No caso da modelagem da pilha de protocolos, apenas aqueles específicos de cada RAT foram adotados para evitar efeitos que atrapalhem o estudo, como o *Transport Control Protocol* (TCP)/*Internet Protocol* (IP).

Para o serviço de WWW, o modelo adotado é baseado em uma sessão composta de pacotes e chamadas de pacotes [42], cujos parâmetros são mostrados na tabela 4.1.

Tabela 4.1: Modelo da sessão WWW. [42].

Descrição	Distribuição	Parâmetros
Número de chamadas de pacotes por sessão	Geométrica	5 (média)
Tempo de leitura por leitura de chamada por pacote	Geométrica	10 s (média)
Número de pacotes por chamadas de pacotes	Geométrica	25 (média)
Tempo entre pacotes	Geométrica	0.00195 s (média)
Tamanho do pacote	Pareto truncada	$\alpha = 1.1$ $k = 81.5$ $m = 66,666$ bytes tamanho médio: 480 bytes

Tabela 4.2: Principais parâmetros de área de cobertura utilizados nesse trabalho

Parâmetro	Valor
Números de células	9
Números de setores por célula	3
Número de APs por setor	1
Posicionamento dos AP	centro de setor

### Área de Cobertura

A área do sistema UTRAN corresponde a um ambiente macro-celular externo, modelado por células tri-setorizadas. Uma área de cobertura restrita é modelada para a WLAN. Ela emula o ambiente *hotspot* externo, consistindo de áreas de cobertura circulares. Para integrar ambas as áreas de cobertura, posições relativas e absolutas foram adotadas. Posições absolutas de células, APs e usuários têm seu centro de referência na área de cobertura macro-celular. Posições relativas dos APs e usuários têm a célula correspondente como referência.

Para evitar efeitos de borda, um esquema simples de replicação de células foi implementado, no qual a base do lado oposto da área de cobertura é replicada. Funciona tal qual uma área de cobertura toroidal e soluciona o problema de mobilidade infinita.

Configurações diferentes no que diz respeito à posição do AP são possíveis. O simulador de MA tem a flexibilidade de definir um único AP ou um número aleatório de APs por setor. Estes podem ser adjacentes ou espalhados e se localizar no centro do setor ou em uma posição aleatória dentro do mesmo. O AP é replicado dentro de todos os setores para se obter uma área de cobertura homogênea. Apesar de todas as configurações possíveis, nesse trabalho apenas um AP por setor foi utilizado. A tabela 4.2 resume todos os parâmetros para a área de cobertura utilizados nesse trabalho.

Tabela 4.3: Parâmetros dos principais modelos de propagação usados nesse estudo.

Parâmetro	Valor
Distância de decorrelação do sombreamento para o UTRAN	50 m
Fator de correlação entre células para o UTRAN	0.5
Desvio padrão do sombreamento para o UTRAN	8 dB
Distância de decorrelação do sombreamento para a WLAN	50 m
Desvio padrão do sombreamento para a WLAN	4 dB

### Modelos de Propagação

A modelagem de propagação adotada para o UTRAN e o WLAN são os mesmos utilizados em [43] e [40] são compostos de perda de percurso, sombreamento, com correlação espacial 2D, e desvanecimento rápido (nível sistêmico do UTRAN e nível de enlace do WLAN). A modelagem adotada segue a apresentada em [44, 45]. Especificamente para o ambiente micro-celular, o modelo de perda de percurso é uma versão ligeiramente modificada do modelo Keenan-Motley [46]. Mais detalhes sobre os modelos de propagação podem ser vistos na tabela 4.3.

Todos os modelos de propagação são armazenados em uma matriz, para evitar esforço computacional extra durante a simulação. Essa vantagem ocorre a um custo de uma quantidade maior de memória necessária. Os mapas de propagação guardam amostras de ganho de percurso que são compostas por perda de percurso e sombreamento. O número de amostras armazenadas é dependente do passo do mapa de propagação, que é de 16 m para o UTRAN e 2 m para o WLAN.

### Modelos de Antena

Dois modelos de antena são considerados no simulador de MA: um para a antena omni-direcional e outro para uma antena direcional que cobre um setor de  $120^\circ$  (caso da célula tri-setorizada). Para o primeiro, nenhum modelo específico foi considerado, já que a potência é irradiada igual para todas as direções. Nesse caso, um ganho de 0 dB é assumido para todas as direções

durante o cálculo da potência recebida e, se necessário, ganhos podem ser adicionados na potência do transceptor, como por exemplo, um ganho aplicado em todas as direções para incrementar a máxima potência transmitida. Para o segundo padrão de irradiação assumido, o modelo é o mesmo apresentado em [42].

## Mobilidade

Os modelos de mobilidade disponíveis no simulador de MA são: estático e pedestre. O modelo estático é usado para usuários conectados em uma WLAN utilizando computadores portáteis, enquanto que para o perfil pedestre podemos assumir usuários de voz conectados ao UTRAN ou usuários com computadores de mão conectados ao UTRAN ou WLAN. Apenas o modelo estático foi adotado nesse trabalho.

- **Mobilidade estática:** Nesse perfil de mobilidade, a velocidade, trajetória dos usuários não são alterados. O usuário permanece na mesma posição durante toda a simulação. Desta forma, o canal permanece estático para o WLAN e sofre apenas de desvanecimento rápido para o UTRAN. Esse efeito é devido à consideração da mobilidade de outros objetos na área de operação desta RAT.
- **Mobilidade pedestre:** O movimento de usuários segue um modelo baseado em mobilidade aleatória (*random-walk*) [47,48]. A velocidade é uniformemente distribuída entre 1 e 5 km/h, resultando em uma média de 3 km/h. A direção também é modelada como uma variável aleatória uniforme distribuída entre 0 e  $2\pi$ . A taxa de atualização de cada estação móvel se dá a cada 5 m percorridos. Nesse modelo de mobilidade, os efeitos do canal são todos considerados.

## Nascimento de Usuários

O simulador de MA conta com dois módulos de geração de usuários, um macro-celular e um *hotspot*. Ambos seguem processos de Poisson distintos,

com a taxa de chegada de usuário configurável. O processo macro-celular gera usuários uniformemente distribuídos dentro da área macro-celular, que é a mesma área de cobertura da UTRAN. No caso do processo *hotspot*, o nascimento de usuários é restrito à área de uma circunferência. A distribuição (uniforme ou gaussiana) de usuários do *hotspot* pode ser configurada. Nesse trabalho, ambos os processos foram configurados para gerar usuários em uma distribuição uniforme.

### Aspectos de Terminal

As simulações podem ser executadas com terminais simples, duplos ou uma mistura dessas duas opções. A configuração do terminal pode ser usada para emular uma dada situação da rede, como por exemplo, 10% de terminais duplo de WWW entre 90% de terminais simples de voz. No caso do terminal duplo, o usuário está habilitado a conectar em uma RAT enquanto monitora a outra.

### CRRM e Núcleo de Rede

O processo de seleção de acesso ocorre no bloco do CRRM, localizado no bloco que representa o CN como visto na figura 4.5. A estratégia de CRRM modelada no simulador representa “servidor de CRRM único” como mostrado na sessão 2.3 e em [6].

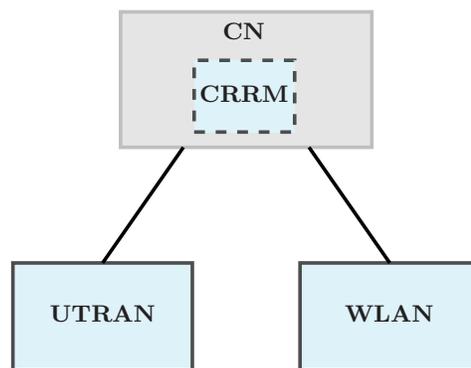


Figura 4.5: CRRM

O CN não é diretamente modelado, mas assumimos o acoplamento forte nas simulações. A arquitetura do bloco CN utilizada é representada pela “alternativa de conexão 1” vista na sessão 2.3 e descrita em detalhes em [41].

O bloco de CRRM realiza todas as decisões de gerência de recursos de rádio vistas em um nível mais amplo. No simulador, este bloco é responsável pelos algoritmos de AS e de *Vertical Handover* (VHO). Para realizar esses procedimentos, o CRRM necessita de Indicador de Desempenhos (PIs) das RATs e da estação móvel. Para a entrega destas informações, o CN foi modelado, sendo responsável pela entrega e roteamento das mensagens entre as RATs e o CRRM. As mensagens utilizadas podem ser de **requisição**, de **resposta** ou de **comando**. Exemplos destas mensagens são mostradas na tabela 4.4.

Tabela 4.4: Exemplos de mensagens.

<b>Tipo</b>	<b>Exemplo</b>	<b>Direção</b>
Requisição	de AS de <i>handover</i> vertical de métrica	usuário → CRRM usuário/RAT → CRRM CRRM → RAT
Resposta	de requisição de medida	RAT → CRRM
Comando	de conexão de desconexão de bloqueio	CRRM → RAT CRRM → RAT CRRM → RATs

O sistema de entrega de mensagens, centrado no CN, é um sofisticado esquema que envolve armazenamento, processamento e roteamento de mensagens. Cada mensagem carrega informações de “remetente”, “destinatário”, “tipo”, “informações relacionadas” e “instante de tratamento”. Os campos de “remetente” e “destinatário” são usados para o roteamento efetivo das mensagens pelo sistema. O campo “tipo”, indica que mensagem é dentre as possíveis e informa a ação correspondente a ser tomada. O campo de “informações relacionadas” é opcional, sendo usado somente quando a ação requer alguma informação extra, ou quando a mensagem é de resposta a uma requisição de medida. Finalmente, o campo de “instante de

tratamento” informa quando a mensagem deve ser executada, possibilitando a modelagem dos atrasos inerentes ao processo de AS.

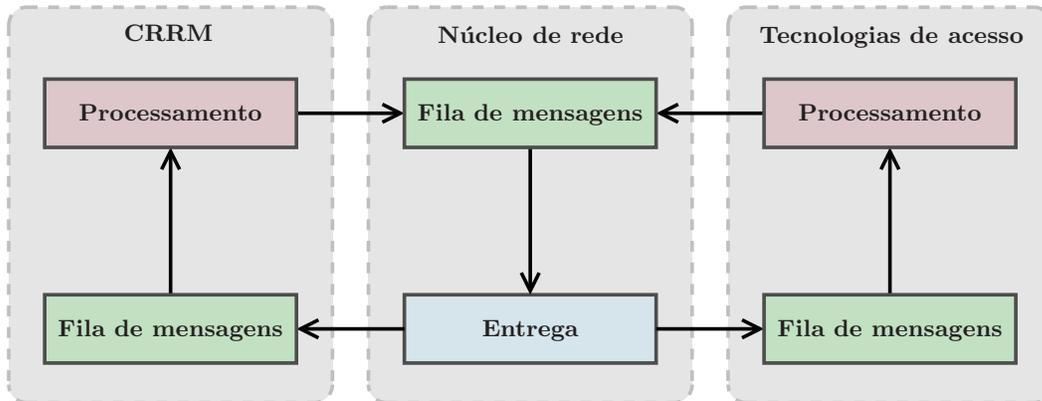


Figura 4.6: Sistema de entrega de mensagens.

O funcionamento do sistema de mensagens é mostrado na figura 4.6. As mensagens podem ser geradas nos blocos de núcleo de rede, CRRM e RAT. Estas mensagens são encaminhadas para o núcleo da rede, onde ficam armazenadas em uma **fila de mensagens** aguardando o momento de encaminhá-las ao seu destino. Durante o roteamento, o algoritmo de **entrega** encaminha as mensagens de acordo com o seu campo “destinatário” para o bloco correspondente. Uma vez recebida, a mensagem é armazenada na **fila de mensagens** e lá permanece aguardando seu processamento. Cada bloco sabe processar as suas mensagens recebidas, realizando a ação correspondente.

O processamento de mensagens do bloco de CRRM funciona de forma similar a um gerenciador de eventos, como mostra a figura 4.7. As mensagens armazenadas na fila são retiradas uma a uma, desde que seus tempos sejam menores ou iguais ao determinado para o processamento de mensagens. Uma vez retirada, a mensagem é lida para identificar seu tipo e uma ação correspondente é executada, podendo ou não gerar novas mensagens. Caso geradas, estas novas mensagens são encaminhadas ao núcleo da rede para a sua entrega.

