



Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

Dissertação de Mestrado

**Avaliação de Desempenho da Camada Física  
de Redes do Sistema de Telecomunicações  
Móveis Universal**

Jerônimo Silva Rocha

Campina Grande – PB  
Maio de 2008

Universidade Federal de Campina Grande  
Centro de Engenharia Elétrica e Informática  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica

## **Avaliação de Desempenho da Camada Física de Redes do Sistema de Telecomunicações Móveis Universal**

Jerônimo Silva Rocha

Dissertação de Mestrado submetida à Coordenação do Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica do Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como requisito necessário para obtenção do grau de Mestre em Ciências no Domínio da Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Comunicações.

Marcelo Sampaio de Alencar  
Orientador

José Ewerton Pombo de Farias  
Orientador

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

R672a

2008 Rocha, Jerônimo Silva.

Avaliação de desempenho da camada física de redes do sistema de telecomunicações móveis universal / Jerônimo Silva Rocha. — Campina Grande, 2008.

84f. : il.

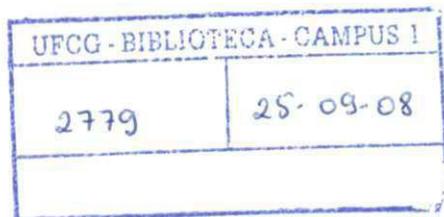
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática.

Referências.

Orientadores: Dr. Marcelo Sampaio de Alencar e Dr. José Everton Pombo de Farias.

1. Sistema de Telecomunicações Móveis Universal. 2. Análise de Desempenho . I. Título.

CDU – 621.396.7(043)



**AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO DA CAMADA FÍSICA DE REDES DO SISTEMA  
DE TELECOMUNICAÇÕES MÓVEIS UNIVERSAL**

**JERÔNIMO SILVA ROCHA**

Dissertação Aprovada em 04.07.2008



**MARCELO SAMPAIO DE ALENCAR, Ph.D., UFCG**  
**Orientador**



**JOSÉ EWERTON POMBO DE FARIAS, Dr., UFCG**  
**Orientador**



**JOAQUIM FERREIRA MARTINS FILHO, Ph.D., UFPE**  
**Componente da Banca**



**EDMAR CANDEIA GURJÃO, D.Sc., UFCG**  
**Componente da Banca**

CAMPINA GRANDE - PB  
JUNHO-2008

*A meus pais, Gilberto e Eva.*

---

---

# Agradecimentos

---

A Deus, por permitir a existência daqueles a quem agradeço em seguida, por me fortalecer sempre, em fim, por tudo.

À minha família, pelo apoio e confiança incondicionais em todo tempo.

Aos professores Marcelo Sampaio de Alencar e José Ewerton Pombo de Farias, pela sábia orientação e amizade durante todo caminho percorrido neste trabalho.

Aos meus amigos, Paulo, Danilo, Jean, Gilney, Erik, Késia, Ádrian e Jonas, pela amizade e apoio durante o trabalho no laboratório e na vida pessoal.

Ao CNPq pelo aporte financeiro, sem o qual seria impossível a realização deste trabalho.

Ao Iecom, que forneceu toda a infraestrutura necessária para a realização deste trabalho.

---

---

# Resumo

---

Este trabalho apresenta a avaliação de desempenho da camada física de uma rede do Sistema de Telecomunicações Móveis Universal macrocelular, com área de cobertura caracterizada como um ambiente suburbano, por meio de simulações estáticas segundo o método de Monte Carlo. Essa avaliação de desempenho se concentra em características da rede relacionadas com a interferência de múltiplo acesso e com a capacidade de atendimento simultâneo de usuários de várias classes de serviços e diferentes velocidades de deslocamento dos usuários na área de cobertura da rede. As análises são apresentadas em função da densidade de usuários na área de cobertura da rede e são feitas para o enlace de subida e de descida.

A interferência de acesso múltiplo é analisada por meio da relação portadora-interferência média nas células e razão entre a interferência de outras células sobre a da célula observada. A capacidade é dimensionada usando o número médio de usuários atendidos simultaneamente pelas células, o fator de carga médio no enlace de subida e a vazão média no enlace de descida.

O número médio de usuários por célula apresenta um limite que depende de características da rede relacionadas com a interferência de acesso múltiplo e com o limite de potência de transmissão estabelecido no planejamento da rede. A razão portadora-interferência diminui com a densidade e com a velocidade de deslocamento dos usuários na área de cobertura da rede. Como o número médio de usuários por célula é limitado, a vazão média por célula também é limitada.

**Palavras-chave:** UMTS, WCDMA, Análise de desempenho, redes UMTS

---

---

# Abstract

---

This work presents the performance evaluation of the physical layer of a macro-cellular Universal Mobile Telecommunication System network, using static simulations and the Monte Carlo method. The coverage area is characterized as a suburban environment. That evaluation focuses on the network performance characteristics, which are related to the multiple access interference and the capacity to serve simultaneous users from various service classes and different velocities, within of network range. The analysis is presented according to the density of users in the uplink and downlink directions.

The multiple access interference is examined using the average carrier-to-interference ratio and average other-to-own interference ratio. The capability is measured using the average number of users served simultaneously by the cells, the average uplink load factor and average downlink throughput.

The average number of users per cell presents a limit, which depends on the network characteristics related to the multiple access interference and to the maximum transmission power defined during the network planing phase. The carrier to interference ratio decreases with the user velocity inside the coverage area. The average number of users per cell is limited, which limits the cell average throughput.

**Keywords:** UMTS, WCDMA, Performance evaluation, UMTS networks

---

---

# Sumário

---

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
1.1	Objetivos . . . . .	2
1.2	Revisão Bibliográfica . . . . .	3
1.3	Contribuições . . . . .	5
1.4	Estrutura do Texto . . . . .	5
<b>2</b>	<b>Sistema de Telecomunicações Móveis Universal</b>	<b>7</b>
2.1	Introdução . . . . .	7
2.2	Serviços Oferecidos no Sistema UMTS . . . . .	9
2.2.1	Classes de Serviços UMTS . . . . .	10
2.3	Arquitetura de uma Rede UMTS . . . . .	13
2.3.1	Arquitetura em Alto Nível . . . . .	14
2.3.2	Camadas e Suas Funcionalidades . . . . .	15
2.4	Interface Aérea Baseada em WCDMA . . . . .	18
2.4.1	Características do Sistema WCDMA . . . . .	20
2.4.2	Estrutura de Canais . . . . .	30
2.4.3	Transmissão . . . . .	31
2.4.4	Ambiente de Propagação . . . . .	35
2.4.5	Recepção . . . . .	37
<b>3</b>	<b>Simulações</b>	<b>40</b>
3.1	Tipos de Simulação . . . . .	41
3.1.1	Simulações Estáticas . . . . .	41
3.1.2	Simulações Dinâmicas . . . . .	43
3.2	Metodologia de Simulação Estática . . . . .	43
3.2.1	Predição de Cobertura . . . . .	43
3.2.2	Análise de Desempenho . . . . .	44
3.2.3	Capacidade no Enlace de Subida . . . . .	47
3.2.4	Capacidade no Enlace de Descida . . . . .	48
3.3	Simulações Realizadas . . . . .	49

---

3.3.1	Distribuição das Estações Móveis . . . . .	51
3.3.2	Características da Rede Celular . . . . .	52
<b>4</b>	<b>Resultados</b>	<b>54</b>
4.1	Desempenho no Enlace de Subida . . . . .	54
4.1.1	Análise da Interferência . . . . .	54
4.1.2	Capacidade da Rede . . . . .	55
4.2	Desempenho no Enlace de Descida . . . . .	56
4.2.1	Análise da Interferência . . . . .	56
4.2.2	Capacidade da Rede . . . . .	58
4.2.3	Potência de Transmissão . . . . .	64
<b>5</b>	<b>Conclusões</b>	<b>66</b>
<b>A</b>	<b>O Simulador NPSW</b>	<b>68</b>
A.1	O Simulador Estático NPSW . . . . .	68
A.1.1	Fases das Simulações . . . . .	69
A.1.2	Procedimento Geral de Inicialização . . . . .	70
A.1.3	Dados de Entrada . . . . .	72
A.2	Cálculos Realizados Pelo Simulador . . . . .	73
A.3	Visualização dos Resultados . . . . .	73
A.3.1	Distribuição de Usuários . . . . .	75
A.3.2	Taxa de Dados de Usuários . . . . .	75
A.3.3	Carga na Célula . . . . .	75
A.3.4	Relação entre a Interferência das Outras Células e a Interferência da Própria Célula . . . . .	75

---

---

# Lista de Figuras

---

2.1	Classe A: serviços de conversação. . . . .	11
2.2	Classe B: serviços de fluxo. . . . .	12
2.3	Classe C: serviços interativos. . . . .	12
2.4	Classe D: transição em <i>background</i> . . . . .	13
2.5	Classes de serviço no sistema UMTS. . . . .	13
2.6	Arquitetura de uma rede UMTS. . . . .	13
2.7	Domínios em UMTS. . . . .	14
2.8	Fluxos entre domínios em UMTS. . . . .	16
2.9	Fluxos entre domínios e entidade remota em UMTS. . . . .	17
2.10	Alocação de banda no WCDMA. . . . .	19
2.11	Processo de espalhamento espectral. . . . .	21
2.12	Processo inverso ao espalhamento espectral. . . . .	22
2.13	Princípio do receptor por correlação. (a) Sinal recuperado usando o código correto. (b) Sinal interferente recuperado usando o código do sinal anterior. . . . .	23
2.14	Controle de potência. . . . .	24
2.15	Efeito do controle de potência. . . . .	26
2.16	Controle de potência em laço externo. . . . .	26
2.17	Operação de <i>softer handover</i> . . . . .	27
2.18	Operação de <i>soft handover</i> . . . . .	27
2.19	Modos de duplexação (a)FDD e (b)TDD. . . . .	28
2.20	Estrutura de canais na rede de acesso. . . . .	30
2.21	Transmissão paralela dos DPDCH/DPCCH com a presença/ausência de dados. . . . .	31
2.22	Modulação e espalhamento no enlace de subida. . . . .	32
2.23	Modulação e espalhamento no enlace de descida. . . . .	34
2.24	Tipos de ambientes de propagação. . . . .	36
2.25	MRC em um receptor Rake para CDMA. . . . .	38
2.26	Diagrama de blocos para um receptor Rake para CDMA. . . . .	38
3.1	Avaliação de Desempenho Usando o Método de Simulação de Monte Carlo. . . . .	42
3.2	Processo de simulação realizado. . . . .	50