O bloco de CRRM é ainda responsável pelos algoritmos de AS. A modelagem dos algoritmos implementados no simulador é mostrada na seção

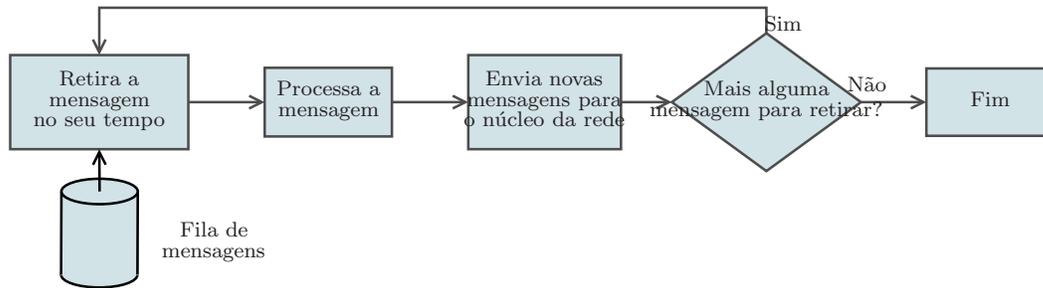


Figura 4.7: Processamento de mensagens no bloco de CRRM.

3.2. Para todos os algoritmos, as mensagens de requisição de acesso contém as informações de *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) vista ao AP da WLAN mais próximo, as taxas de nível físico servidas em ambas as redes, as estimativas de vazão e o número de bits medidos na fila de transmissão da RAT. Somente a SNR para a WLAN é usada como indicador de cobertura, uma vez que a cobertura UTRAN é assumida em toda área de acesso. A AS e o VHO tem seus atrasos modelados de acordo com os atrasos vistos no procedimento de Controle de Admissão de Chamadas (CAC) do UTRAN, sendo de 100 ms.

### 4.3 Modelagem do Módulo *UMTS Terrestrial Radio Access Network*

O módulo UTRAN, integrante do simulador de MA, visa emular com grande nível de detalhamento a operação do sistema *Wideband CDMA* (WCDMA) rel.99/rel.5. Foi construído como um simulador à parte, posteriormente integrado ao de MA. Esse módulo se concentra no enlace direto com os canais de tráfego de dados *Dedicated Channel* (DCH) e *High Speed Downlink Shared Channel* (HS-DSCH). Neste trabalho, somente o HS-DSCH é empregado, visto que além de ter maior capacidade de dados e de ser mais adaptado ao serviço de melhor esforço estudado, está alinhado com as propostas para a evolução da 3ª geração (3G).

A modelagem desse bloco é descrita em detalhes em [43]. As características mais relevantes são:

- **Estrutura da rede.** O módulo de UTRAN emula uma rede WCDMA/*High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA) com uma *Radio Network Subsystem* (RNS), que consiste em uma *Radio Network Controller* (RNC) com 9 bases e 27 setores.
- **Canal HS-DSCH.** O canal HS-DSCH é modelado conforme especificado em [49]. Tem um *Transmission Time Interval* (TTI) de 2 ms. O canal *Associated Dedicated Channel* (A-DCH) também é modelado, consumindo potência (potência inicial de 200 mW) e código (um código de fator de espalhamento de nível 256). A transmissão no canal A-DCH não é modelada.
- **Camada física.** A camada física não é diretamente modelada, porém resultados de simulações de enlace baseados em *Additive White Gaussian Noise* (AWGN) são utilizados para emular seu comportamento. É empregado uma interface entre os resultados de camada física e nível sistêmico chamada de *Average Value Interface* (AVI). O AVI é implementado tal como mostrado em [50, 51].
- **Controle de acesso ao meio** Apenas a camada *Medium Access Control - High Speed* (MAC-hs) é modelada tal qual especificada em [52], sendo constituída de Modulação e Codificação Adaptativa (AMC)<sup>8</sup> e Requisição de Repetição Automática Híbrida (HARQ)<sup>9</sup>. O AMC modelado baseia-se no terminal de classe 6 [49] utilizando apenas 22 dos 30 Esquemas de Modulação e Codificação (MCSs)<sup>10</sup>. O HARQ empregado utiliza apenas o *chase combining* [53]. Todos os 6 processos paralelos são modelados e até cinco retransmissões poderão ser disparadas por pacote MAC.
- **Controle de enlace de rádio.** A camada *Radio Link Control* (RLC) foi modelada como em [54]. Inclui os modos *Acknowledged Mode*

---

<sup>8</sup>do Inglês, (AMC), *Adaptive Modulation and Coding*

<sup>9</sup>do Inglês, (HARQ), *Hybrid Automatic Repeat Request*

<sup>10</sup>do Inglês, (MCS), *Modulation and Coding Scheme*

(AM), *Transparent Mode* (TM) e *Unacknowledged Mode* (UM). Inclui também serviços como segmentação/concatenação e reconhecimento de recepção/retransmissão.

- **Gerência de recursos de rádio.** Uma grande parte das técnicas de Gerência de Recursos de Rádio (RRM)<sup>11</sup> foram modeladas, tais como o Controle de Potência (PC)<sup>12</sup>, *Soft Handover* (SHO), CAC baseado em código e potência e escalonamento de pacotes *Proportional Fair* (PF).
- **Canais comuns.** Os canais comuns são empregados apenas para a modelagem de consumo de recursos, portanto, não há transmissão nestes canais.

As configurações do módulo UTRAN são mostradas na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Parâmetros de modelagem do UTRAN.

Parâmetro	Valor	Unidade
<b>UTRAN</b>		
Número de bases	27	-
Raio da base	500	m
Potência máxima da base	20	W
Potência dos canais comuns	3	W
Velocidade do usuário	3	km/h
<b>HSDPA</b>		
Número de códigos reservado para o HSDPA	5	-
Número de processos paralelos	6	-
Número máximo de retransmissões HARQ	5	-
Potência média do <i>High Speed Shared Control Channel</i> (HS-SCCH)	0.5	W
<b>Modelos de Propagação</b>		
Desvio padrão do sombreamento	8	dB

<sup>11</sup>do Inglês, (RRM), *Radio Resource Management*

<sup>12</sup>do Inglês, (PC), *Power Control*

Distância de decorrelação do sombreamento	50	m
Fator de correlação inter-base de sombreamento	0.5	-
Perfil de canal de multipercurso	AWGN	-
<b>Controle de Potência</b>		
Passo do controle de potência	1	dB
Maxima potência do DPCH	33	dBm
Mínima potência do DPCH	15	dBm
Tamanho da janela de mediação de potência	60	-
Limite para subida de potência	10	dB
A-DPCH $E_c/N_0$	-24.53	dB
Atividade do A-DPCH com transmissão descontínua (DTX)	20	%
<b><i>Soft Handover</i></b>		
Tamanho do conjunto de bases ativas	3	-
Tempo de atualização	20	ms
Janela de filtragem	80	ms
<i>Time-to-trigger</i>	320	ms
Limiar de adição no SHO	2	dB
Histerese no SHO	1	dB
Limiar de troca no SHO	2	dB
<b>Controle de Admissão</b>		
Período de medida da camada física	100	ms
Coeficiente de filtragem de medida da camada 3	5	-
Período de atualização de medida	1	s
Coeficiente do filtro de ataque do RNC	0.5	-
Coeficiente do filtro de decaimento do RNC	0.05	-
Limiar de potência para admissão	20	W

## 4.4 Modelagem do Módulo de Rede Local Sem Fio

O módulo WLAN, implementado no simulador de MA, representa uma rede WLAN *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) 802.11a. Foi construído como um simulador separado, integrado posteriormente ao simulador de MA. Apesar de modelar os enlaces direto e reverso, apenas o direto é considerado. A sua modelagem se concentra na camada *Medium Access Control* (MAC) e no modo infra-estruturado.

A modelagem desse bloco é descrita em detalhes em [40]. As características mais relevantes do módulo WLAN são:

- **Estrutura da rede.** No módulo de WLAN, cada AP é considerado como uma *Basic Service Set* (BSS) completa. As interfaces de distribuição não são importantes para a avaliação e, portanto, não foram modeladas.
- **Ponto de Acesso.** Cada AP tem raio de 60 m. Usuários, ao tentar conexão ao AP, devem verificar deste uma SNR de pelo menos 7,3 dB, que é o valor mínimo de requerido para a obtenção de uma taxa de pelo menos 128 kbps. Caso a SNR esteja abaixo deste valor, o usuário é considerado fora da cobertura do AP.
- **Camada física.** A camada física não é diretamente modelada, porém resultados de simulações de enlace para o 802.11a são utilizados para emular seu comportamento. Como no caso do UTRAN, é empregado uma interface entre os resultados de camada física e nível sistêmico chamada de AVI. O AVI é implementado tal como mostrado em [50, 51].
- **Controle de acesso ao meio.** A camada MAC é baseada no *Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance* (CSMA/CA), sendo modelada tal qual especificada em [39]. A modelagem inclui o *Distributed Coordination Function* (DCF) e serviços como escuta do meio, contador de *backoff*, detecção de pacotes errados e retransmissão.

As configurações do módulo WLAN são mostradas na tabela 4.6.

Tabela 4.6: Parâmetros de modelagem do WLAN.

Parâmetro	Valor	Unidade
Camada física	802.11a (OFDM)	-
Intervalo de quadro de <i>beacon</i>	100	ms
Atraso máximo de propagação	0,33	$\mu s$
Raio do AP	60	m
Modelo de perda de percurso	Modelo de <i>brakepoint</i>	-
Desvio padrão do sombreamento	4	dB
SNR mínima necessária para conexão	7,3	dB

## 4.5 Definição das Métricas de Avaliação

A avaliação do desempenho especificada pela metodologia desse estudo guiou a escolha das métricas que foram implementadas no simulador de MA. Métricas tais como a satisfação do usuário, a carga da rede, capacidade e alguns indicadores como taxas de seleção foram incluídas. Vale ressaltar que algumas destas métricas podem ser usadas tanto a nível de RAT, quanto a nível de rede de MA, sendo elas o percentual de usuários satisfeitos, a capacidade, e a Função de Distribuição Cumulativa (CDF)<sup>13</sup>, média e alguns percentís da vazão da sessão dos usuários. Estas métricas são detalhadamente definidas na seqüência.

### Vazão da Sessão do Usuário

A vazão de sessão ( $T_i$ ) é a informação da vazão efetiva observada pelo usuário quando conectado à RAT, dado em kilo-*bits* por segundo. Além de ser uma medida indireta da satisfação do usuário, dá uma idéia das condições da rede, já que um perfil de vazão de sessão baixa pode indicar um possível congestionamento. É definida como a razão entre o número total de *bits* transmitidos ( $N_b$ ) pelo tempo total de atividade da sessão ( $t_{at}$ ), i.e., o tempo

<sup>13</sup>do Inglês, (CDF), *Cumulative Distribution Function*

em que havia pacotes na fila de transmissão, excluindo os tempos de leitura. A vazão de sessão de um usuário é dada por:

$$T_i = \frac{N_{b_i}}{t_{at_i}}; \quad (4.1)$$

Algumas análises interessantes podem ser feitas coletando todos as medidas de vazão de sessão dos usuários e compilando uma CDF para análise comparativa dos percentis.

## Percentual de Usuários Satisfeitos

Um usuário é dito satisfeito quando consegue conexão e tem vazão de sessão superior a  $T_{thresh}$ . Desta forma, os usuários bloqueados ou que tiveram vazões menores que  $T_{thresh}$  são considerados insatisfeitos. Assim, a satisfação de um usuário em termos somente de vazão é dado por:

$$\sigma_i = \begin{cases} 1, & \text{se } T_i \geq T_{thresh} \\ 0, & \text{se } T_i < T_{thresh} \end{cases} \quad (4.2)$$

onde  $\sigma_i = 1$  significa que o usuário está satisfeito e 0, insatisfeito.