---

3.3	Espoo, Finlândia. . . . .	53
4.1	Razão média $\bar{I}^{ES}$ no enlace de subida. . . . .	55
4.2	Razão média $\bar{I}^{ES}$ no enlace de subida (ampliação). . . . .	56
4.3	Razão média $\bar{I}^{ES}$ , com diversas velocidades. . . . .	56
4.4	Fator de carga no enlace de subida $\bar{\eta}^{ES}$ . . . . .	57
4.5	Fator de carga no enlace de subida $\bar{\eta}^{ES}$ , com diversas velocidades. . . . .	57
4.6	Relação portadora-interferência média nas células. . . . .	58
4.7	Relação portadora-interferência média nas células, para diversas velocidades. . . . .	59
4.8	Número médio de usuários servidos por célula. . . . .	59
4.9	Percentual de usuários servidos na rede. . . . .	60
4.10	Número médio de usuários servidos por célula, para diversas velocidades. . . . .	61
4.11	Vazão média por célula na rede. . . . .	63
4.12	Vazão média por célula, para diversas velocidades. . . . .	64
4.13	Potência de transmissão das estações radiobase. . . . .	65
4.14	Potência de transmissão das estações radiobase, para diversas velocidades. . . . .	65
A.1	Tela Inicial do NPSW. . . . .	68
A.2	Estrutura básica do NPSW. . . . .	69
A.3	Exemplo de Ajuste de Parâmetros no Arquivo <b>npswsys.m</b> . . . . .	71
A.4	Exemplo de ajuste de parâmetros no arquivo <b>npswini.m</b> . . . . .	78
A.5	Exemplo de ajuste de parâmetros no arquivo <b>mapini.m</b> . . . . .	78
A.6	Distribuição de usuários no mapa. . . . .	79
A.7	Usuários bloqueados pela limitação da potência de transmissão da estação radiobase. . . . .	79
A.8	Carga nas células provocada por todos os usuários da rede. . . . .	80
A.9	Relação entre a interferência das outras células e a interferência da própria célula. . . . .	80

---

---

# Lista de Tabelas

---

2.1	Principais parâmetros WCDMA. . . . .	29
3.1	Classes de serviços oferecidos pela rede em simulação. . . . .	51
3.2	Distribuição das classes de serviços. . . . .	52
3.3	Parâmetros das estações radiobase. . . . .	52
4.1	Percentual de usuários atendidos. . . . .	62
A.1	Exemplo de entrada de informações das estações radiobase . . . . .	73
A.2	Exemplo de entrada de informações das estações móveis. . . . .	73

---

---

# Lista de Siglas

---

<b>1G</b>	<i>First Generation of Mobile Communications</i>	Primeira Geração de Comunicações Móveis
<b>2G</b>	<i>Second Generation of Mobile Communications</i>	Segunda Geração de Comunicações Móveis
<b>2,5G</b>	<i>Second and Half Generation of Mobile Communications</i>	Geração 2,5 de Comunicações Móveis
<b>3G</b>	<i>Third Generation of Mobile Communications</i>	Terceira Geração de Comunicações Móveis
<b>3GPP</b>	<i>Third Generation Partnership Project</i>	Projeto de Parceria para a Terceira Geração
<b>AMPS</b>	<i>Advanced Mobile Phone System</i>	Sistema de Telefonia Móvel Avançada
<b>ASIC</b>	<i>Application-Specific Integrated Circuit</i>	Circuito Integrado de Aplicação Específica
<b>BCH</b>	<i>Broadcast Channel</i>	Canal de Difusão
<b>BER</b>	<i>Bit Error Rate</i>	Taxa de Erro de <i>Bit</i>
<b>BPSK</b>	<i>Binary Phase Shift Keying</i>	Chaveamento por Deslocamento de Fase
<b>BSC</b>	<i>Base Station Controller</i>	Controlador de Estação Radiobase
<b>CDMA</b>	<i>Code Division Multiple Access</i>	Acesso Múltiplo por Divisão em Código
<b>CN</b>	<i>Core Network</i>	Rede Núcleo
<b>CPCH</b>	<i>Uplink Common Packet Channel</i>	Canal de Pacotes Comum no Enlace de Subida
<b>CPICH</b>	<i>Common Pilot Channel</i>	Canal Piloto Comum
<b>DCH</b>	<i>Dedicated Channel</i>	Canal Dedicado
<b>DECT</b>	<i>Digital Enhanced Cordless Telecommunications</i>	Sistema de Telecomunicações Digitais Sem Fio Melhoradas
<b>DPCH</b>	<i>Dedicated Physical Channel</i>	Canal Físico Dedicado
<b>DPDCH</b>	<i>Dedicated Physical Data Channel</i>	Canal Físico de Dados Dedicado

<b>DPCCH</b>	<i>Dedicated Physical Control Channel</i>	Canal de Controle Físico Dedicado
<b>DSCH</b>	<i>Downlink Shared Channel</i>	Canal Compartilhado no Enlace de Descida
<b>DSP</b>	<i>Digital Signal Processor</i>	Processador Digital de Sinais
<b>ED</b>	<i>Downlink</i>	Enlace de Descida
<b>EDGE</b>	<i>Enhanced Data Rate for GSM Evolution</i>	Taxas Elevadas de Transmissão de Dados para a Evolução do GSM
<b>EIR</b>	<i>Equipment Identity Register</i>	Registrador de Identidade do Equipamento
<b>EM</b>	<i>Mobile Station</i>	Estação Móvel
<b>ERB</b>	<i>Base Station</i>	Estação Radiobase
<b>ES</b>	<i>Uplink</i>	Enlace de Subida
<b>ETSI</b>	<i>European Telecommunications Standard Institute</i>	Instituto Europeu de Padrões de Telecomunicações
<b>FACH</b>	<i>Forward Access Channel</i>	Canal de Acesso Direto
<b>FDD</b>	<i>Frequency Division Duplex</i>	Duplexação por Divisão em Frequência
<b>FDMA</b>	<i>Frequency Division Multiple Access</i>	Acesso Múltiplo por Divisão em Frequência
<b>GPRS</b>	<i>General Radio Packet Service</i>	Serviço Geral de Pacotes de Rádio
<b>GPS</b>	<i>Global Positioning System</i>	Sistema de Posicionamento Global
<b>GSM</b>	<i>Global System for Mobile</i>	Sistema Global para Comunicações Móveis
<b>HLR</b>	<i>Home Location Register</i>	Registrador de Localização Doméstica
<b>HPSK</b>	<i>Hybrid Phase Shift Keying</i>	Chaveamento por Deslocamento de Fase Híbrido
<b>HSPA</b>	<i>High Speed Packet Access</i>	Acesso a Pacotes de Alta Velocidade
<b>HSDPA</b>	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>	Acesso a Pacotes no Enlace de Descida de Alta Velocidade
<b>HSUPA</b>	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>	Acesso a Pacotes no Enlace de Subida de Alta Velocidade
<b>IS-95A</b>	<i>Interim Standard – 95A</i>	Padrão Interino – 95A
<b>IS-95B</b>	<i>Interim Standard – 95B</i>	Padrão Interino – 95B
<b>IMT-2000</b>	<i>International Mobile Telecommunications – 2000</i>	Telecomunicações Móveis Internacionais – 2000
<b>IMT-DS</b>	<i>International Mobile Telecommunications – Direct Sequence</i>	Telecomunicações Móveis Internacionais – Sequência Direta

<b>IMT-MC</b>	<i>International Mobile Telecommunications – Multi-Carrier</i>	Telecomunicações Móveis Internacionais – Multi-portadora
<b>IMT-TC</b>	<i>International Mobile Telecommunications – Time-Code</i>	Telecomunicações Móveis Internacionais – Código Temporal
<b>IMT-SC</b>	<i>International Mobile Telecommunications – Single Carrier</i>	Telecomunicações Móveis Internacionais – Portadora Única
<b>IMT-FT</b>	<i>International Mobile Telecommunications – Frequency-Time</i>	Telecomunicações Móveis Internacionais – Frequência-Tempo
<b>ITU</b>	<i>International Telecommunication Union</i>	União Internacional de Telecomunicações
<b>MAC</b>	<i>Medium Access Control</i>	Controle de Acesso ao Meio
<b>MAI</b>	<i>Multiple Access Interference</i>	Interferência de Acesso Múltiplo
<b>MCS</b>	<i>Mobile Communication System</i>	Sistema de Comunicação Móvel
<b>ME</b>	<i>Mobile Equipment</i>	Equipamento Móvel
<b>MRC</b>	<i>Maximal Ratio Combining</i>	Combinação por Razão Máxima
<b>MSC</b>	<i>Mobile Services Switching Centre</i>	Centro de Comutação de Serviços Móveis
<b>MUD</b>	<i>Multiple User Detection</i>	Detecção Multi-Usuário
<b>NMT</b>	<i>Nordiska Mobil Telefongruppen</i>	Grupo Nórdico de Telefonia Móvel
<b>Node B</b>	<i>Base Node</i>	Estação Radiobase
<b>NPSW</b>	<i>Network Planning Strategies for Wideband CDMA</i>	Sistema de Estratégias de Planejamento de Redes WCDMA
<b>OVSF</b>	<i>Orthogonal Variable Spreading Factor</i>	Fator de Espalhamento Variável Ortogonal
<b>PCH</b>	<i>Paging Channel</i>	Canal de Busca
<b>QPSK</b>	<i>Quadrature Phase Shift Keying</i>	Chaveamento por Deslocamento de Fase em Quadratura
<b>RACH</b>	<i>Random Access Channel</i>	Canal de Acesso Aleatório
<b>RAN</b>	<i>Radio Access Network</i>	Rede de Acesso via Rádio
<b>RF</b>	<i>Radio Frequency</i>	Frequência de Rádio
<b>RLC</b>	<i>Radio Link Control</i>	Controle de Enlace Radioelétrico
<b>RNC</b>	<i>Radio Network Controller</i>	Controlador de Rede Radioelétrica
<b>RRM</b>	<i>Radio Resource Management</i>	Gerenciamento de Recursos Radioelétricos
<b>RTPC</b>		Rede de Telefonia Pública Comutada
<b>SGSN</b>	<i>Serving GPRS Support Node</i>	Nó de Suporte ao Serviço GPRS
<b>SIR</b>	<i>Signal Interference Ratio</i>	Razão Sinal-Interferência
<b>TACS</b>	<i>Total Access Communication System</i>	Sistema de Comunicação de Acesso Total

---

<b>TDD</b>	<i>Time Division Duplex</i>	Duplexação por Divisão no Tempo
<b>TDMA</b>	<i>Time Division Multiple Access</i>	Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo
<b>UE</b>	<i>User Equipment</i>	Equipamento do Usuário
<b>UMTS</b>	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>	Sistema de Telecomunicações Móveis Universal
<b>USIM</b>	<i>UMTS Subscriber Identity Module</i>	Módulo de Identificação do Assinante UMTS
<b>UWC-136</b>	<i>Universal Wireless Communications 136</i>	Sistema de Comunicações Sem Fio Universal 136
<b>UTRAN</b>	<i>UMTS Terrestrial Radio Access Network</i>	Rede de Acesso Terrestre UMTS
<b>VHE</b>	<i>Virtual Home Environment</i>	Ambiente Doméstico Virtual
<b>VLR</b>	<i>Visitor Location Register</i>	Registrador de Localização do Visitante
<b>WCDMA</b>	<i>Wideband Code Division Multiple Access</i>	Acesso Múltiplo por Divisão em Código de Faixa Larga

---

---

# Lista de Símbolos

---

$\alpha$	Fator de ortogonalidade
$\bar{\alpha}$	$1 - \alpha$
$SF$	Fator de espalhamento espectral
$R_D$	Taxa de transmissão de dados
$W_C$	Taxa de <i>chips</i>
$PG$	Ganho de processamento
$W_A$	Largura de faixa do sinal espalhado
$W_S$	Largura de faixa do sinal de dados
$W_{CO}$	Faixa de coerência do canal
$E_b$	Energia por <i>bit</i>
$N_0$	Densidade espectral de potência do ruído
$E_b/N_0$	Relação sinal-ruído de <i>bit</i>
$N^{ES}$	Potência do ruído no enlace de subida
$N^{ED}$	Potência do ruído no enlace de descida
$C/I$	Relação portadora-interferência
$T_c$	Tempo de coerência do canal
$T_0$	Período do símbolo transmitido
$T$	Temperatura absoluta em kelvin (K)
$L_{kj}^{ES}$	Fator de atenuação entre a estação móvel $j$ e a estação radiobase $k$ , no enlace de subida
$L_{jk}^{ED}$	Fator de atenuação entre a estação radiobase $k$ e a estação móvel $j$ , no enlace de descida
$\gamma^{ES}$	Relação portadora-interferência no enlace de subida
$\gamma^{ED}$	Relação portadora-interferência no enlace de descida
$P_j^{ES}$	Potência do sinal transmitido pelo $j$ -ésimo usuário na célula $k$
$P_{jk}^{ED}$	Potência do sinal transmitido pela estação radiobase $k$ para a estação móvel $j$
$\nu^{ES}$	Fator de atividade de serviço no enlace de subida
$\eta^{ES}$	Fator de carga no enlace de subida
$\rho_j^{ES}$	$E_b/N_0$ no enlace de subida, para o $j$ -ésimo usuário
$R_j^{ES}$	Taxa de transmissão de dados no enlace de subida, para o $j$ -ésimo usuário
$\nu_j^{ES}$	Fator de atividade de serviço no enlace de subida, para o $j$ -ésimo usuário

---

$I_o^{ES}$	Interferência causada por usuários de outras células, no enlace de subida
$I_p^{ES}$	Interferência causada pelos usuários da célula sob observação, no enlace de subida
$I^{ES}$	Razão entre $I_o^{ES}$ e $I_p^{ES}$ , no enlace de subida
$\eta_k^{ES}$	Fator de carga no enlace de subida, para a célula $k$
$IM_k$	Margem de interferência
$\kappa$	Constante de Boltzmann ( $\kappa = 1,381 \cdot 10^{-23}$ J/K)

## CAPÍTULO 1

---

# Introdução

---

A comunicação móvel celular no Brasil teve início em 1990, no Rio de Janeiro. Desde então esse tipo de comunicação cresce em número de acessos no País. Em Maio de 2008 o número de assinantes era maior que 127,5 milhões (ANATEL, 2008a). O número de assinantes da comunicação móvel no mundo é também bastante expressivo, mais de 3,3 bilhões de assinantes (ITU, 2008). Junto com esse crescimento no número de acessos, cresceu também a demanda por novos serviços com taxas de transmissão cada vez maiores, exigindo mais das tecnologias empregadas pelas empresas operadoras.

Os sistemas de comunicações móveis passaram pela primeira geração e o seu crescimento e necessidade de expansão fez surgir a segunda geração, que diferente da anterior, emprega tecnologia digital no canal de voz. Mas, a capacidade limitada dos sistemas de segunda geração, comumente chamados de 2G, e a crescente necessidade de altas taxas de dados são as principais razões para o desenvolvimento das redes de terceira geração, conhecidas por 3G.

Algumas melhorias como GPRS (*General Radio Packet Service*) e EDGE (*Enhanced Data Rate for GSM Evolution*) foram desenvolvidas. Esses sistemas são freqüentemente chamados de 2,5G. O GPRS possibilitou a conectividade de redes de pacotes e o EDGE apresentou altas taxas de dados para usuários GPRS.

As soluções atuais para suprir a demanda de serviços com altas taxas de transmissão são os sistemas de comunicações móveis de terceira geração.

As primeiras redes 3G estão em uso em algumas áreas, mas a transição dos sistemas 2G para 3G ainda é um processo lento. Os planos para desenvolvimento pós 3G também estão abertos, e algumas melhorias para os sistemas 3G já estão definidas. Uma dessas técnicas, chamada 3,5G, é o HSPA (*High Speed Packet Access*).

No Brasil, a terceira geração das comunicações móveis está em exploração basicamente para transmissão de dados em aplicações como acesso à Internet. O sistema 3G predominantemente adotado pelas operadoras brasileiras é o UMTS/WCDMA e sua evolução, o HSPA. Mas a assinatura dos termos de autorização, em Abril de 2008, entre a ANATEL (Agência Nacional de Telecomunicações) e as operadoras, prevê a implantação de novos serviços 3G nos próxi-

mos quatro anos em todos os municípios brasileiros com mais de 200 mil habitantes (ANATEL, 2008b).

Para exploração eficiente desses sistemas é necessária a avaliação de desempenho dos sistemas de radioenlace. A seleção de soluções técnicas nos fóruns de padronização e nas equipes de desenvolvimento dos fabricantes são baseadas em comparações de desempenho. A avaliação também é necessária quando as operadoras planejam suas redes, *i.e.*, quando estimam a quantidade necessária de investimentos, a localização das estações radiobase e de elementos de configuração da rede. Depois que as redes são implantadas, é necessário avaliar os resultados para otimizá-las e proporcionar o máximo desempenho com dado investimento. A avaliação é necessária em todas as fases de desenvolvimento e funcionamento do sistema (HOLMA, 2003; FREUDENTHALER *et al.*, 2006).

A avaliação pode ser feita de várias formas, desde algoritmos de recepção, avaliação de desempenho de enlace de radiotransmissão, até avaliação de desempenho de rede com várias estações radiobase. A análise de enlace concentra-se no desempenho de uma ligação via rádio entre uma estação móvel e uma estação radiobase. A análise de rede foca desempenho de diversas estações radiobase e todas as estações móveis que estão simultaneamente ligadas a essas estações radiobase. Esses formatos são utilizados na análise de desempenho da camada física, mas uma avaliação de desempenho completa requer também análise das camadas superiores, incluindo o gerenciamento dos recursos radioelétricos (*Radio Resource Management – RRM*), funcionalidades e protocolos de comunicação.

As empresas operadoras e as empresas fabricantes de equipamentos têm interesse em ferramentas de avaliação de desempenho de redes celulares, tanto para planejar novas redes quanto para avaliar melhorias que algumas mudanças podem causar no desempenho de redes existentes. Recentemente foi fechado um convênio entre a Siemens, o Iecom (Instituto de Estudos Avançados em Comunicações) e o CAESER (Centro Avançado de Engenharia e Serviços do Recife), para desenvolvimento de algoritmos e um sistema de simulação de redes GSM e UMTS. O projeto realizado nesse convênio tinha o objetivo de suprir a necessidade da empresa por dados conclusivos sobre o desempenho de redes 3G com alterações em sua configuração. Esse projeto serviu de ponto de partida para o desenvolvimento deste trabalho.

## 1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho é a avaliação de desempenho da camada física de uma rede UMTS, considerando a comunicação nos enlaces de subida e de descida, em termos da interferência e da capacidade da rede, para várias classes de serviços e configurações de distribuição de usuários, com diferentes velocidades.

Para descrever melhor esses objetivos e apresentar as contribuições deste trabalho, é necessário primeiro fazer uma revisão bibliográfica para mostrar a viabilidade da proposta, bem como o caminho seguido. Na próxima seção são apresentados alguns trabalhos prévios sobre

análise de desempenho. Em seguida à apresentação da revisão, são apresentadas as contribuições deste trabalho.

## 1.2 Revisão Bibliográfica

Na literatura há vários trabalhos sobre análise de redes UMTS que priorizam o planejamento celular ou a otimização de técnicas de modulação, codificação ou protocolos de comunicação. Para contextualizar os objetivos deste trabalho, nessa seção são apresentadas algumas contribuições de trabalhos anteriores.

Alguns trabalhos apresentam a análise de desempenho de redes UMTS aplicando o conceito de repetidores, para aumentar a capacidade da rede, reduzindo a potência de transmissão (LÄHDEKORPI, 2006),(NIEMELÄ, 2006). Nesses trabalhos são apresentados resultados de simulações estáticas com várias configurações de posicionamento dos repetidores. Seus resultados apontam para um aumento da capacidade da rede, se bem ajustados os parâmetros dos repetidores, nos enlaces de subida e descida.

Estudos de otimização do planejamento celular verificam o efeito do posicionamento das estações radiobase na área de cobertura, o efeito da setorização das células, do tipo de antena usado e da inclinação das antenas (*downtilt*). E mostram o estudo do uso de técnicas de posicionamento dinâmico das estações radiobase (NIEMELÄ, 2006).

Em alguns trabalhos são mostrados resultados de simulações, com o mesmo simulador usado neste trabalho, para várias configurações de dados de entrada, como tipos de serviço e condições de carga. Esses trabalhos apresentam percentuais de usuários não atendidos para vários tipos de serviço, como chamadas de voz com taxa de transmissão de 12,2 *kbit/s* e de dados com taxa de 64, 144 e 384 *kbit/s*. Nas simulações são consideradas taxas de transmissão iguais para o enlace de subida e descida usando o modelo de propagação de Okumura-Hata. Alguns têm área de simulação correspondente a uma área urbana com alta densidade de usuários uniformemente distribuídos (MOSTARDEIRO, 2003), (RIBEIRO, 2003).

Resultados de simulações, usando o mesmo simulador deste trabalho, são apresentados empregando algumas técnicas de melhoria do enlace de subida, como redução do tamanho dos quadros de transmissão e detecção multi-usuário (MUD – *Multiple User Detection*). Essas técnicas permitem, por exemplo, o aumento da vazão no enlace estudado nesse enlace (RODRIGUES, 2005).

Há trabalhos que apresentam propostas de sistemas de simulação para análise de desempenho. Nesses trabalhos é feita a análise de desempenho de redes reais, com diferentes potências de transmissão das estações radiobase, com variações da topologia da rede e diferentes funções de gerenciamento de recursos radiolétricos. Os resultados das simulações são discutidos em termos, por exemplo, do fator de carga. Há comparações de alguns desses sistemas de simulação com o sistema usado neste trabalho, para validação dos resultados obtidos por eles (RIBEIRO, 2003), (SOLDANI, 2005). A conclusão de um desses trabalhos indica que os

dois ambientes de simulação são equivalentes do ponto de vista quantitativo e qualitativo dos seus resultados (RIBEIRO, 2003). Isso reforça a adoção do ambiente de simulação usado neste trabalho.

Há um trabalho em que é apresentada a análise de desempenho de uma rede UMTS hipotética em função da interferência e fator de carga no enlace de subida, para vários tipos de serviços. Alguns gráficos dessas grandezas são mostrados como função da densidade de usuários na área de cobertura da rede. Nesse trabalho foram consideradas pequenas densidades de usuários (até quinze usuários por quilômetro quadrado), distribuídos aleatoriamente com distribuição espacial de Poisson (LEIBNITZ; KRAUB, 2001).

A otimização de redes sem fio é o objetivo de alguns trabalhos. Há estudos para redes UMTS, redes locais sem fio e redes *Ad Hoc*. No que diz respeito a redes UMTS, a potência de transmissão no canal piloto é reduzida de forma que o consumo de energia seja reduzido, assim como os níveis de interferência na rede. Além disso, são propostas mudanças nas antenas das estações radiobase para redução da potência de transmissão necessária (SIOMINA, 2007).