Em posse do número de usuários bloqueados ( $N_{bl}$ ), e do número total de usuários que sofreram o processo de AS ( $N_c$ ), o percentual de satisfação é calculado da seguinte forma:

$$\Phi = 100 \cdot \left( \frac{\sum_{i=1}^{N_c} \sigma_i}{N_c + N_{bl}} \right); \quad (4.3)$$

## Carga de uma Rede

A carga de uma rede pode ser definida de várias formas. Geralmente são baseadas na vazão que a rede é capaz de suportar, normalizadas por alguma outra característica da RAT, como a banda utilizada em cada ponto de conexão ou unidade de área. Para garantir a justiça na análise das RATs

estudadas e por não estar comparando-as entre si, foi escolhido como medida de carga do sistema a razão entre a vazão do sistema, medida em kilo-*bits* por segundo ( $T_{sy}$ ), e o número de pontos de acesso (setores da UTRAN e APs da WLAN) ( $N_{cp}$ ). A vazão do sistema é a razão entre o número total de kilo-*bits* ( $N_b$ ) e o número total de segundos de simulação ( $t_T$ ). Desta forma, a vazão do sistema é dada por:

$$T_{sy} = \frac{N_b}{t_T}; \quad (4.4)$$

A carga, tal qual definida neste trabalho, é dada por:

$$l = \frac{T_{sy}}{N_{cp}}; \quad (4.5)$$

## Capacidade da RAT

Uma RAT geralmente é projetada para operar com um percentual mínimo de usuários satisfeitos, já que seria muito difícil garantir a satisfação total, dadas as características flutuantes do enlace de rádio. Dessa forma, a capacidade de rede é definida como a carga com a qual ao menos 90% de seus usuários estão satisfeitos. A capacidade pode ser estabelecida como:

$$C = l(\Phi = 90\%); \quad (4.6)$$

O mapeamento entre a carga  $l$  e o percentual de satisfação  $\Phi$  é dada pelas curvas de satisfação do sistema, provenientes das simulações realizadas para cargas diversas. Uma curva de satisfação de sistema é exemplificada na figura 4.8. Nela, pode-se observar a capacidade da RAT, dada pelo limite de capacidade. É importante notar ainda que, dependendo da carga, o sistema pode operar sub- ou sobrecarregado, tal como visto na figura, nas regiões à esquerda e à direita do limite de capacidade, respectivamente.

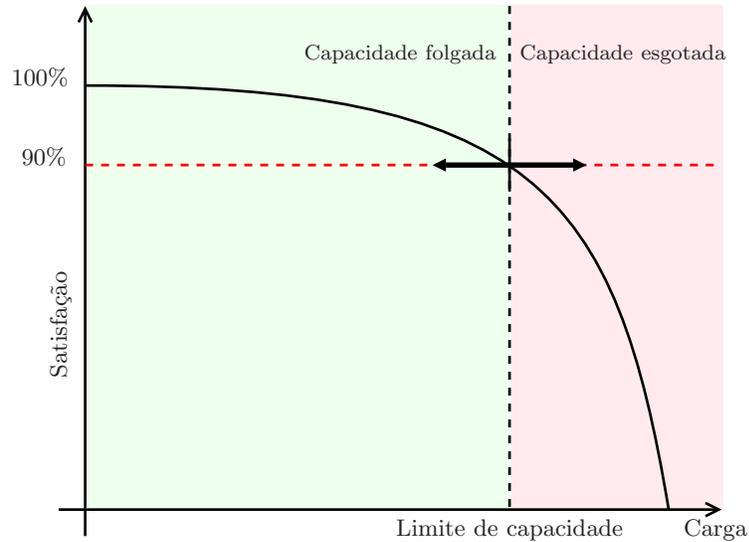


Figura 4.8: Curva de capacidade exemplo, exaltando as regiões de capacidade.

### Taxa de seleções da UTRAN e WLAN

A taxa de seleções da UTRAN ( $S_U$ ) é uma medida adimensional, definida como a razão entre o número de usuários conectados ao UTRAN ( $N_U$ ) e o número total de usuários que sofreram o processo de AS ( $N_{as}$ ). Essa métrica objetiva informar como as RATs estão sendo escolhidas para a conexão de novos usuários. A taxa de seleções da UTRAN é dada por:

$$S_U = \frac{N_U}{N_{as}}; \quad (4.7)$$

Similarmente, a taxa de seleções da WLAN ( $S_W$ ) também é dada pela razão entre o número de usuários que conectaram à WLAN ( $N_W$ ) e o número total de usuários que sofreram o processo de AS ( $N_{as}$ ). A taxa de seleções da WLAN é dada por:

$$S_W = \frac{N_W}{N_{as}}; \quad (4.8)$$

## Taxa de bloqueio

A taxa de bloqueio para todas as estações móveis operando com dois terminais é a razão entre o número total de usuários que foram bloqueados ( $N_{bl}$ ) e o número total de usuários que sofreram o processo de seleção de acesso ( $N_{as}$ ). Esses bloqueios podem ser por qualquer causa, incluindo ausência de cobertura e rejeição por parte das RRM's para a conexão nas RATs. A taxa de bloqueios é dada por:

$$bl = \frac{N_{bl}}{N_{as}}; \quad (4.9)$$

## 4.6 Definição dos Cenários

Um aspecto importante para a avaliação realizada neste trabalho é a correta definição dos cenários testados. Estes cenários devem representar de forma adequada uma rede de MA realista e assim permitir que os resultados alcançados pelo estudo sejam aplicáveis. Neste trabalho, dois cenários, que correspondem às abordagens descritas na seção 4.1, foram escolhidos para a avaliação: cenários **homogêneo** e **heterogêneo**. No cenário homogêneo, a distribuição de usuários na área celular é homogênea e uniforme, enquanto no cenário heterogêneo, a existência de um *hotspot* está presente dentro da área de cada setor UTRAN.

### Cenário Base

O cenário base é composto por todas as características comuns aos cenários homogêneo e heterogêneo. O cenário base é configurado desta forma:

- **Acoplamento do CRRM com os RRM's: Forte.** Tal qual descrito nas seções 2.1 e 2.3, o nível de acoplamento adotado na rede de MA é o forte, o que implica na comunicação irrestrita entre o CRRM e os RRM's das RATs adotadas.

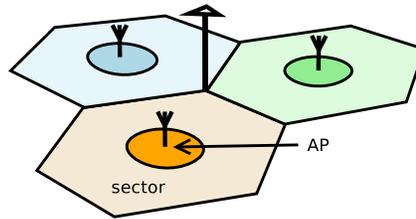


Figura 4.9: AP to sector positioning.

- **Nível de distribuição dos CRRMs: Centralizado.** Haverá apenas uma CRRM controlando toda a rede de MA e desta forma, este CRRM será responsável por todas as decisões no nível do MA.
- **Posicionamento do AP WLAN em relação ao setor UTRAN: central.** Nas avaliações, apenas um AP WLAN por setor UTRAN será empregado. Estas configurações podem ser vistas na figura 4.9.
- **Configuração de terminal: simples e duplo.** A configuração de terminais indica se os usuários terão ou não a possibilidade de conectar nas duas RATs, como discutido na seção 4.2. Nas simulações realizadas, serão utilizados tanto usuários com terminais simples quanto com terminais duplos.
- **Sessão de dados: WWW.** A sessão de dados utilizada foi a WWW. Esta sessão foi escolhida devido a característica de melhor-esforço dos sistemas empregados.
- **Mobilidade dos usuários: estático.** A motivação para utilizar apenas usuários estáticos é prevenir que usuários movendo-se para dentro e para fora do *hotspot* sofram VHOs, o que poderia influenciar os resultados da análise, já que esta foca somente na AS. Os VHOs são deixados para estudos futuros.

### **Cenário Homogêneo**

Como explicado na seção 4.1, o cenário homogêneo tenta representar a situação na qual uma operadora celular adota o AP WLAN para agregar mais recursos de rádio. Nesse cenário, não há *hotspot* e a densidade de usuário em toda a área de cobertura é homogênea. Dadas as características expostas acima para o cenário base, configurou-se o cenário homogêneo, ajustando a configuração espacial de usuários para homogênea e escolhendo usuários com terminais duplos apenas.

### **Cenário Heterogêneo**

Também como mostrado na seção 4.1, o cenário heterogêneo tenta representar situação na qual uma operadora celular adota um AP WLAN para lidar com uma situação de *hotspot*. Já que há um *hotspot*, a densidade de usuários é heterogênea com uma alta taxa de usuários dentro do *hotspot*. Também é composto pelas características citadas no cenário base com a adição da configuração espacial de usuários heterogênea e usuários com terminais simples (macrocelular) e duplo (*hotspot*).



# Capítulo 5

## Análise de Desempenho

Neste capítulo, os resultados de desempenho dos itens de estudo apresentados na seção 4.1 são conduzidos. Na seção 5.1, a análise de desempenho do primeiro item de estudo é apresentada. Nela, os cenários com e sem *hotspot* são avaliados e discutidos. A seção 5.2 se refere ao segundo item de estudo. Ela inicia com uma discussão sobre os critérios de Seleção de Acesso (AS)<sup>1</sup> e seus efeitos no Multi-Acesso (MA) envolvendo as redes *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN) e a Rede Local Sem Fio (WLAN) e na AS propriamente dita. Então, o desempenhos dos algoritmos de AS são avaliados e discutidos.

### 5.1 Impacto da Adição do WLAN ao UTRAN Usando o Multi-Acesso

O objetivo desta parte é clarear os ganhos de desempenho oferecidos pela adição de um Ponto de Acesso (AP)<sup>2</sup> 802.11a a cada setor *Wideband CDMA* (WCDMA)/*High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA), usando simulações dinâmicas e com modelagem mais realista. Também tem como alvo apresentar uma caracterização do desempenho de uma rede de MA composta pelos sistemas UTRAN e WLAN. Os resultados disponibilizados por este trabalho visam oferecer informações úteis de capacidade no que diz

---

<sup>1</sup>do Inglês, (AS), *Access Selection*

<sup>2</sup>do Inglês, (AP), *Access Point*

respeito à adoção do WLAN para melhorar o desempenho da rede celular, particularmente no caso do UTRAN.

## Considerações e Configurações Adotadas

O simulador de MA foi usado para as análises de desempenho e capacidade. Para obter maiores detalhes sobre a modelagem empregada nesta ferramenta, referir-se à seção 4.2. Os principais parâmetros de configurações usados nas simulações são mostrados nas tabelas 4.5 and 4.6, também apresentadas na seção 4.2. Em relação à escolha dos cenários, ambos o homogêneo e heterogêneo foram selecionados. O uso de um AP WLAN por setor UTRAN é suficiente, já que seus ganhos pode ser extendidos a mais APs como mostrado em trabalhos anteriores [15]. Para a avaliação de capacidade, o limiar de satisfação  $T_{thresh}$ , como visto na equação 4.2 é de 64 kbps. Somente o algoritmo de AS *Coverage Threshold Algorithm* (CTA) foi considerado nas simulações. Por fim, a suposição de que a carga oferecida ao sistema pode ser configurada através de taxas de chegada de usuários pode ser feita já que todos os usuários assumem a mesma sessão *World Wide Web* (WWW) de dados.

## Avaliação de Desempenho

Neste estudo, a capacidade é avaliada tendo como base o cenário, a presença do AP WLAN e a carga oferecida (configurada pela taxa de chegada de usuários  $\lambda$ ). No cenário homogêneo, a faixa utilizada foi de  $\lambda = 0.2$  até 1.3 usuários/segundo. No cenário heterogêneo, a proporção relativa entre a taxa de chegada no *hotspot* em relação ao do ambiente macro-celular foi adotada como 1/4 (macro-celular/*hotspot*). Neste caso, as taxas foram de 0.2/0.8 até 1.3/5.2 usuários/segundo.

### Cenário Homogêneo

Neste cenário, já que a densidade de usuários é homogênea, a proporção entre o número de usuários dentro de fora do *hotspot* pode ser vista como a proporção entre as áreas de cobertura de ambas Tecnologias de Acesso de

Rádio (RATs)<sup>3</sup>. Baseado nas medidas tanto para o AP WLAN quanto para o setor UTRAN, a razão entre as suas áreas de cobertura é de aproximadamente 14%, o que significa que 14% de todos os usuários, em média, irão conectar ao WLAN. Apesar de ser um valor consideravelmente pequeno de usuários, suas taxas serão altas o suficiente para prover um ganho importante na qualidade da rede em conjunto.

As figuras 5.1, 5.2 e 5.3 mostram o 10<sup>o</sup>, média e 90<sup>o</sup> percentil da vazão de sessão do usuário, antes e depois da adição de um AP WLAN. Os ganhos providos pelo AP podem ser separados em duas contribuições: a liberação de recursos no UTRAN, o que melhora a Qualidade de Serviço (QoS)<sup>4</sup> para os demais usuários, e as altas taxas de transmissão providas aos usuários que conectam ao WLAN. Apartir destas figuras podemos notar que os usuários de pior caso (10<sup>o</sup> percentil) dificilmente se beneficiam da liberação de recursos providas pela adição do WLAN, com ganhos de QoS de aproximadamente 10 kbps, enquanto os usuários médios e de melhor caso (90<sup>o</sup> percentil) exergam maiores ganhos, de aproximadamente 400 e 200 kbps, respectivamente.