Vários artigos na área de planejamento celular abordam a simulação para análise de desempenho. Esses trabalhos apresentam aumento da vazão com o uso de antenas inteligentes para reduzir os efeitos da interferência (TSILIMANTOS *et al.*, 2007). Análises da interferência, por meio de simulações, em redes WCDMA são apresentadas também, inclusive interferência de outros sistemas, por exemplo, *WiMax* (ZHOU *et al.*, 2007). Em outros são mostrados resultados de simulações com diferentes densidades de usuários na área de cobertura da rede e diferentes taxas de *chip*, que indicam como a eficiência espectral é afetada pela densidade de usuários (MATALGAH *et al.*, 2003). São feitas análises de desempenho de redes UMTS usando simulações estáticas, cujos resultados mostram para cenários simples, que as simulações se aproximam dos modelos analíticos e para cenários mais complexos os resultados são comparados com os de outro simulador (RIBEIRO; DASILVA, 2005). Há análises de desempenho de enlaces para diferentes velocidades de deslocamento dos usuários, que mostram a dependência da taxa de erro de *bit* em relação à razão portadora-interferência (ROCHA *et al.*, 2007).

Várias referências a respeito dos fundamentos de redes UMTS podem ser consultadas (NAWROCKI *et al.*, 2006), (HOLMA; TOSKALA, 2004), (LAIHO *et al.*, 2005a) e (KAARANEN *et al.*, 2005). Todas apresentam uma visão geral de redes UMTS abordando detalhes de funcionamento de várias camadas de rede, bem como técnicas de codificação e protocolos de comunicação. Essas referências, mostram também fundamentos de planejamento celular aplicado a redes UMTS e formas de análise de desempenho.

Todas essas referências bibliográficas foram consultadas para estabelecer um referencial de trabalho de análise de desempenho da camada física de redes de terceira geração. Os resultados mostrados nelas tornam possível identificar problemas a serem investigados e, a partir daí, dar alguma contribuição para a análise de desempenho de redes UMTS.

Dessa forma, algumas das possibilidades de estudo que complementam a literatura dizem respeito à análise da interferência de múltiplo acesso, para várias classes de serviços com

diferentes taxas de transmissão e várias configurações de distribuição de usuários. Em algumas das referências são feitas análises em termos de taxas de transmissão, mas sem considerar, por exemplo, a assimetria dos enlaces de subida e de descida na transmissão de alguns serviços, como televisão digital móvel.

Muitos dos trabalhos consideram redes genéricas e aplicam modelos de propagação empíricos. Poucos usam dados reais de redes, como mapas digitais do terreno em que está implantada a rede. Esses dados permitem calcular as perdas de percurso mais precisamente usando, por exemplo, o método do traçado de raios.

### 1.3 Contribuições

Dadas as possibilidades apresentadas na seção anterior, as contribuições deste trabalho são listadas a seguir:

- Utilização de um sistema de simulação de rede, seguindo o método de Monte Carlo, com dados de uma rede real e uso do método do traçado de raios para determinação das perdas de percurso;
- Análise da relação portadora-interferência e razão da interferência de outras células sobre a interferência da célula sob observação, como medidas da interferência de múltiplo acesso, em função do tipo de serviço solicitado pelos usuários, da variação da densidade de usuários na área de cobertura da rede e da velocidade de locomoção dos usuários;
- Análise da capacidade da rede para as diversas classes de serviços escolhidas e configurações de distribuição de usuários e velocidades, em termos do número médio de usuários atendidos por célula e do fator de carga apresentado para as diversas configurações;
- Comparação do percentual de usuários atendidos para cada classe de serviço, com o percentual de usuários nos dados de entrada das simulações;
- Análises realizadas para três possibilidades de qualidade de serviço de televisão digital móvel;
- Modificação do simulador adotado como base, para obtenção do sistema de simulação de Monte Carlo usado.

### 1.4 Estrutura do Texto

No Capítulo 2 é apresentada uma visão geral do sistema UMTS, com maior ênfase à sua camada física WCDMA. Nesse capítulo são apresentados alguns dos serviços oferecidos por redes UMTS, a arquitetura de uma rede que emprega esse sistema e detalhes sobre a interface

aérea. No Capítulo 3 são apresentadas as técnicas de simulação mais utilizadas para avaliação de desempenho. Nesse capítulo também é mostrado o sistema de simulação utilizado neste trabalho, com descrição dos parâmetros de avaliação de desempenho de redes UMTS, abordados pelo sistema de simulação adotado.

Os resultados das simulações descritas são mostrados e discutidos no Capítulo 4, em que são apresentados gráficos com indicadores de desempenho da rede simulada. As conclusões deste trabalho são apresentadas no Capítulo 5, em que são apresentadas também as possibilidades de trabalhos futuros. Por fim, no Apêndice A é apresentado o simulador estático de redes WCDMA, usado neste trabalho como parte do sistema de simulação de Monte Carlo, mostrado no Capítulo 3.

## CAPÍTULO 2

---

# Sistema de Telecomunicações Móveis Universal

---

Nesse capítulo é apresentada uma visão geral do Sistema de Telecomunicações Móveis Universal (UMTS). O objetivo do capítulo é apresentar ao leitor conceitos relacionados a esse sistema de comunicações celulares a fim de facilitar a compreensão dos problemas abordados nos capítulos posteriores.

Ao longo das seções desse capítulo são usadas muitas abreviações para referenciar elementos de rede, camadas e canais, bem como algoritmos de gerenciamento. Algumas dessas abreviações são usadas na língua inglesa para facilitar a concordância deste documento com as especificações do sistema UMTS.

### 2.1 Introdução

A idéia de usar células em comunicações móveis surgiu em 1947 no *Bell Laboratory* que em 1978 instalou experimentalmente, em Chicago no Estados Unidos, o sistema AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), explorado comercialmente apenas em 1983.

Os japoneses, em 1979, desenvolveram o sistema MCS (*Mobile Communication System*). Em 1980 os Países Nórdicos adotaram o sistema NMT (*Nordiska Mobil Telefongruppen*). O Reino Unido implantou o sistema TACS (*Total Access Communication System*) (ALENCAR, 2004).

Essa primeira geração (1G), comumente chamada de tecnologia analógica, tem a portadora modulada em frequência. Quando comparada com os padrões atuais essa geração apresenta bateria com menor duração, aparelhos com dimensões consideravelmente maiores, menos segurança na transmissão, limitada capacidade do sistema e baixa confiabilidade no *handover* (SIOMINA, 2007). Entretanto, apesar de suas limitações, a 1G teve bastante sucesso entre o público, e redes dessa geração são ainda operacionais em muitos países.

O sucesso dos sistemas 1G deixou claro que estava criado um mercado promissor e, dessa forma, que deveria ser expandido para oferecer o serviço de comunicação móvel a mais usuários. Essa necessidade de expansão deu espaço a outras tecnologias como modulação digital, *vocoders* digitais e codificação para controle de erro. E então surgiram as redes de segunda geração (2G) apresentando melhorias em relação à capacidade do sistema, à segurança, ao desempenho, e também à qualidade de voz.

As redes 1G que usam o Acesso Múltiplo por Divisão em Frequência (FDMA) para suportar múltiplos usuários simultaneamente, as redes 2G usam Acesso Múltiplo por Divisão no Tempo (TDMA) e por Divisão em Código (CDMA).

O Sistema Global para Comunicações Móveis (GSM) foi a primeira tecnologia móvel celular a utilizar modulação digital, e é a mais popular das tecnologias dessa geração, contando com mais de dois bilhões de assinantes no mundo, em 2007 (GSA, 2007). Outro bem conhecido representante 2G é o sistema *cdmaOne* (IS-95A), uma tecnologia baseada em CDMA que se espalhou da América do Norte à América do Sul e partes da Ásia.

Mas, o crescimento da demanda de serviços digitais para os usuários alavancou ainda mais esse mercado, que para atender tal demanda, culminou para a terceira geração (3G) de telefonia móvel celular, ou melhor, para a terceira geração dos sistemas de comunicações móveis celulares, já que não são sistemas de telefonia apenas. Entretanto, foi proposta a geração 2,5G para permitir que os fornecedores de serviços pudessem fazer uma transição suave entre os sistemas 2G e 3G de forma que pudessem entregar aos seus clientes alguns serviços com características 3G limitadas, antes que a geração 3G estivesse inteiramente disponível.

Os sistemas 2,5G usam interface de rádio digital melhorada e tecnologia baseada em pacotes de dados com novas técnicas de modulação para aumentar as taxas de transmissão, aumentar a eficiência do sistema e o desempenho total. Entre outras vantagens estão a compatibilidade com os sistemas 2G e a possibilidade de transição com baixo custo para 3G, que deve ser transparente aos usuários de 2G. O sistema GPRS (*General Packet Radio Service*) construído sobre o sistema GSM e o IS-95B construído sobre o IS-95A (comumente chamados de *cdmaOne*) representam as tecnologias 2.5G. O sistema EDGE é um padrão que apresenta características mais avançadas do que as apresentadas pela geração 2.5G, mas não atende todas as exigências de um sistema 3G, por exemplo, taxas de até 2 Mbit/s. Não obstante, o sistema EDGE é referenciado mais frequentemente como um sistema 3G do que como um sistema 2,5G (SIOMINA, 2007).

A terceira geração é baseada em uma iniciativa da ITU (*International Telecommunication Union*) para um único padrão internacional chamado *International Mobile Telecommunications – 2000* (IMT-2000). Esse conceito de um único padrão evoluiu para uma família de cinco padrões 3G aprovados em maio 2001. Os padrões de acesso de rádio 3G, junto com suas tecnologias subjacentes são indicados a seguir.

- IMT-DS (*Direct Spread*) [WCDMA];

- IMT-MC (*Multi-Carrier*) [CDMA2000, incluindo 1X, 1XEV, e 3X];
- IMT-TC (*Time-Code*) [UTRA TDD, TD-SCDMA];
- IMT-SC (*Single Carrier*) [UWC-136/EDGE];
- IMT-FT (*Frequency-Time*) [DECT].

Os sistemas IMT-DS e IMT-MC são os padrões CDMA 3G sucessores do GSM e cdmaOne, respectivamente. O IMT-TC é um padrão 3G baseado em uma combinação de TDMA e CDMA, IMT-SC é um padrão TDMA 3G, e IMT-FT é um padrão 3G que combina características de FDMA e TDMA. Desses cinco padrões, apenas os três primeiros prevêem o uso de macro, micro e pico-células para cobertura da rede, cumprindo todas as exigências 3G e, por isso, são considerados como soluções 3G de fato. O padrão EDGE, como mencionado, não pode ser considerado como uma solução 3G. O último padrão, IMT-FT, definido pelo ETSI e conhecido como DECT (*Digital Enhanced Cordless Telecommunications*) é usado para telefonia sem fio e pode também ser usado em *hot spots* 3G de faixa estreita (LESCUYER, 2002; KAARANEN *et al.*, 2005).

O sistema IMT-DS é também conhecido como *Universal Mobile Telecommunication System* (UMTS) e sua interface aérea é baseada em *Wideband Code Division Multiple Access* (WCDMA). A seguir é feita uma apresentação geral do sistema UMTS.

## 2.2 Serviços Oferecidos no Sistema UMTS

Por serem mais avançadas e de maior capacidade que as redes da geração anterior, as tecnologias 3G tornaram-se bastante atraentes para as empresas de comunicações móveis, devido ao aumento da demanda de tráfego, à possibilidade de oferecer novos serviços e mais funcionalidades, bem como maiores requisitos de qualidade estabelecidos pelos usuários e da crescente concorrência com outras tecnologias sem fios. No entanto, esse setor empresarial não cresceu muito rápido no início, devido aos elevados valores das licenças 3G e da crescente concorrência.

A primeira rede 3G (baseada em WCDMA) foi lançada em Outubro de 2001 no Japão pela NTT DoCoMo, mas não funcionou comercialmente até 2002, quando outras redes 3G também foram lançadas em outros países (HOLMA; TOSKALA, 2004). O número de assinantes WCDMA, em Julho de 2007, incluindo HSPA (*High Speed Packet Access*), era maior que 37 milhões no Japão e ultrapassava 115 milhões no mundo inteiro. O número de assinantes de todas as tecnologias CDMA 3G, em 2007, era superior a 461 milhões, incluindo CDMA2000, WCDMA e suas evoluções (GSA, 2007).

O sistema UMTS apresenta características de padrões 3G exigidas pela ITU e pelo IMT-2000. Dentre tais características, estão (HOLMA; TOSKALA, 2004):

- Altas taxas de transmissão, classificadas em três categorias:
  - 2 Mbit/s em cenários em que o equipamento do usuário se movimenta pouco, ou ambientes internos;
  - 384 kbit/s em cenários onde os usuários são pedestres ou ambientes urbanos;
  - 144 kbit/s em ambientes com muito movimento do usuário;
  - Taxas de dados variáveis em sistemas com cobertura de grande área geográfica (satélites);
- Grande capacidade (comparado a 2G);
- Suporte de transmissão de dados de forma simétrica ou assimétrica;
- *Roaming* global e compatibilidade com redes 2G (No caso do UMTS, compatibilidade com GSM/GPRS);
- Melhorias de segurança;
- Suporte a aplicações de dados;
- Melhorias na qualidade de voz, comparável à telefonia fixa;
- Suporte a múltiplos serviços simultaneamente.

### 2.2.1 Classes de Serviços UMTS

De forma a cobrir um conjunto cada vez maior de serviços, quatro classes de serviços são definidas de acordo com suas limitações (NAWROCKI *et al.*, 2006; LESCUYER, 2002). As principais restrições levadas em consideração na definição dessas classes de serviços são:

- atraso na transmissão da informação;
- variação no atraso da transmissão da informação;
- tolerância a erros de transmissão.

O atraso na transmissão da informação é particularmente importante em aplicações de tempo real, por exemplo, chamadas de voz e de vídeo. Nesse tipo de serviço um atraso de poucas centenas de milissegundos torna a transmissão insuportável para o usuário. Por outro lado, o atraso tem pouca importância em serviços como acesso à Internet, em que o usuário aceita um tempo de resposta da ordem de um segundo.

A variação no atraso da transmissão também é crítico em aplicações de tempo real em que é importante que o intervalo entre pacotes de informação na fonte seja recuperado no receptor. No caso de chamadas de voz, por exemplo, são alocados mecanismos para manter a taxa de transmissão constante e com isso reduzir a variação do atraso na transmissão.

A tolerância a erros de transmissão é um fator importante nas aplicações de transmissão de dados. Essas aplicações, como *download* de arquivos, requerem que a informação seja completamente transmitida pela rede. Esse não é o caso de chamadas de voz, em que é aceitável a perda de alguns pacotes devido à percepção humana ser tolerante à alguns erros nesse tipo de aplicação.

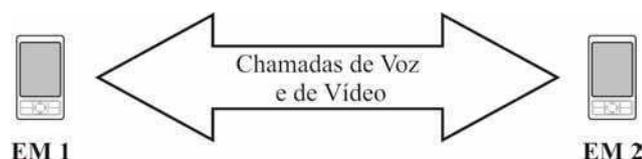
As quatro classes de serviços definidas no sistema UMTS podem ser divididas em dois grupos:

- classe A (serviços de conversação) e classe B (serviços de fluxo), para aplicações de tempo real;
- classe C (serviços interativos) e classe D (serviços em *background*), para aplicações com transmissão de dados sensíveis a erros.

Essas quatro classes de serviços são apresentadas em detalhes a seguir.

### Classe A: Serviços de Conversação

Essa classe inclui todos os serviços bidirecionais simétricos que envolvem dois usuários ou um grupo de usuários em conversação, como ilustrado na Figura 2.1. As restrições associadas a essa classe dependem essencialmente da percepção humana. Para as aplicações dessa classe, os atrasos de transmissão são limitados a valores de cem a duzentos milisegundos no máximo. Por outro lado, a tolerância da percepção humana a erros na transmissão de imagens ou sons torna a qualidade de serviço aceitável em uma transmissão que apresenta alguns erros. Os serviços representados pela classe A incluem chamadas de voz, chamadas de vídeo e jogos interativos.



**Figura 2.1** Classe A: serviços de conversação.

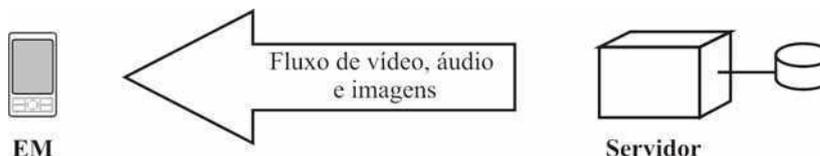
### Classe B: Serviços de Fluxo

Essa classe inclui todos os serviços que envolvem um usuário e um servidor de dados, como mostrado na Figura 2.2. A classe B tem praticamente as mesmas características da classe A, exceto pelas seguintes diferenças:

- as aplicações são assimétricas, a maior parte dos dados são transferidos da rede para a estação móvel;

- a tolerância a atrasos na transmissão é maior, dado que a interação entre o usuário e o servidor não exige um tempo de resposta tão rápido como em serviços da classe A.

Os serviços representados pela classe B são, entre outros, fluxos de vídeo sob demanda, rádio e transmissão de imagens.

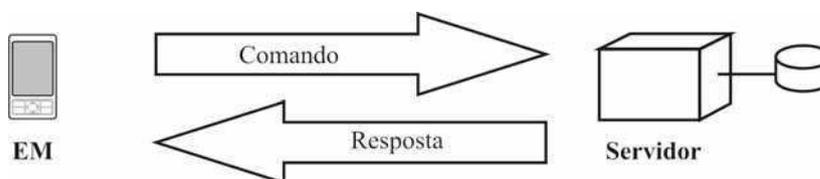


**Figura 2.2** Classe B: serviços de fluxo.

### Classe C: Serviços Interativos

Essa classe inclui todos os serviços para os quais um usuário mantém um diálogo interativo com um servidor de aplicação ou servidor de dados, como apresentado na Figura 2.3. Diferente das classes A e B, a classe C não requer tempo real, contanto que o tempo de resposta a uma requisição do usuário seja aceitável. Por outro lado, é essencial para esse tipo de aplicação que a informação transmitida não sofra qualquer alteração.

A classe C inclui, entre outros, os serviços de acesso à Internet, transferência de arquivos usando FTP, transferência de mensagens eletrônicas e todos os tipos de comércio eletrônico.



**Figura 2.3** Classe C: serviços interativos.

### Classe D: Transmissão em *Background*

Essa classe apresenta características semelhantes às da classe C. A diferença é que a informação transmitida tem prioridade menor que na classe C. A classe D é ilustrada na Figura 2.4.

Os serviços que são representados pela classe D são, entre outros, transmissão de fax, notificação de mensagens eletrônicas e transferência de mensagens curtas (*Short Message Service* – SMS).

Na Figura 2.5 é apresentado um resumo das características das quatro classes em relação às suas restrições de tempo real e tolerância a erros de transmissão.

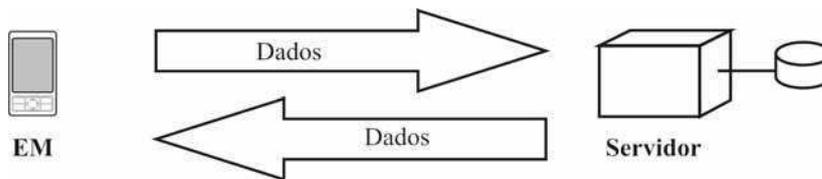


Figura 2.4 Classe D: transmissão em *background*.

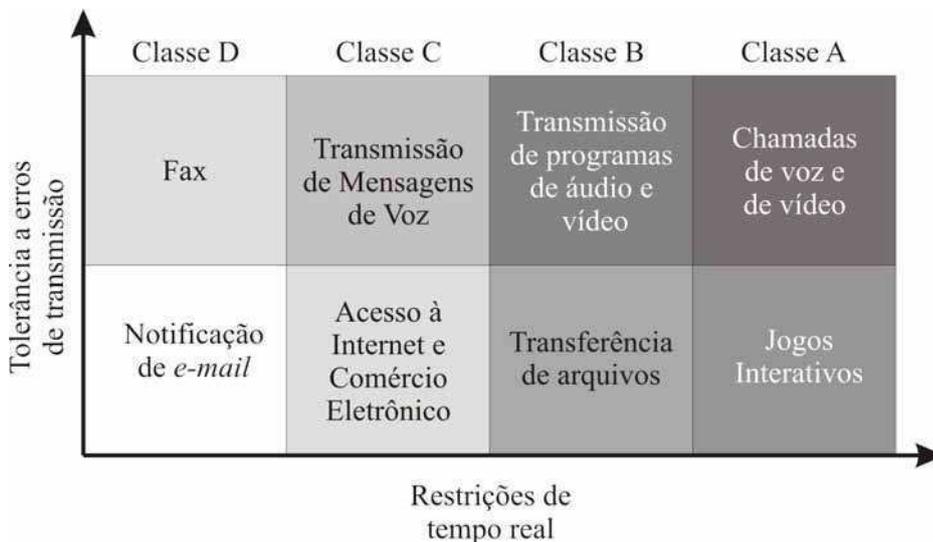


Figura 2.5 Classes de serviço no sistema UMTS.

### 2.3 Arquitetura de uma Rede UMTS

O sistema UMTS possui três partes funcionais, como pode ser visto na Figura 2.6. São o Equipamento do Usuário (UE), a Rede de Acesso (UTRAN – *UMTS Terrestrial Radio Access Network*), e a Rede Núcleo (CN).