---

<sup>3</sup>do Inglês, (RAT), *Radio Access Technology*

<sup>4</sup>do Inglês, (QoS), *Quality of Service*

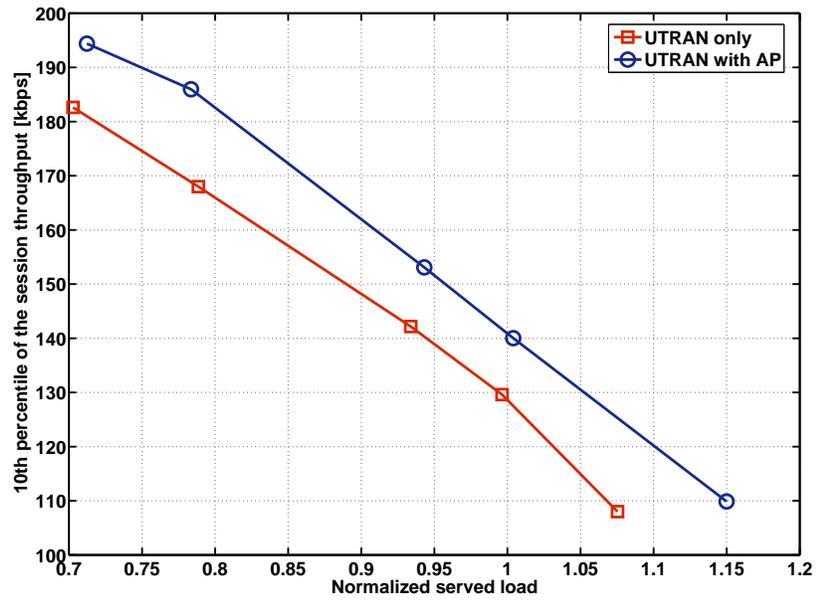


Figura 5.1: 10º percentil da vazão de sessão para o cenário homogêneo.

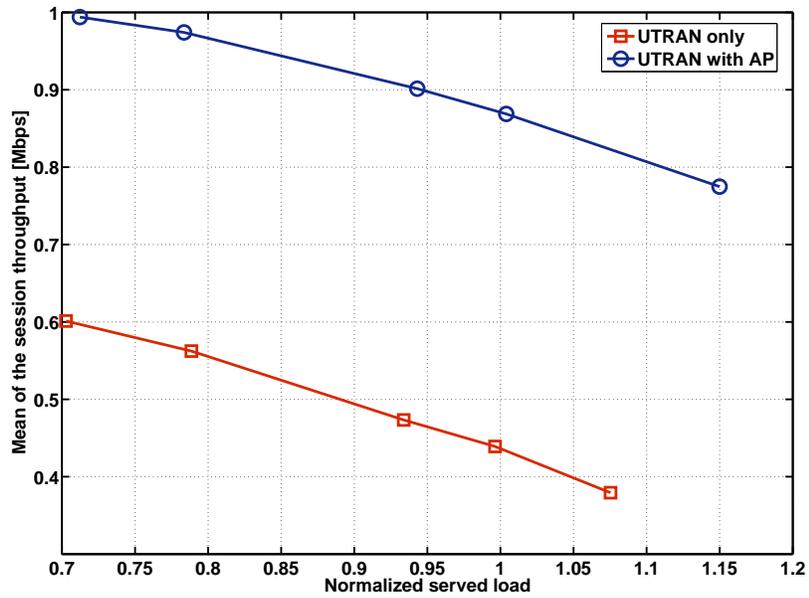


Figura 5.2: Média da vazão de sessão para o cenário homogêneo.

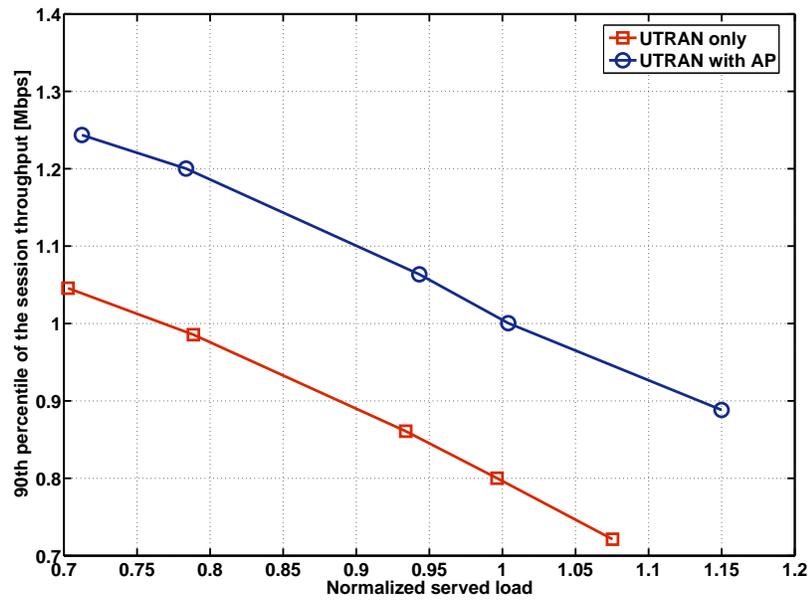


Figura 5.3: 90º percentil da vazão de sessão para o cenário homogêneo.

Esse aumento de qualidade oferece aumento de capacidade, como visto na figura 5.4, onde a QoS e ganhos de capacidade são apresentados. Neste cenário, a adição do AP WLAN permitiu um aumento de 1.4% no número total de usuários satisfeitos, o que pode ser convertido em um ganho de capacidade de aproximadamente 5%. Assim, um operador de rede celular poderia adicionar um AP WLAN para manter a mesma capacidade enquanto provendo melhor QoS ou admitir mais usuários para preencher esta sobra de capacidade. Então, neste cenário, a adição do AP WLAN é interessante para aliviar um congestionamento na rede UTRAN, restaurando a quantidade de usuários satisfeitos a níveis aceitáveis.

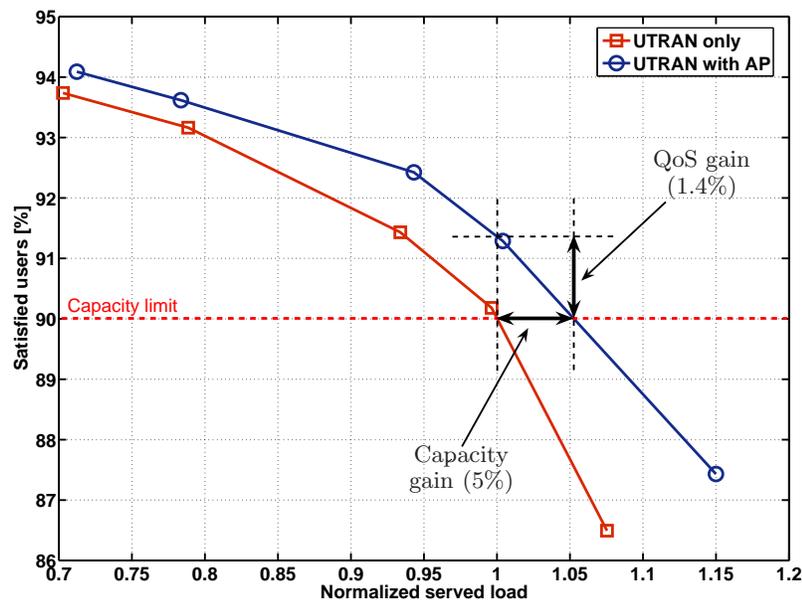


Figura 5.4: Satisfação de usuário para o cenário homogêneo.

### Cenário Heterogêneo

A mesma análise, vista no caso homogêneo, pode ser realizada para o caso heterogêneo. Da Função de Distribuição Cumulativa (CDF)<sup>5</sup> da

<sup>5</sup>do Inglês, (CDF), *Cumulative Distribution Function*

vazão de sessão da rede de MA em conjunto para uma taxa de chegada de 0.3/1.2 usuários/segundo, vista na figura 5.5. Podemos observar a partir desta figura que os ganhos da adição do AP WLAN são mais evidentes, já que a configuração onde apenas o UTRAN é usado sofre de tráfego excessivo gerado pelo *hottspot*. Desta vez, a adição do WLAN fornece ganhos consideráveis tanto no quesito de relaxamento do congestionamento do UTRAN quanto no fornecimento de maiores taxas pelo WLAN.

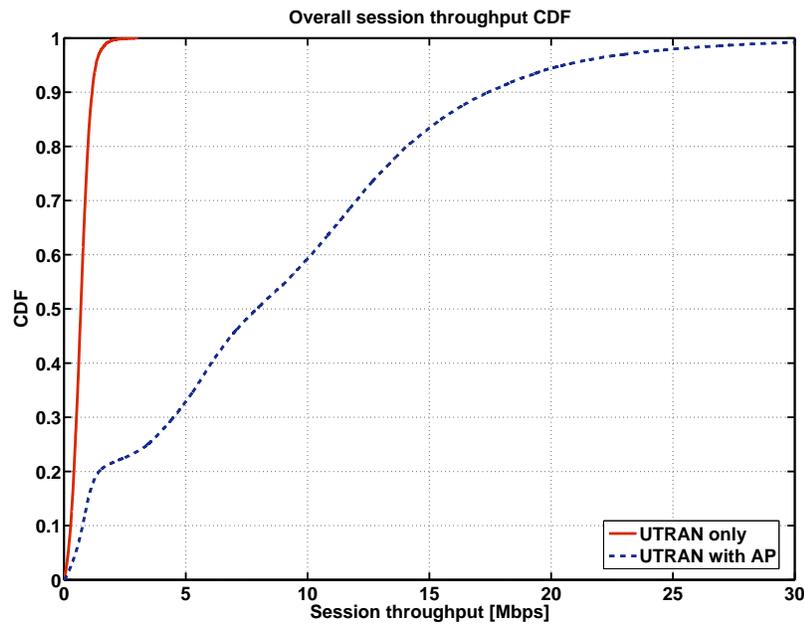


Figura 5.5: CDF da vazão de sessão para o cenário heterogêneo a uma taxa de nascimento de 0.3/1.2 usuários/segundo.

A satisfação do usuário também é melhorada, já que o WLAN pode acomodar uma quantidade representativa de usuários de WWW devido às suas características de melhor-esforço. Esse fato possibilita um expressivo ganho em capacidade, tal qual mostrado na figura 5.6. Desta vez, um ganho de QoS de 9% no número de usuários satisfeitos permite um acréscimo de capacidade de 380%, como mostrado na figura citada. Desta forma, a adição do AP WLAN para a melhoria de capacidade é uma boa opção, fornecendo a

uma operadora celular a chande de usar suas instalações WLAN para mitigar um congestionamento na rede UTRAN ou mesmo instalar um AP WLAN sob demanda em áreas onde há *hotspots* conhecidos.

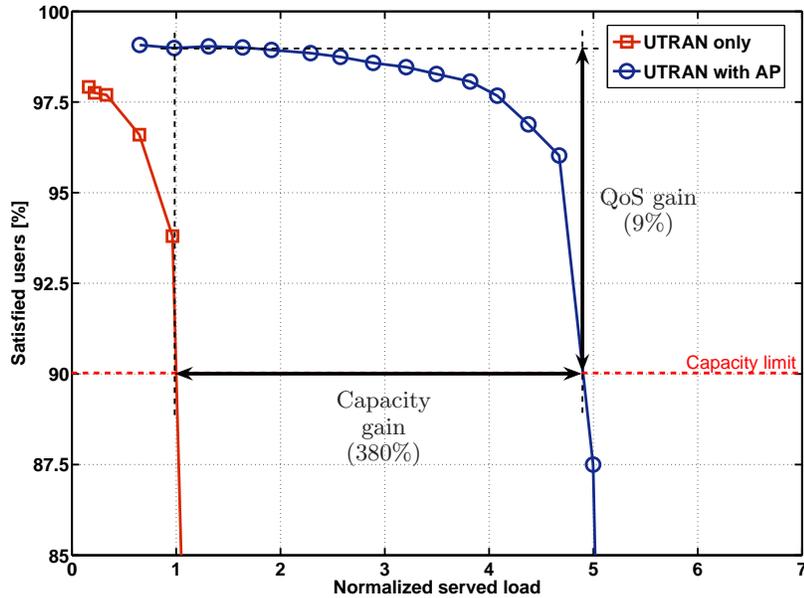


Figura 5.6: Satisfação de usuário para o cenário heterogêneo.

Apesar destes resultados terem sido vistos para a proporção de taxa de chegada de  $1/4$ , ganhos maiores são esperados de proporções mais altas, já que o número total de usuários no *hotspot* será ainda mais alto. Nestes casos, para a configuração sem o emprego do WLAN, a grande quantidade de usuários teria a tendência de exaurir os recursos da rede UTRAN, causando um congestionamento. Portanto, com a adição do AP WLAN, o *hotspot* pode ser mais efetivamente servido, liberando os recursos de volta para a rede celular.