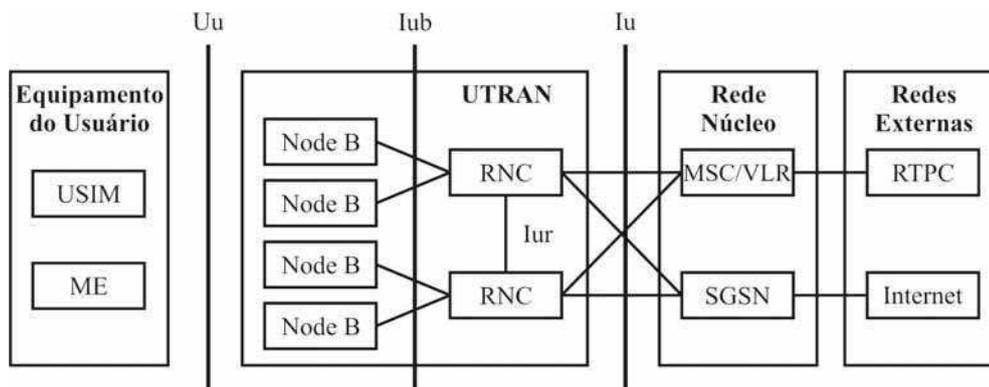


Figura 2.6 Arquitetura de uma rede UMTS.

O Equipamento do Usuário é composto pelo Equipamento Móvel (ME) e pelo USIM (*UMTS Subscriber Identity Module*). O USIM é um cartão que contém todas as informações relevantes do usuário.

A UTRAN, por sua vez, também é formada por dois elementos distintos: a estação radiobase (ou, como é chamada na recomendação, *Node B*) e pelo RNC (*Radio Network Controller*). O RNC gerencia e controla todos os recursos de rádio no seu domínio. É o RNC que realiza funções de RLC (*Radio Link Control*) e MAC (*Medium Access Control*). Várias estações radiobase estão ligadas a um único RNC que é o ponto de acesso a todos os serviços que a UTRAN provê à rede fixa. As estações radiobase, por sua vez, realizam os procedimentos da camada física (WALKE *et al.*, 2003; LESCUYER, 2002).

A Rede Núcleo é a parte que realiza o roteamento e a comutação das chamadas com conexões a redes externas como a RTPC (Rede de Telefonia Pública Comutada) ou à Internet. Ela contém o HLR (*Home Location Register*), o MSC (*Mobile Services Switching Centre*), o VLR (*Visitor Location Register*), o EIR (*Equipment Identity Register*), o GMSC (*Gateway MSC*), o SGSN (*Serving GPRS Support Node*) e o GGSN (*Gateway GPRS Support Node*).

Essa arquitetura é similar à arquitetura de uma rede GSM e essa similaridade se estende à rede núcleo do sistema. As diferenças entre elementos GSM e UMTS são funcionais, em particular com relação aos nós SGSN e MSC (LESCUYER, 2002).

### 2.3.1 Arquitetura em Alto Nível

#### Domínios de uma Rede UMTS

No padrão UMTS os elementos constituintes da rede são divididos em blocos funcionais chamados domínios, como pode ser visto na Figura 2.7. A arquitetura genérica engloba dois domínios principais: o Domínio do Equipamento do Usuário e o Domínio da Infraestrutura.

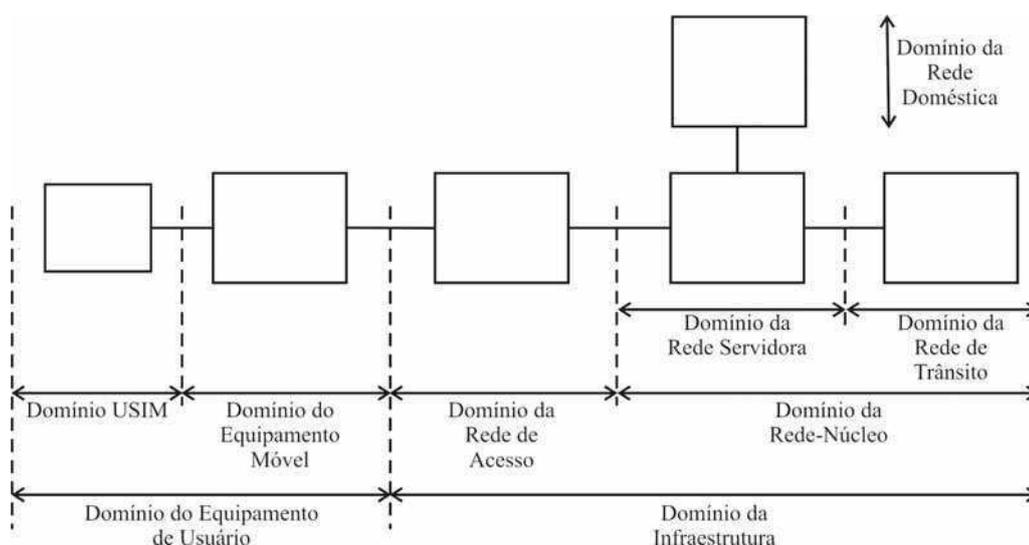


Figura 2.7 Domínios em UMTS.

As funções do equipamento terminal pertencem ao **Domínio do Equipamento Móvel**. Esses dois domínios combinados formam o **Domínio do Equipamento do Usuário (UE)**. O Domínio do Equipamento Móvel compreende todas as funções que um usuário necessita para

ter acesso à rede UMTS. Todos os nós e funções da rede de acesso via rádio (RAN) estão contidos no **Domínio da Rede de Acesso**. O **Domínio da Rede Núcleo** consiste das entidades físicas que dão suporte às facilidades da rede e para os serviços de telecomunicações. Funcionalidades tais como: gerência da informação sobre localização de usuários, controle das opções e serviços da rede, mecanismos de transferência (comutação e transmissão) para sinalização e para informação gerada pelos usuários, fazem parte desse suporte.

O Domínio da Rede Núcleo é sub-dividido em:

- **Domínio da Rede Servidora** : A parte do Domínio da Rede Núcleo à qual o Domínio da Rede de Acesso, que dá suporte para o acesso dos usuários, é conectado;
- **Domínio da Rede Doméstica** : Representa as funções da Rede Núcleo que são conduzidas em um local permanente independente da localização do ponto de acesso do usuário;
- **Domínio da Rede de Trânsito** : A parte da rede núcleo localizada no caminho da comunicação entre o Domínio da Rede Servidora e a entidade remota. Se, para uma dada chamada, a entidade remota estiver localizada dentro da mesma rede em que se encontra o UE, então nenhum recurso do domínio de trânsito será ativado.

### 2.3.2 Camadas e Suas Funcionalidades

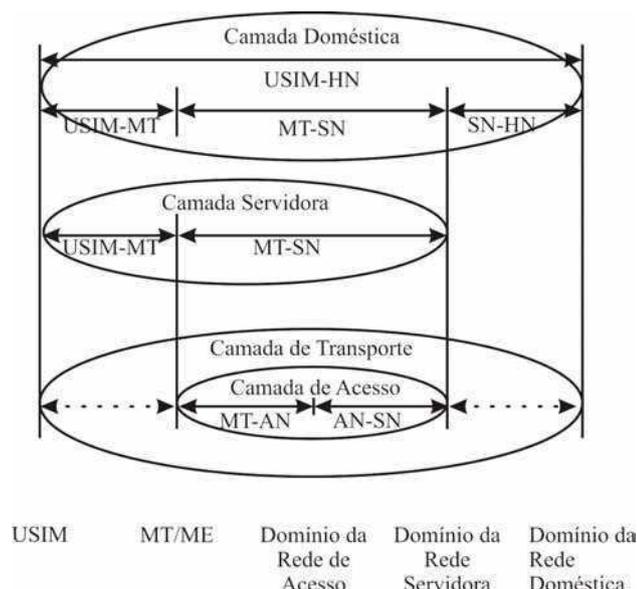
Na Figura 2.8 são mostradas as interações entre os domínios USIM, MT/ME (Terminação Móvel/Equipamento Móvel), da Rede de Acesso, da Rede Servidora, e da Rede Doméstica. Na Figura 2.9 são mostradas as interações entre os domínios TE, MT, da Rede de Acesso, da Rede Servidora, da Rede de Trânsito e a Entidade Remota (usuário ou máquina). A camada doméstica somente envolve domínios mostrados na Figura 2.8. A camada de aplicação somente envolve domínios apresentados na Figura 2.9. As camadas servidora e de transporte envolvem domínios nessas duas figuras.

Os fluxos diretos entre domínios não-contíguos, isto é, entre domínios não diretamente conectados são transportados de forma transparente por todos os domínios e interfaces localizadas no caminho da comunicação entre domínios finais. Por exemplo, os fluxos entre USIM e Rede Doméstica são transportados transparentemente por meio das interfaces USIM-MT, MT-Rede de Acesso, Rede de Acesso-Rede Servidora e Rede Servidora-Rede Servidora, e transmitidos sem interpretação pelo MT e pelos domínios da Rede de Acesso e Rede Servidora. As linhas pontilhadas indicam que os protocolos utilizados não são específicos para UMTS.

A seguir é feita uma descrição das camadas citadas e de suas funcionalidades.

#### Camada de Transporte

A Camada de Transporte é responsável pelo transporte de dados de usuários e de sinalização de controle proveniente de outras camadas da rede UMTS. Algumas das suas funções são:



**Figura 2.8** Fluxos entre domínios em UMTS.

- Correção de erros;
- Criptografia dos dados na interface de rádio;
- Adaptação (se necessária) dos dados ao formato físico suportado;
- Transcodificação (se necessária) dos dados com a finalidade de fazer uso eficiente, por exemplo, da interface de rádio.

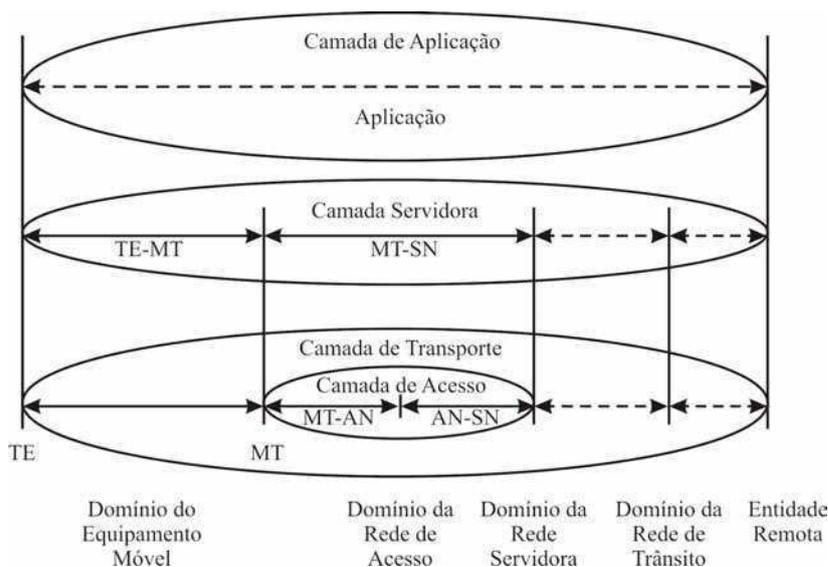
A Camada de Acesso, que é específica para UMTS, é a parte da camada de transporte localizada entre o nó periférico do domínio da rede-núcleo servidora e a MT (setas MT-Rede de Acesso e Rede de Acesso-Rede Servidora nas Figuras 2.8 e 2.9).