## 5.2 Avaliação da Seleção de Acesso na Rede de Multi-Acesso UTRAN-WLAN

Esta parte tem como objetivo a avaliação do desempenho dos algoritmos de AS existentes e sua comparação com o algoritmo proposto, usando simulações de nível-sistêmico dinâmicas que empregam modelagem realista. Também objetiva a apresentação da caracterização dos critérios principais da AS e seu comportamento na rede de MA estudada. Os resultados disponibilizados por este trabalho visam apresentar informações úteis de capacidade e QoS para os algoritmos de AS estudados.

### Considerações e Configurações Adotadas

O simulador de MA foi utilizado nas avaliações de capacidade e desempenho. Para maiores detalhes sobre a modelagem empregada neste simulador, referir-se à seção 4.2. Os principais parâmetros de configuração usados nas simulações são listados nas tabelas 4.5 e 4.6, também apresentadas na seção 4.2. No que diz respeito à seleção do cenário, apenas o heterogêneo foi escolhendo por apresentar a maior atratividade, como visto na seção anterior. Por fim, a suposição de que a carga oferecida ao sistema pode ser configurada através de taxas de chegada de usuários pode ser feita já que todos os usuários assumem a mesma sessão WWW de dados.

### Avaliação de Desempenho

Nesta parte, a avaliação de desempenho dos algoritmos de AS em termos de satisfação e vazão de sessão são apresentados. A avaliação é executada para os 5 algoritmos introduzidos na seção 3.2. Em todas as avaliação subsequentes, o CTA é tomado como algoritmo de referência.

Neste trabalho, a avaliação da AS é baseada na proporção relativa da taxa de chegada de usuários do *hotspot* em comparação ao macro-celular. Três proporções foram utilizadas: 1/4, 1/8 e 1/10 (macro-celular/*hotspot*). Apesar de resultados para essas proporções estarem disponíveis, decidimos

focar apenas na de 1/10. Esta decisão se deu devido ao carregamento relativo das RATs adotadas, já que a proporção de 1/10 proporciona a situação em que a WLAN se aproxima mais rapidamente de sua capacidade máxima que a UTRAN. Isto caracteriza um cenário atrativo, tal qual descrito por de Sousa *et al.* [21,22] e Yilmaz *et al.* [19,20]. As taxas testadas foram de 0.4/4, 0.8/8, 1.0/10, 1.2/12, 1.4/14 and 1.6/16 usuários/segundo, para dar uma ideia do comportamento destes algoritmos sob cargas crescentes. Para facilitar a leitura dos gráficos subsequentes, normalizamos as cargas pela capacidade da rede de MA usando o algoritmo CTA.

Devido à pequena margem de ganhos que alguns algoritmos apresentaram, foram executadas três rodadas de cada simulação e o resultados apresentados correspondem à valor médio destas três amostragens. Este procedimento visa minimizar as chances de uma interpretação errada devido a uma possível fraca representatividade das leituras.

### **Critério de Taxa *Versus* Carga**

Antes de apresentar a avaliação de desempenho dos algoritmos, uma discussão sobre os critérios de taxa e carga se faz necessário, para compreendermos o comportamento dos algoritmos baseados nestes critérios na rede de MA UTRAN-WLAN.

Dispondo de três critérios diferentes de medida de carga, como mostrado na seção 3.2, para os algoritmos *Estimated RAT Throughput Algorithm* (ERT), *Utility-based Algorithm* (UTA) e *Queue-based Algorithm* (QBA), selecionamos apenas um para este estudo. Portanto, nosso foco se voltou para a vazão estimada da RAT. veremos o comportamento da rede do ponto de vista do CTA, já que é um algoritmo baseado somente em cobertura e não irá influenciar os critérios analisados. As simulações apresentadas irão considerar apenas a proporção de taxa de chegada de 1/10, mas as conclusões tomadas podem ser extendidas para outras configurações.

A figura 5.7 mostra a CDF da taxa de transmissão do CTA para ambas as RATs em carga baixa (0,4/4 usuários/s) e alta (1,6/16 usuários/s). Pode ser

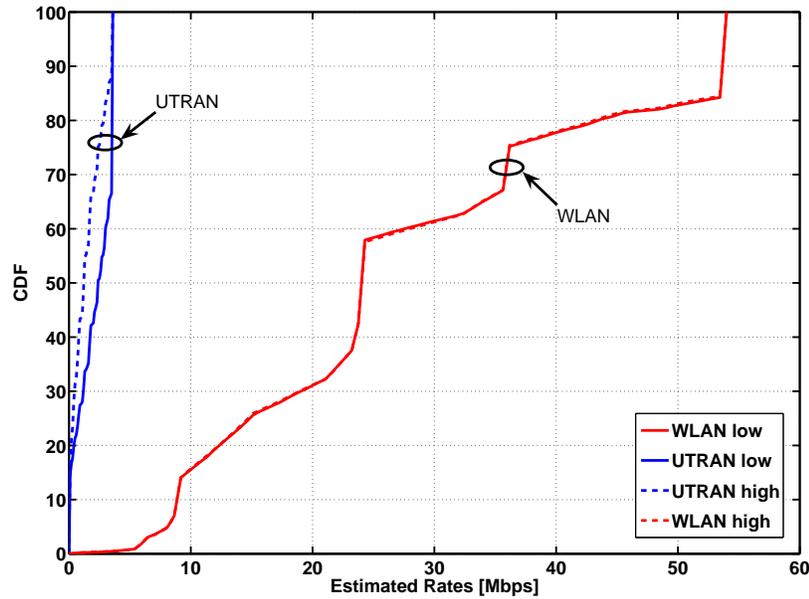


Figura 5.7: CDF das taxas estimadas para as cargas baixa e alta.

verificado a partir da figura que, enquanto a taxa de transmissão do WLAN é fracamente influenciada pela carga, com o UTRAN acontece o contrário. Isso é devido às diferenças do esquema de múltiplo acesso entre as redes WLAN e UTRAN, já que, devido ao *Carrier Sense Multiple Access / Collision Avoidance* (CSMA/CA), a WLAN não sofre de interferência, como no caso da UTRAN.

Olhando de forma mais aprofundada as CDFs de taxa de transmissão, mostradas na figura 5.7, podemos extrair algumas conclusões sobre os algoritmos que utilizam esse critério. Focando as características de AS dessa figura, podemos notar que a proporção de usuários que são assinalados para o WLAN e o UTRAN permanecem os mesmos apesar da carga. Uma explicação para este comportamento pode ser que a área dentro do *hotspot* afetada por condições pobres de canal permanece o mesmo, já que o WLAN não sofre interferência. Por outro lado, o UTRAN é afetado pela interferência, e à medida que a carga cresce, uma redução na QoS pode ser observada. Portanto,

podemos antecipar que os algoritmos baseados na taxa de transmissão terão bom desempenho para uma grande faixa de cargas. No entanto, quando a carga se tornar muito alta, a degradação do UTRAN terá uma influência negativa no desempenho do MA como um todo.

Ainda no que diz respeito as algoritmos baseados em taxa, podemos ver a partir da figura 5.7 que as amostras abaixo da marca dos 10 Mbps (aproximadamente 15% das amostras) são as de usuários candidatos ao processo de AS. É importante notar que este fato não significa que todos os 15% dos usuários serão assinalados para a UTRAN. Isto só aconteceria se sua amostra taxa de transmissão fosse inferior para a WLAN que para a UTRAN.

A figura 5.8 apresenta a CDF da vazão estimada das RATs do ponto de vista do CTA para uma taxa de chegada de usuários baixa (0,4/4 usuários/s) e alta (1,6/16 usuários/s). Nesta figura, as setas enfatizam a diferença no comportamento deste critério com o aumento de carga. Diferente do caso do critério de taxa de transmissão, o comportamento do WLAN é mais sensível à vazão estimada das RATs que o UTRAN. Esta característica também se dá devido aos esquemas de múltiplo acesso, já que o CSMA/CA usado pelo WLAN acarreta em altos atrasos para todos os usuários conectados a esse sistema quando em altas cargas. Este fato faz com que a vazão decresça muito drasticamente com o aumento da carga, caracterizando o efeito avalanche descrito por Pimentel em [40]. Para o UTRAN, apesar de sofrer com o aumento de interferência, não há uma queda drástica da vazão como observado no caso do WLAN.

No que diz respeito aos algoritmos baseados em carga, observando o critério de vazão estimada de RAT vemos que para altas cargas (onde é esperado que estes algoritmos forneçam os maiores ganhos devido ao descarregamento do WLAN), quase todas as amostras verificadas no WLAN situam-se abaixo das do UTRAN. Isto indica que, em altas cargas, qualquer usuário nascido dentro do hotspot é candidato para o processo de AS e que um número considerável de usuários poderiam ser assinalados para uma rede UTRAN tornando-a

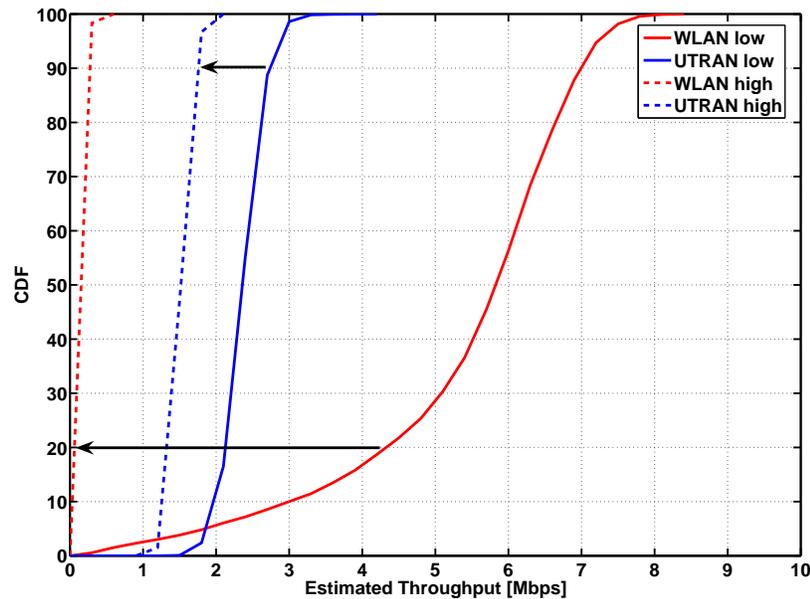


Figura 5.8: CDF das vazão estimadas das RATs para as cargas baixa e alta.

sobrecarregada e degradando ainda mais a situação. Para baixas cargas a proporção de usuários possivelmente candidatos para a AS é menor, por volta dos 5%.

### Desempenho dos Algoritmos de Seleção de Acesso

Para compreender o desempenho dos algoritmos de AS devemos considerar o comportamento do algoritmo sob cargas crescentes. Observando através da métrica de vazão de sessão, para o caso dos piores usuários (10º percentil), o *Rate Maximization Algorithm* (RMA) oferece os maiores ganhos, seguido do QBA, UTA, ERT e CTA, como visto na figura 5.9. Porém à medida que a carga cresce os algoritmos QBA e UTA convergem para o desempenho do RMA, com um ligeiro ganho sobre este último. O acréscimo de desempenho do UTA e QBA com o aumento da carga se dá devido ao uso da informação de carga que estes algoritmos adotam, concordando com os achados de Yilmaz em [20] e também com o estudo de atratividade de de Sousa *et al.* em [21,22].

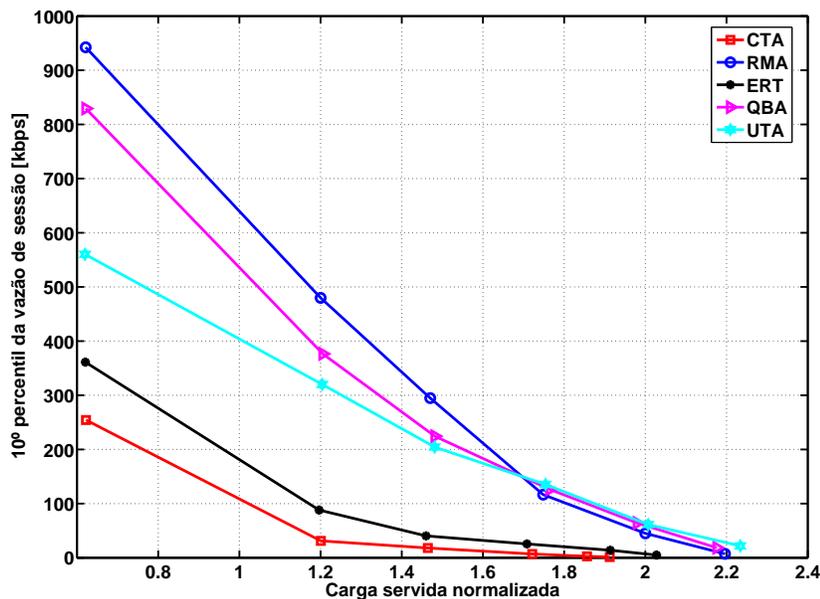


Figura 5.9: 10º percentil da vazão de sessão para todos algoritmos de AS.

Este fato mostra que levar a carga em consideração é de fato importante, já que a incapacidade de lidar com situações de altas cargas do RMA o incapacita de tomar uma decisão mais acertada.

Comparando o ERT e CTA ao UTA, QBA e RMA, vemos que estes últimos têm um desempenho muito superior devido ao fato de usarem a taxa de transmissão, um critério que oferece os melhores desempenhos como discutido anteriormente.

Apesar do ERT ter melhor desempenho que o CTA, ele permanece muito atrás dos outros algoritmos. Este fato é devido ao critério de decisão do ERT que é apenas baseado na estimativa da vazão das RATs, uma métrica conhecidamente pior que as que dependem em taxas, como discutido anteriormente. Outra explicação para o melhor desempenho dos algoritmos baseados em taxa de transmissão é o fato de, em assinalar usuários para as redes na qual o usuário irá usufruir de maiores taxas, o algoritmo acaba por maximizar as vazões dos usuário, e por consequência, as das redes também.

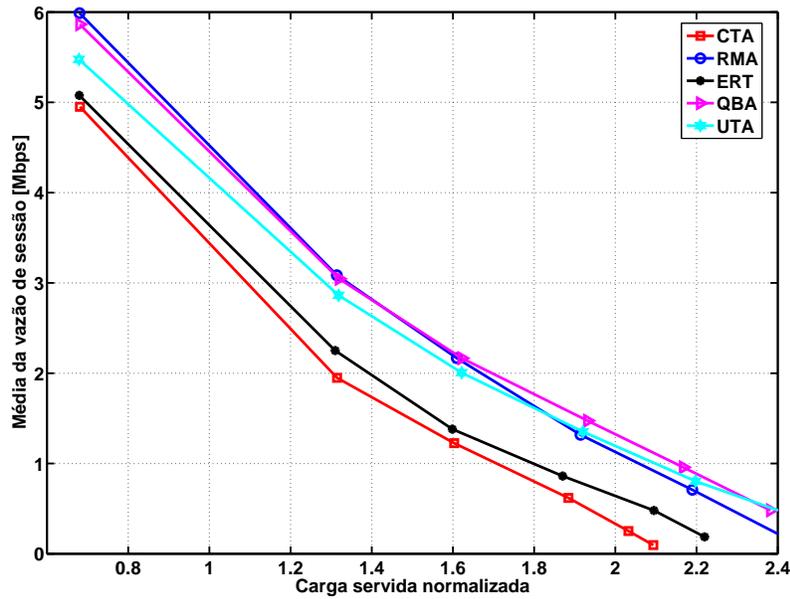


Figura 5.10: Média da vazão de sessão para todos algoritmos de AS.

Para os casos de usuário médio e de melhores casos (90º percentil) em termos de vazão de sessão, mostrado nas figuras 5.10 e 5.11, as diferenças no desempenho são mais evidentes. A seqüência de desempenho dos algoritmos é a mesma do caso dos 10º percentil, mas agora o efeito do uso da carga como critério se torna mais evidente para o QBA e UTA.

Todo o desempenho citado anteriormente pode ser resumido na figura 5.12, onde a satisfação de usuário é mostrada. É interessante notar que, não apenas o QBA e UTA oferecem ganhos na carga máxima, mas também continuam oferecendo tais ganhos com cargas ainda mais altas, ultrapassando o desempenho do RMA. O ERT oferece ganhos em relação ao CTA mas se mantém muito inferior aos algoritmos baseados em taxa de transmissão. Os ganhos em termos de qualidade vistos na figura são de aproximadamente 9%, 8%, 8% e 5% para o RMA, QBA, UTA e ERT, respectivamente. Para a capacidade, o UTA oferece o melhor ganho, de aproximadamente 117.5% e é acompanhado de perto pelo QBA com 114.5% e o RMA com 106%. O ERT

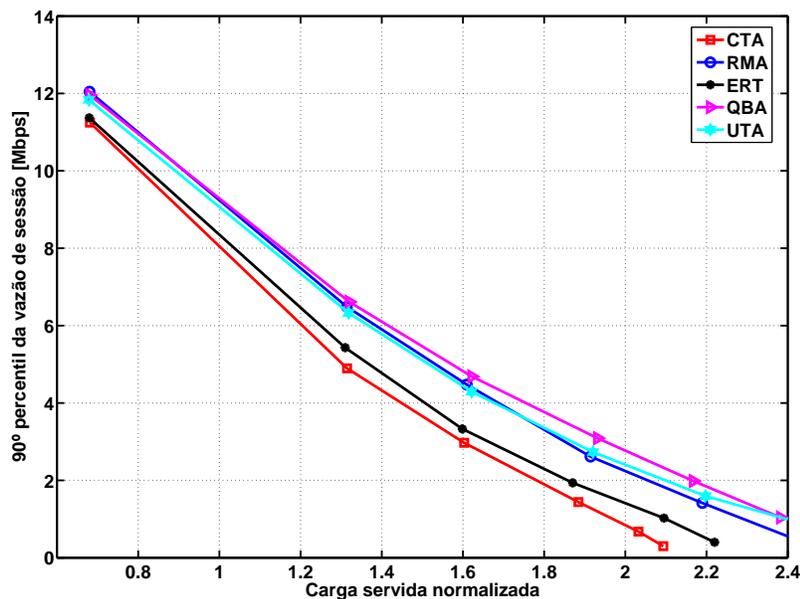


Figura 5.11: 90º percentil da vazão de sessão para todos algoritmos de AS.

conseguiu o pior desempenho com ganho de capacidade de 40.5%. Apesar de não apresentar o melhor desempenho, o QBA conseguiu resultados similares ao do UTA e ainda se beneficia de uma implementação mais simplificada, como descrito na seção 3.2.

A AS também exerce influências sobre o desempenho das RATs vista de forma separada. Essa perspectiva é apresentada nas figuras 5.13, 5.14, 5.15 e 5.16, que mostram a média de 10º percentil da vazão de sessão de usuários para ambas as redes. Das figuras 5.13 e 5.14, podemos ver que em baixas cargas, todos os algoritmos começam com um desempenho similar no UTRAN, mas com seu aumento, o RMA e UTA tendem a oferecer um desempenho ligeiramente melhor que o CTA. Isso decorre do fato destes algoritmos adotarem bons critérios de AS e de assinalarem apenas usuários que experimentarão boa QoS ao UTRAN. No caso do QBA e ERT, há uma considerável perda de desempenho. Do ponto de vista do WLAN, mostrado nas figuras 5.15 e 5.16, algo diferente ocorre. Neste caso, com baixas cargas

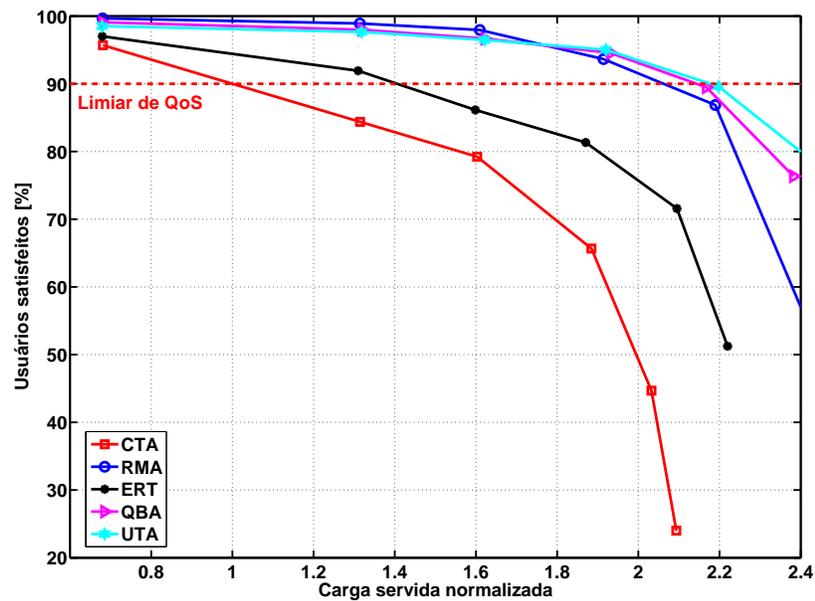


Figura 5.12: Satisfação de usuário para todos os algoritmos de AS.

o QBA fica apenas atrás do RMA. Com o aumento da carga o desempenho do QBA e UTA convergem para o do RMA e até o ultrapassam levemente. Pode-se notar que esse comportamento é bastante similar ao apresentados nas figuras 5.9 e 5.10 para o desempenho em conjunto do sistema, o que mostra que a WLAN tem grandes influências no desempenho da rede de MA neste cenário.

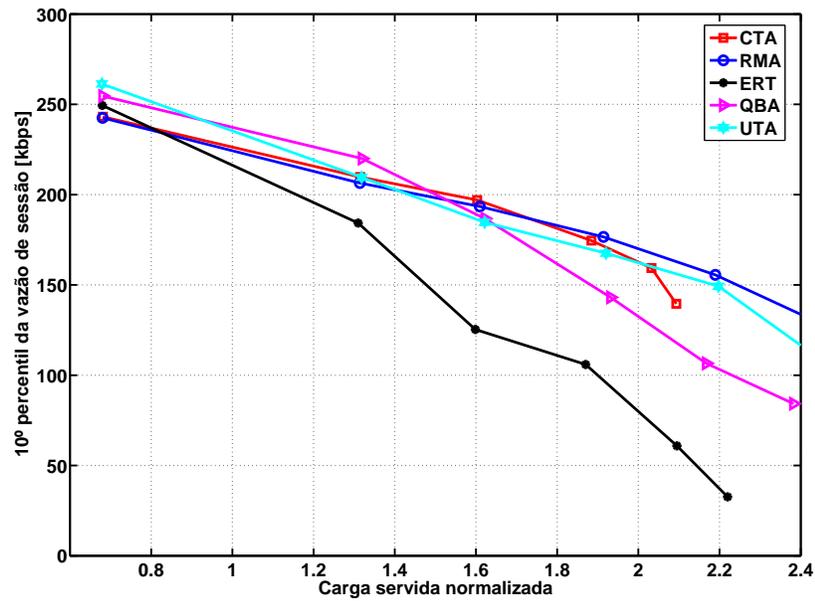


Figura 5.13: 10º percentil da vazão de sessão sob a perspectiva da rede UTRAN.

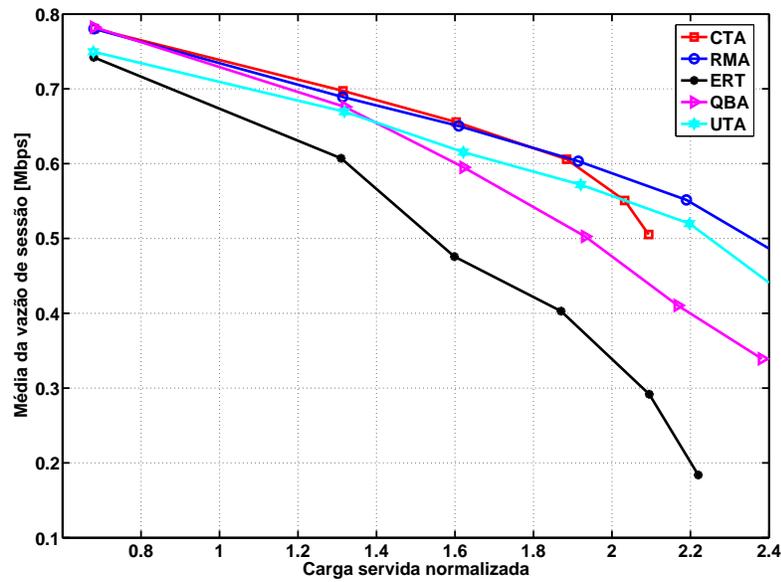


Figura 5.14: Média da vazão de sessão sob a perspectiva da rede UTRAN.