A norma 3GPP (3GPP, 2006a) descreve as características dos canais de transporte e dos canais físicos no modo FDD da UTRAN (Rede de Acesso Terrestre UMTS). Canais de transporte são serviços oferecidos por esta camada às camadas superiores. Os conceitos gerais sobre canais de transporte são descritos na norma 3GPP (3GPP, 2006b). Um canal de transporte define como e com que características dados são transferidos pela interface aérea. Canais de transporte são classificados em dois grupos:

- Canais dedicados, usando endereços específicos de UEs (equipamentos de usuários);
- Canais comuns, usando endereço explícito de UEs se necessário.

### Camada de Acesso

A Camada de Acesso especifica a maneira como os meios físicos entre UE e a infraestrutura são usados no transporte de informação. Fornece serviços relacionados à transmissão



**Figura 2.9** Fluxos entre domínios e entidade remota em UMTS.

de dados pela interface de rádio e à gerência da interface de rádio para outras partes da rede UMTS. Essa camada inclui os seguintes protocolos:

- Terminação Móvel – Rede de Acesso;
- Rede de Acesso – Rede Servidora. Esse protocolo dá suporte ao acesso pela rede servidora dos recursos disponibilizados pela rede de acesso.

### Camada Servidora

Essa camada consiste dos protocolos e funções para rotear e transmitir dados de usuários ou gerados pela própria rede, desde a fonte até o destino. Fonte e destino podem estar na mesma rede ou em redes diferentes. Essa camada inclui os seguintes protocolos:

- USIM – Terminação Móvel. Esse protocolo dá suporte ao acesso de informações específicas do usuário para funções no domínio do equipamento de usuário;
- Terminação Móvel – Rede Servidora. Esse protocolo dá suporte ao acesso pela MT dos serviços disponibilizados pela domínio da rede servidora;
- Equipamento Terminal – Terminação Móvel. Esse protocolo dá suporte à troca de informação de controle entre o TE e a MT.

### Camada Doméstica

Essa camada consiste dos protocolos e funções relacionados ao manuseio e a armazenagem de dados sobre assinaturas e possivelmente sobre serviços específicos da rede doméstica. Ela também inclui funções que permitem outros domínios atuarem no apoio à rede doméstica.

Funções relativas à gerência dos dados de assinantes, atendimento aos clientes, faturas e pagamentos, gerência de mobilidade e autenticação, são localizadas nessa camada. A camada doméstica inclui os seguintes protocolos:

- USIM - Rede Móvel. Esse protocolo dá suporte à coordenação de informações específicas do usuário entre o USIM e a rede doméstica;
- USIM - MT. Esse protocolo dá suporte ao acesso pela MT a dados específicos de usuários e a recursos necessários para realizar ações de apoio à rede doméstica;
- MT - Rede Servidora. Esse protocolo dá suporte à troca de informação específica de usuário entre a MT e a rede servidora.
- Rede Servidora - Rede Doméstica. Esse protocolo permite à rede servidora acesso à rede doméstica e aos recursos necessários para realizar ações de apoio à rede doméstica, incluindo por exemplo VHE<sup>1</sup> (ambiente doméstico virtual).

### Camada da Aplicação

Trata-se da aplicação disponibilizada para o usuário final. Inclui protocolos fim-a-fim e funções que utilizam os serviços fornecidos pelas camadas doméstica, servidora e de transporte. Inclui também a infraestrutura de apoio a serviços e/ou serviços de valor adicionado.

## 2.4 Interface Aérea Baseada em WCDMA

Para possibilitar a utilização de uma faixa do espectro por múltiplos usuários simultaneamente são usadas técnicas de acesso múltiplo ao meio de transmissão. As técnicas mais comuns para separar os sinais dos usuários são baseadas em divisões no tempo (Time Division Multiple Access – TDMA) e na frequência (Frequency Division Multiple Access – FDMA), em que os sinais dos usuários que compartilham o meio são ortogonais. É possível fazer a divisão em códigos (Code Division Multiple Access – CDMA), em que os sinais podem ser ortogonais ou não-ortogonais, dependendo do tipo de código usado. E pode ser feita no espaço (Space Division Multiple Access – SDMA), em que são usadas antenas direcionais para limitar o espaço em que o sinal se propaga.

A tecnologia de acesso múltiplo empregada no padrão UMTS é o Acesso Múltiplo por Divisão em Código de Faixa Larga – WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*), definida pelo ETSI em 1998. Essa técnica de acesso múltiplo usa espalhamento espectral de seqüência direta com divisão em códigos (DS-CDMA), que é descrito com mais detalhes em seções posteriores.

---

<sup>1</sup>*Virtual Home Environment*. Conjunto de serviços, opções e ferramentas que devem ter o mesmo comportamento esteja o usuário onde estiver.

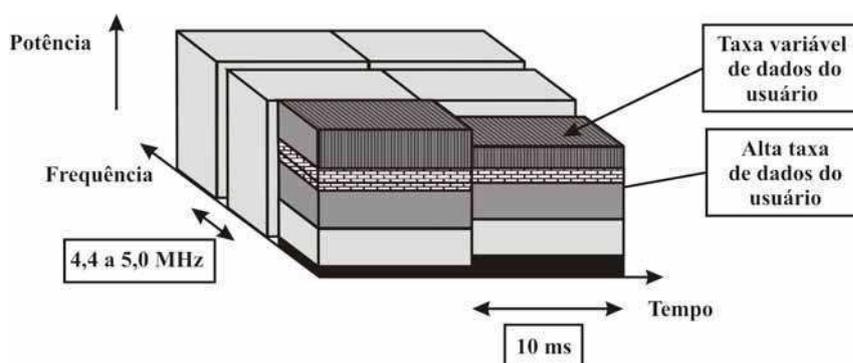
Nessa tecnologia, os *bits* de informação do usuário são espalhados em uma faixa larga pela sua multiplicação por uma sequência pseudo-aleatória (série de *chips*) derivada dos códigos de espalhamento CDMA. Para uma visão geral das técnicas de acesso múltiplo, podem ser consultados (ALENCAR, 2004), (GURJÃO, 1999) e (YACOB, 1993).

Apesar de idêntico ao tradicional CDMA no que diz respeito à forma de espalhamento espectral, em WCDMA são empregados diferentes canais de controle e sinalização, maior largura de faixa e um conjunto de melhorias para atender aos requisitos dos sistemas 3G (KAARANEN *et al.*, 2005).

Para suportar altas taxas de *bits* (até 2 Mbit/s), é usado um fator de espalhamento variável e conexões multicódigo.

Sistemas DS-CDMA com uma largura de faixa em torno de 1 MHz, tais como o IS-95, são comumente chamados de sistemas de faixa estreita. As portadoras no sistema WCDMA têm largura de faixa de 5 MHz, por essa razão esse sistema é dito de faixa larga. Dependendo da sua licença de operação, as operadoras podem ainda empregar múltiplas portadoras de 5 MHz para aumentar a capacidade de seus sistemas.

O sistema WCDMA suporta taxas de dados amplamente variáveis, usando o conceito de obtenção de largura de faixa sob demanda. A taxa de dados do usuário é mantida constante em quadros de duração de 10 ms cada. Entretanto, a capacidade de transmissão de dados entre usuários pode mudar de quadro para quadro. Essa característica pode ser vista na Figura 2.10. Essa rápida alocação da capacidade de rádio é tipicamente controlada pela rede de forma a obter uma vazão ótima para serviços de dados.



**Figura 2.10** Alocação de banda no WCDMA.

A operação das estações radiobase pode ser feita assincronamente, diferente do sistema IS-95. Dessa forma, não há necessidade de uma referência global de tempo, como GPS por exemplo.

A detecção no sistema WCDMA é coerente, tanto no enlace de subida quanto no de descida, baseada em símbolos piloto. A detecção coerente no enlace de descida é usada no IS-95, mas no enlace de subida essa forma de recepção é usada apenas nos sistemas CDMA mais recentes. Isso aumenta a cobertura e capacidade do sistema no enlace de subida.

A interface aérea WCDMA foi desenvolvida de forma que conceitos avançados de re-ceptores, como detecção multiusuário e antenas adaptativas, pudessem ser empregadas pelas operadoras como uma opção para o aumento da capacidade e/ou cobertura.

O sistema WCDMA foi desenvolvido para operar em conjunto com o GSM. Portanto, é possível efetuar handovers entre GSM e WCDMA.

Nas seções que seguem, são apresentados alguns dos princípios de operação de CDMA aplicados ao sistema WCDMA.

## 2.4.1 Características do Sistema WCDMA

### Espalhamento Espectral

O sistema WCDMA tem as características básicas de um sistema DS-CDMA (*Direct Sequence - CDMA*), como transmissão de um conjunto de mensagens digitais multiplicadas por diferentes sinais de altas taxas, que funcionam como códigos destinados a espalhar e posteriormente recuperar as mensagens transmitidas (HOLMA; TOSKALA, 2004). A idéia central em WCDMA é que os usuários possam compartilhar o mesmo meio de comunicação de faixa larga simultaneamente, usando sinais espalhados no espectro. Assim, cada usuário tem uma seqüência de códigos única que é usada para espalhar o sinal de informação no canal comum.

Em sistemas de espalhamento espectral de seqüência direta, o espalhamento do sinal é obtido pela sua multiplicação por outro sinal de espalhamento de faixa larga, chamado de código de espalhamento, de acordo com a Equação 2.1.

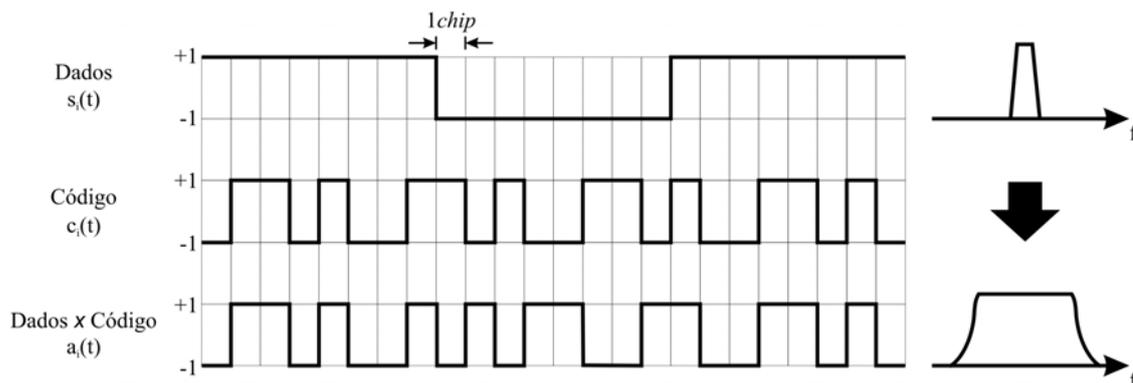
$$a_i(t) = c_i(t)s_i(t), \quad (2.1)$$

em que  $a_i(t)$  é o sinal espalhado,  $c_i(t)$  é o código de espalhamento, que é uma seqüência pseudo-aleatória e  $s_i(t)$  é o sinal de dados do usuário.