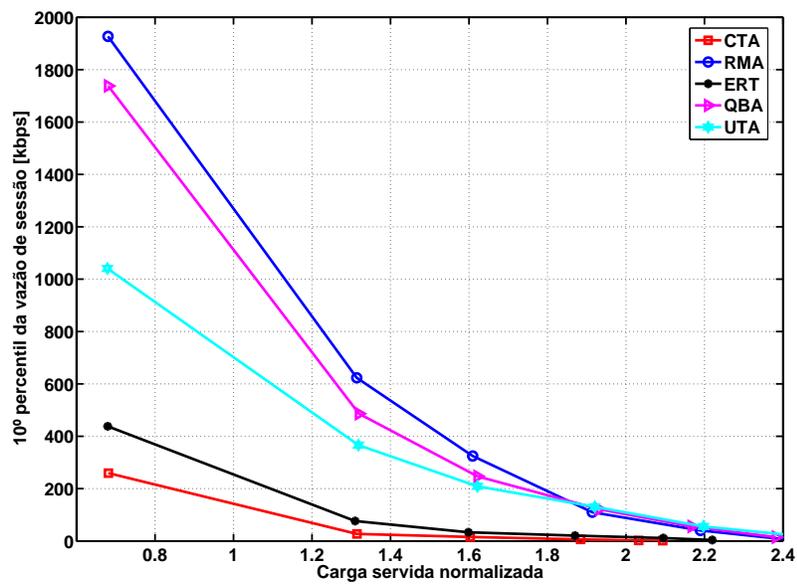


Figura 5.15: 10º percentil da vazão de sessão sob a perspectiva da rede WLAN.

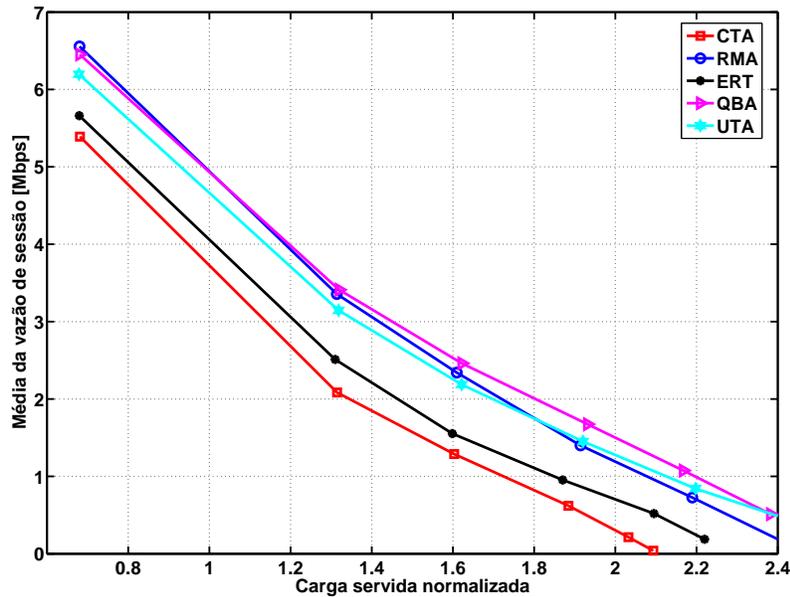


Figura 5.16: Média da vazão de sessão sob a perspectiva da rede WLAN.

O baixo desempenho para os algoritmos QBA e UTA podem ser explicados pela grande diferença nas taxas disponibilizadas pelas RATs. A influência da taxa das RATs no desempenho dos algoritmos foi percebido por Yilmaz em [19] e mais recentemente por de Sousa Jr. *et al.* em [21, 22]. Essa influência pode ser explicada pela escala das taxas, já que uma taxa considerada pobre no WLAN pode ainda ser melhor que uma considerada normal no UTRAN. Portanto, a escolha de duas RATs com taxas comparáveis pode prover melhores resultados. Nesta situação, o QBA e o UTA devem obter melhor desempenho já que a informação de carga pode ser melhor explorada. Além deste fato, há também a influência da proporção de cobertura. Com uma maior intersecção de cobertura haverá mais usuários candidatos ao processo de AS o que acarretaria em um melhor aproveitamento da diversidade de multi-usuário.

# Capítulo 6

## Conclusões e Perspectivas

Nesta dissertação de mestrado um estudo sobre a rede de Multi-Acesso (MA) composta pelos sistemas *UMTS Terrestrial Radio Access Network* (UTRAN) e Rede Local Sem Fio (WLAN) foi realizado. Este trabalho objetivou o estudo do desempenho, provido pela adição da rede WLAN 802.11a à UTRAN de forma cooperativa, usando a estrutura de MA como tecnologia habilitadora e algoritmos inteligentes de Seleção de Acesso (AS)<sup>1</sup>. Para tal, simulações dinâmicas de nível sistêmico foram utilizadas, de forma a prover resultados mais realistas e aplicáveis.

O trabalho apresentado neste documento iniciou-se com uma busca na literatura disponível, afim de levantar os trabalhos relacionados. Então, o problema de AS e os cenários correspondentes foram identificados. Tendo como base estes cenários, uma ferramenta de simulação que representa uma rede de MA UTRAN-WLAN foi construída, com um foco especial nas características realistas. Simulações foram executadas para caracterizar o desempenho dos cenários escolhidos. Por fim, o problema de AS foi atacado, um algoritmo foi concebido e as simulações foram repetidas para reavaliar os cenários com os algoritmos estudados.

---

<sup>1</sup>do Inglês, (AS), *Access Selection*

## 6.1 Conclusões

As conclusões deste trabalho são divididas em duas partes relativas aos itens de estudo apresentados na seção 4.1, e são mostrados a seguir.

### Primeiro Item de Estudo: Impacto da Adição de um Ponto de Acesso WLAN à UTRAN

No que diz respeito ao primeiro item de estudo, mostramos que o emprego do WLAN a uma rede UTRAN usando o MA como tecnologia habilitadora ofereceu capacidade extra e se mostrou uma boa alternativa para a ampliação de uma rede UTRAN em funcionamento. Os ganhos observados habilitam tanto o caso no qual uma operadora celular gostaria de ampliar a capacidade de uma rede UTRAN (caso homogêneo) quanto no caso em que uma operadora gostaria de lidar com um *hotspot* usando a WLAN para tal (caso heterogêneo). No entanto, o melhor desempenho foi observado para o caso do cenário heterogêneo, onde os usuários do *hotspot* consumiriam todos os recursos da rede composta apenas pela UTRAN, degradando seu funcionamento. Os ganhos habilitados por este estudo são resumidos na tabela 6.1.

Tabela 6.1: Resumo dos resultados do primeiro item de estudo.

Cenário	Resultado	Valor
Homogêneo	ganho de QoS	1.4%
Homogêneo	ganho de capacidade	5%
Heterogêneo	ganho de QoS	9%
Heterogêneo	ganho de capacidade	380%

### Segundo Item de Estudo: Avaliação dos Algoritmos de Seleção de Acesso

No que diz respeito ao segundo item de estudo, avaliamos o desempenho de 5 algoritmos de AS no simulador de MA alvo (*Coverage Threshold Algorithm* (CTA), *Rate Maximization Algorithm* (RMA), *Estimated RAT Throughput Algorithm* (ERT), *Utility-based Algorithm* (UTA) e *Queue-based Algorithm*

(QBA)). Mostramos que o processo de seleção de acesso é de fato importante e tem o poder de determinar o desempenho da rede de MA. Mostramos também que os critérios usados para a seleção de acesso são determinantes e que devem ser ajustados às Tecnologias de Acesso de Radio (RATs)<sup>2</sup> adotadas na rede de MA de acordo com suas características. No caso do MA entre o UTRAN e o WLAN as diferenças quanto ao esquema de múltiplo acesso determinaram o desempenho dos critérios analisados, sendo que o de taxa de transmissão se sobressaiu frente ao de vazão estimada da RAT.

Ainda deste estudo, concluímos que não basta usar apenas o critério de carga (caso do ERT) ou de taxa (caso do RMA) para obter o melhor desempenho. Um algoritmo de AS que integra estas duas características (casos do QBA e UTA) terá o melhor desempenho, sendo útil para uma maior faixa de cargas. Apesar deste fato, o RMA mostrou bom desempenho, chegando perto dos algoritmos de critério misto (carga e taxa).

Este trabalho ainda confirmou os resultados de trabalhos anteriores [19,20] que afirmam que usar a informação de carga na seleção de acesso habilita melhorias de desempenho. Também confirmou os estudos de atratividade realizados em trabalhos anteriores [21, 22], que afirmam que um cenário no qual uma diferença grande de taxas das RATs ou onde há uma concentração de usuários grande na RAT de menor taxa, não são atrativos para algoritmos de AS inteligentes.

Por fim, concluímos que o melhor algoritmo de AS estudado neste trabalho é o UTA. No entanto, o QBA pode ser uma opção mais interessante, já que oferece um desempenho semelhante e tem uma implementação mais simples.

Um resumos dos ganhos conseguidos neste estudo podem ser vistos na tabela 6.2.

## 6.2 Perspectivas

Os estudos realizados neste trabalho oferecem uma série de perspectivas para trabalhos futuros. Estas perspectivas são listadas abaixo:

---

<sup>2</sup>do Inglês, (RAT), *Radio Access Technology*

Tabela 6.2: Resumo dos resultados do segundo item de estudo.

Cenário	Resultado	Valor
ERT	ganho de QoS	5%
ERT	ganho de capacidade	40.5%
RMA	ganho de QoS	9%
RMA	ganho de capacidade	106%
QBA	ganho de QoS	8%
QBA	ganho de capacidade	114.5%
UTA	ganho de QoS	8%
UTA	ganho de capacidade	117.5%

- Neste trabalho apenas Ponto de Acessos (APs)<sup>3</sup> situados no centro de uma setor foram considerados. Um estudo do posicionamento do AP poderia detectar regiões dentro do setor mais interessantes para a instalação de um AP, como por exemplo, regiões de onde o UTRAN não consegue oferecer boa qualidade de sinal.
- O serviço de *World Wide Web* (WWW) foi adotado por se adequar mais as RATs escolhidas (HSDPA e 802.11). É conhecido que serviços de tempo real como o *Voice over IP* (VoIP) são mais sensíveis a redes orientados a pacotes e sem garantia de Qualidade de Serviço (QoS)<sup>4</sup>. Uma opção seria estudar tais serviços na rede de MA, adaptando os algoritmos de AS. Nesse contexto o *Vertical Handover* (VHO) entra como um fator limitante importante e também deveria ser considerado.
- Como visto neste trabalho, a combinação *High Speed Downlink Packet Access* (HSDPA)-802.11a se mostrou bastante restrita em termos de possibilidades para os algoritmos de AS inteligentes. Uma possibilidade interessante seria estudar redes de MA com outras composições diferentes. O simulador de MA implementado neste trabalho é escalável o suficiente para permitir tais adições no futuro.

---

<sup>3</sup>do Inglês, (AP), *Access Point*

<sup>4</sup>do Inglês, (QoS), *Quality of Service*

- Vimos que os algoritmos de AS que levam em conta tanto as condições do usuário quanto as das RATs tem o melhor desempenho. Especula-se que algoritmos que sejam capazes de prever as condições do usuário e seu efeito quando conectado à RAT tenham um melhor desempenho. Portanto, seria interessante conceber tais algoritmos para melhor apreciar suas reais possibilidades.
- Neste trabalho o VHO foi desabilitado. Porém, não há estudos sobre este procedimento na literatura que incluam as características dinâmicas das redes de MA. Tal estudo seria útil, ampliando a visão conhecida das características das redes de MA.
- Outros procedimentos de MA poderiam ser investigados no simulador de MA dinâmico, tais como o controle de congestionamento.

### 6.3 Contribuições

As contribuições deste trabalho são:

- A construção de um simulador de nível sistêmico e dinâmico que emula uma a rede de MA envolvendo os sistemas UTRAN e WLAN, em um nível de detalhes superior aos usados nos estudos encontrado na literatura.
- A avaliação da adoção do conceito de MA a uma rede UTRAN através da adição de uma AP WLAN como forma de agregar recursos de rádio nos cenários com e sem *hotspot*, levando em consideração os dinamismos dos sistemas envolvidos.
- A avaliação de desempenho de algoritmos de AS existentes e novos, incluindo os orientados à cobertura, usuário, rede e misto (usuário e rede), levando em consideração os dinamismos dos sistemas envolvidos.

- A proposta de um novo algoritmo de AS baseado em uma função utilidade que inclui a taxa de transmissão de dados estimada e o tamanho da fila de transmissão da RAT.

## 6.4 Publicações Científicas

Durante o transcorrer do trabalho de mestrado, o autor publicou alguns trabalhos que envolvem tanto os conceitos estudados quanto assuntos correlatos. Uma lista destes trabalhos segue:

- 2005:
  - (SBrT’05): “Fast Cell Selection Procedure Considering Network Constraints in HSDPA”. Andre R. Braga, Leonardo S. Cardoso and Francisco Rodrigo P. Cavalcanti.
  - (WWRF’05): “Performance of Access Selection Strategies in Cooperative Wireless Networks using Genetic Algorithms”. Vicente A. de Sousa Jr., Raimundo A. de O. Neto, Fabiano de S. Chaves, Leonardo S. Cardoso, Julio F. Pimentel and Francisco Rodrigo P. Cavalcanti.
- 2006:
  - (PIMRC’06): “Access Selection with Anticipatory Vertical Handover for Multi-Access Networks”. Vicente A. de Sousa Jr., Raimundo A. de O. Neto, Fabiano de S. Chaves, Leonardo S. Cardoso and Francisco Rodrigo P. Cavalcanti.
  - (ITS’06): “On the Adoption of WLAN for Capacity Improvement of 3G Networks Using the Multi-Access Framework”. Leonardo S. Cardoso, Vicente A. de Sousa Jr., Julio F. Pimentel and Francisco Rodrigo P. Cavalcanti.

- (ITS'06): “Access Selection with Anticipatory Vertical Handover for Multi-Access Networks”. Vicente A. de Sousa Jr., Raimundo A. de O. Neto, Fabiano de S. Chaves and Leonardo S. Cardoso and Francisco Rodrigo P. Cavalcanti.
- (ITS'06): “Quality of Service Evaluation of VoIP over HSDPA”. Leonardo R. N. Sousa, Marcene L. Carvalho, Emanuel B. Rodrigues, Leonardo S. Cardoso and Francisco Rodrigo P. Cavalcanti.



# Referências Bibliográficas

- [1] 3GPP. Feasibility Study on 3GPP System to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking. Technical Report TS 22.934 v6.2.0 - Release 6, 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, September 2003.
- [2] 3GPP. Requirements on 3GPP System to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking. Technical Report TS 22.234 v7.3.0 - Release 7, 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, December 2005.
- [3] 3GPP. 3GPP system to Wireless Local Area Network (WLAN) interworking. Technical Report TS 23.234, 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, December 2005.
- [4] 3GPP. 3GPP system to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking functional and architectural definition. Technical Report TS 23.934, 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, August 2002.
- [5] 3GPP. Improvement of RRM across RNS and RNS/BSS. Technical Report TS 25.881 v5.0.0 - Release 5, 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, December 2001.
- [6] 3GPP. Improvement of RRM across RNS and RNS/BSS. Technical Report TS 25.981 v0.3.0 - Release 6, 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, February 2003.

- [7] 3GPP. Feasibility Study on Location Services (LCS) for Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking. Technical Report TS 22.935 v7.0.0 - Release 7, 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, September 2005.
- [8] 3GPP. LCS Architecture for 3GPP Interworking WLAN. Technical Report TS 23.837 v0.1.0 - Release 7, 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, January 2006.
- [9] 3GPP. Quality of Service (QoS) and Policy Aspects of 3GPP - Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking. Technical Report TS 23.836 v1.0.0 - Release 7, 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, November 2005.
- [10] 3GPP. 3GPP System to Wireless Local Area Network (WLAN) Interworking User Equipment (UE) to Network Protocols. Technical Report TS 24.234, 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, December 2005.
- [11] Eduardo Simon de la Fuente et al. UMTS, MBS and DBS network and service management system architecture: technical requirements and functionality description. Technical report, MONASIDRE IST-2000-26144, June 2001.
- [12] WINNER IST project. Wireless world initiative new radio. <https://www.ist-winner.org/>.
- [13] Fernando Casadeval. Final report. Technical report, EVEREST IST-2002-001858, January 2006.
- [14] Norbert Niebert, Hannu Flinck, Robert Hancock, Holger Karl, and Christian Prehofer. Ambient Networks - Research for communication networks beyond 3G. *13th IST Mobile and Wireless Communications Summit*, June 2004.

- [15] Angela Doufexi, Eustace Tameh, Andrew Nix, and Simon Armour. Hotspot Wireless LANs to Enhance the Performance of 3G and Beyond Cellular Networks. *IEEE Communications Magazine*, pages 58–65, July 2003.
- [16] Hongbo Liu, Hamsini Bhaskaran, D. Raychaudhuri, and Shaily Verma. Capacity Analysis of a Cellular Data System with 3G/WLAN Interworking. In *Vehicular technology conference, 2003. vtc 2003-fall. 2003 ieee 58th*, volume 3, pages 1817–1821, October 2003.
- [17] A. Furuskar. *Radio Resource Sharing and Bearer Service Allocation for Multi-Bearer Service, Multi-Access wireless networks - methods to improve capacity*. PhD thesis, Royal Institute of Technology - KTH, 2003.
- [18] Anders Furuskär. Allocation of Multiple Services in Multi-Access Wireless Networks. In *Mobile and Wireless Communications Network, 2002. 4th International Workshop*, pages 261–265, December 2002.
- [19] Oya Yilmaz, Anders Furuskar, Jonas Pettersson, and Arne Simonsson. Access selection in WCDMA and WLAN multi-access networks. In *Vehicular Technology Conference, 2005. VTC 2005-Spring. 2005 IEEE 61st*, volume 4, pages 2220–2224, June 2005.
- [20] Oya Yilmaz. Access selection in multi-access cellular and WLAN networks. Master’s thesis, Royal Institute of Technology, Sweden, Stockholm, February 2005.
- [21] Vicente A. de Sousa Jr., Raimundo A. de O. Neto, Fabiano de S. Chaves, and Francisco Rodrigo P. Cavalcanti. Attractiveness of Intelligent Access Selection for Multi-Access beyond 3G Wireless Networks. To appear in PIMRC’06.
- [22] Francisco Rodrigo P. Cavalcanti, Vicente A. de Sousa Jr., Raimundo A. de O. Neto, and Fabiano de S. Chaves. Impact of Intelligent Access

- Selection Algorithms in Cooperative Wireless Networks. To appear in ITS'06.
- [23] Vicente A. de Sousa Jr., Raimundo A. de O. Neto, Fabiano de S. Chaves, Leonardo S. Cardoso, Julio F. Pimentel, and Francisco Rodrigo P. Cavalcanti. Performance of Access Selection Strategies in Cooperative Wireless Networks using Genetic Algorithms. 2005.
- [24] Vicente A. de Sousa Jr., Raimundo A. de O. Neto, Fabiano de S. Chaves, Leonardo S. Cardoso, Julio F. Pimentel, and Francisco Rodrigo P. Cavalcanti. Access Selection with Anticipatory Vertical Handover for Multi-Access Networks. To appear in PIMRC'06.
- [25] Vicente A. de Sousa Jr., Raimundo A. de O. Neto, Fabiano de S. Chaves, Leonardo S. Cardoso, and Francisco Rodrigo P. Cavalcanti. Access Selection with Connection Reallocation for Multi-Access Networks. To appear in ITS'06.
- [26] Vicente A. de Sousa Jr., Raimundo A. de O. Neto, Alex P. da Silva, and Francisco Rodrigo P. Cavalcanti. Conception and Evaluation of Access Selection Algorithms for Cooperative Beyond 3G Systems. To appear in ITS'06.
- [27] Alex P. da Silva, Fabiano de S. Chaves, Vicente A. de Sousa Jr., Raimundo A. de O. Neto, and Francisco Rodrigo P. Cavalcanti. Performance Evaluation of Access Selection Algorithms for VoIP on Wireless Multi-Access Networks. To appear in ITS'06.
- [28] Klas Johansson and Anders Furuskär. Cost efficient capacity expansion strategies using multi-access networks.
- [29] Theodore S. Rappaport. *Wireless Communications: Principles and Practice*. Prentice Hall Communications Engineering and Emerging Technologies Series. Prentice Hall PTR, 2 edition, 2002.

- [30] Harri Holma and Antti Toskala. *WCDMA for UMTS: radio access for third generation mobile communications*. John Wiley & Sons, Ltd, 3 edition, 2004.
- [31] Apsotolis K. Salkinitzis, Chad Fors, and Rajesh Pazhyannur. WLAN-GPRS Integration For Next-Generation Mobile Data Networks. *IEEE Wireless Communications*, pages 112–124, October 2002.
- [32] Wireless Internet & Mobile Computing. Wireless lans + cellular: An introduction.
- [33] C. Bader, V. Friderikos, I. Ganchev, A. S. Jahan, G. Morabito, R. Narcisi, M. O’Drama, S. Paskalis, and N. Passas. Definition of the Always Best Connected concepts. Technical report, ANWIRE IST-2001-38835, February 2003.
- [34] Susi Andriani et al. Top-level architecture for providing seamless QoS, security, accounting and mobility to applications and services. Technical report, MIND IST-2000-28584, November 2002.
- [35] Norbert Niebert, Nick Papadoglou, Lars Eggert, Frank Pittmann, and Christian Prehofer. Ambient Networks: A framework for Future Wireless Interworking. *PIMRC*, October 2005.
- [36] Joachim Sachs, Luis Muñoz, Ramón Agüero, Johnny Choque, George Koudouridis, Reza Karimi, Ljupco Jorguseski, Jens Gebert, Francesco Meago, and Fredrik Bergen. Future Wireless Communication based on Multi-Radio Access. *Wireless World Research Forum 11th Meeting*, June 2004.
- [37] Jaana Laiho, Achim Wacker, and Tomas Novosad. *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*. John Wiley and Sons, 1 edition, January 2002.
- [38] IEEE. Supplement to IEEE 802.11 Standart: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications:

- High-Speed Physical Layer Extension in the 5GHz Band. Standard, IEEE, September 1999.
- [39] IEEE. IEEE 802.11 Standard: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. Standard, IEEE, August 1999.
- [40] Júlio F. Pimentel. Novos Algoritmos de 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, June 2006.
- [41] Ramjee Prasad and Luis Muñoz. *WLANS and WPANS towards 4G Wireless*. Artech House, 1 edition, 2003.
- [42] UMTS. Selection procedures for the choice of radio transmission technologies of the UMTS. Technical report, ETSI, UMTS TR 101.112 v.3.2.0, April 1998.
- [43] Andre R. Braga. Controle de Congestionamento em Voz sobre IP em HSDPA. Master's thesis, Universidade Federal do Ceará, May 2006.
- [44] Paulo Cardieri. *Resource allocation and adaptive antennas in cellular communications*. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, USA, September 2000.
- [45] Jens Zander, Seong-Lyun Kim, Magnus Almgren, and Olav Queseth. *Radio Resource Management for Wireless Networks*. Mobile Communications Series. Artech House Publishers, London, 2001.
- [46] P. Alzén. Multi-cell performance of IEEE 802.11a wireless lans. Master's thesis, LULEA University of Technology, Sweden, Stockholm, January 2004.
- [47] Plamen I. Bratanov. *User mobility modeling in cellular communications networks*. PhD thesis, Technischen Universität Wien, February 1999.

- [48] Tracy Camp, Jeff Boleng, and Vanessa Davies. A Survey of Mobility Models for Ad Hoc Network Research. *Wireless Communications and Mobile Computing (WCMC)*, 2(5):483–502, 2002.
- [49] 3GPP. Physical Layer Procedures (FDD). Technical Report TS 25.214 v6.4.0 - Release 6, 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, January 2005.
- [50] Seppo Hämäläinen, Peter Slanina, Magnus Hartman, Antti Lappeteläinen, Harri Holma, and Oscar Salonaho. A Novel Interface Between Link and System Level Simulations. In *Proceedings of ACTS Mobile Telecommunication Summit*, pages 599–604, October 1997.
- [51] Hakan Olofsson, Magnus Almgren, Christer Johansson, Mikael Hook, and Fredric Kronestedt. Improved Interface Between Link Level and System Level Simulations Applied to GSM. In *Universal Personal Communications Record, 1997. Conference Record., 1997 IEEE 6th International Conference on*, volume 1, pages 79–83, October 1997.
- [52] 3GPP. Medium Access Control (MAC) Protocol Specification. Technical Report TS 25.321 v6.3.0 - Release 6, 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, January 2005.
- [53] 3GPP. Requirements for support of radio resource management (FDD). Technical Report TS 25.308 V6.3.0 - Release 6, 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, December 2004.
- [54] 3GPP. Radio Link Control (RLC) Protocol Specification. Technical Report TS 25.322 v6.2.0 - Release 6, 3<sup>rd</sup> Generation Partnership Project, Sophia Antipolis, France, December 2004.