Considere, o exemplo da Figura 2.11, um sistema com uma seqüência de *bits* modulada usando BPSK (*Binary Phase Shift Keying*), com taxa  $R_D$ . Os *bits* de dados de usuário assumem os valores  $\pm 1$ . A operação de espalhamento nesse caso, é a multiplicação de cada *bit* de dados por uma seqüência de 8 *bits* de código. Os dados espalhados têm uma taxa de  $8 \times R_D$  e têm a mesma aparência aleatória (pseudo-aleatória) que os códigos de espalhamento. Nesse caso, diz-se que o fator de espalhamento é oito. Esse sinal de faixa larga pode então ser transmitido em um canal sem fio para o receptor.

O sinal espalhado espectralmente é transmitido por um canal em que existe superposição de vários sinais de faixa larga, provenientes dos outros usuários ativos no sistema, da interferência originada pela sobreposição de sistemas  $I(t)$  e do ruído  $n(t)$ , que formam o sinal recebido. Assumindo  $M$  usuários ativos no sistema, o sinal recebido  $r(t)$  é dado por

$$r(t) = \sum_{j=1}^M c_j(t)s_j(t) + I(t) + n(t) \quad (2.2)$$



**Figura 2.11** Processo de espalhamento espectral.

O parâmetro que define quantos *chips* (símbolos do código de espalhamento) são usados para representar um *bit* de dados de usuário é chamado de fator de espalhamento espectral ( $SF$ ). O fator de espalhamento é a razão entre a taxa de *chips*  $W_C$  e a taxa de dados do usuário  $R_D$ .

$$SF = \frac{W_C}{R_D}. \quad (2.3)$$

Outra forma de entender os efeitos do espalhamento espectral é usar a definição de ganho de processamento ( $PG$ ). O termo ganho de processamento é definido como a razão, em escala logarítmica, entre a largura de faixa ( $W_A$ ) do sinal faixa larga transmitido e a largura de faixa do sinal de dados ( $W_S$ ).

$$PG = 10 \log_{10} \frac{W_A}{W_S}, dB. \quad (2.4)$$

No sistema UMTS, a taxa de *chips* é mantida constante em 3,84 Mchip/s, então o ganho de processamento depende apenas da taxa de dados do usuário. Quanto maior a taxa de dados, menores são o ganho de processamento e o fator de espalhamento espectral.

O aumento da taxa de sinalização por um fator oito corresponde a um aumento do espectro ocupado (por um fator oito) pelo sinal de dados espalhados. Devido a essa característica, sistemas CDMA são geralmente chamados de sistemas de espectro espalhado.

Na operação inversa ao espalhamento, multiplica-se a o sinal recebido pela mesma sequência de código usada no processo de espalhamento, obtendo-se o sinal  $u(t)$  de acordo com a Equação 2.5.

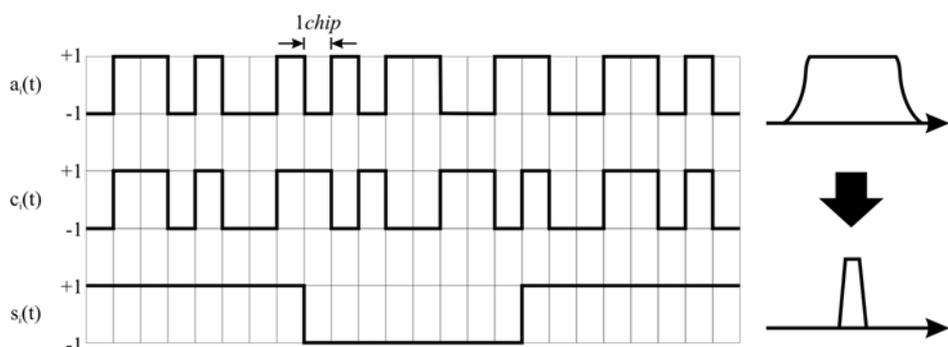
$$u(t) = c_i(t) \left( \sum_{j=1}^M c_j(t) s_j(t) + I(t) + n(t) \right). \quad (2.5)$$

Desenvolvendo a expressão anterior, tem-se

$$u(t) = c_i^2(t) s_i(t) + c_i(t) \left( \sum_{j=1, j \neq i}^M c_j(t) s_j(t) + I(t) + n(t) \right). \quad (2.6)$$

Se os códigos que representam o conjunto de funções de espalhamento forem escolhidos de forma que a correlação cruzada entre eles seja baixa, a primeira parte do sinal decodificado da Equação 2.6 representa o sinal de dados do usuário ponderado por um fator  $F = c_i^2(t)$ . Esse fator  $F$  representa a correlação cruzada entre os dois códigos, e no caso de os códigos no transmissor e no receptor serem iguais,  $F$  apresenta idealmente valor unitário. A segunda parcela do sinal  $u(t)$  representa o ruído devido ao canal e a interferência proveniente de outros sistemas e outros usuários na rede.

Assim, uma vez que o sincronismo seja perfeito, a sequência original de *bits* do usuário é recuperada perfeitamente. Esse processo é mostrado na Figura 2.12.



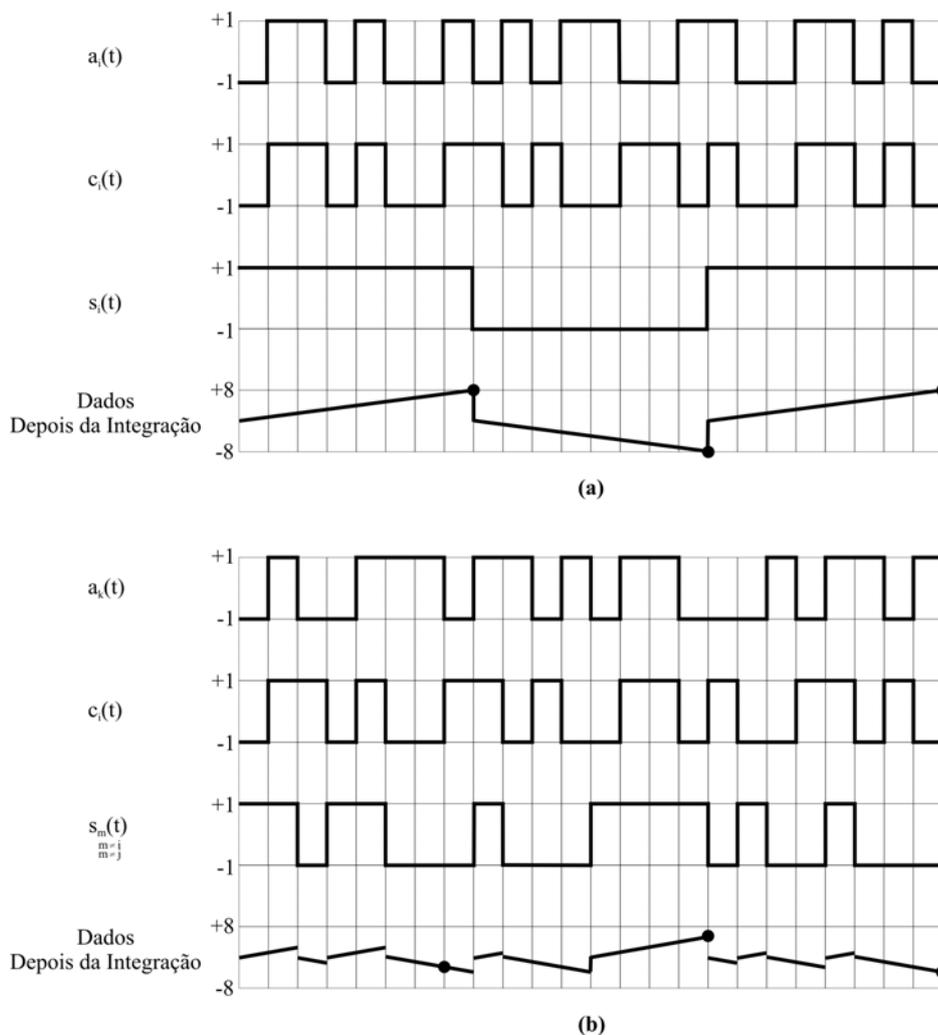
**Figura 2.12** Processo inverso ao espalhamento espectral.

A operação básica do receptor por correlação é mostrada na Figura 2.13. A operação inversa ao espalhamento é mostrada na Figura 2.13(a), com um código perfeitamente sincronizado (ortogonal). Nesse caso, o receptor por correlação integra (soma) os produtos resultantes (dados  $\times$  códigos) para cada *bit* do usuário.

Na Figura 2.13(b) é mostrado o efeito da operação inversa ao espalhamento quando aplicada ao sinal CDMA espalhado de outro usuário  $k$ ,  $a_k(t)$ , usando um código de espalhamento diferente daquele usado para espalhar o sinal, por exemplo o mesmo  $c_i(t) \neq c_k(t)$ . O sinal resultante é diferente do sinal de dados  $s_k(t)$  do usuário. O sinal resultante da integração é um sinal que varia pouco em torno de zero.

Como pode ser visto, a amplitude do sinal do usuário aumenta na média por um fator oito relativamente ao sinal do usuário interferente. O ganho de processamento é um aspecto fundamental de todos os sistemas CDMA e, em geral, de todos os sistemas de espalhamento espectral. O ganho de processamento proporciona aos sistemas CDMA a robustez necessária para operar, mesmo com interferência devida ao reuso das portadoras de 5 MHz disponíveis.

No enlace de descida, os sinais de diferentes canais físicos em uma célula, são transmitidos sincronamente pela estação radiobase. São aplicados códigos de espalhamento espectral ortogonais a canais físicos distintos, de forma que os sinais nesse enlace sejam mutuamente ortogonais. Se a ortogonalidade é mantida, o processo inverso ao espalhamento acontece como mostrado na Figura 2.12, em que os efeitos da interferência são removidos. Mas, em canais



**Figura 2.13** Princípio do receptor por correlação. (a) Sinal recuperado usando o código correto. (b) Sinal interferente recuperado usando o código do sinal anterior.

dispersivos, a ortogonalidade não é mantida e o sinal é recebido com interferência, o que resulta em diminuição do desempenho do sistema.

Considerando parâmetros típicos de WCDMA: o serviço de voz com taxa de 12,2 kbit/s, maior taxa de transmissão para esse serviço prevista pelas recomendações do sistema UMTS, tem um ganho de processamento de  $25 \text{ dB} = 10 \log_{10}(3,84 \cdot 10^6 / 12,2 \cdot 10^3)$  (HOLMA; TOSKALA, 2004; ETSI, 2006). Depois da operação inversa ao espalhamento é necessário que a potência do sinal seja maior que a potência da interferência mais o ruído. A relação entre a densidade de potência do sinal por bit e a densidade de potência da interferência mais ruído é chamada de relação sinal-ruído de bit ( $E_b/N_0$ ), em que  $E_b$  é a energia por bit e  $N_0$  é a densidade de potência da interferência mais ruído. A relação entre a densidade de potência do sinal espalhado espectralmente e a densidade de potência da interferência mais ruído é chamada de relação sinal-interferência de faixa larga (SIR).

Para o serviço de voz com taxa de transmissão de 12,2 kbit/s,  $E_b/N_0$  é tipicamente da ordem de 5,0 dB, e a relação sinal-interferência é portanto 5,0 dB menos o ganho de processa-

mento, que resulta em -20 dB. Em outras palavras, a potência do sinal pode estar 20 dB abaixo da interferência ou ruído térmico que o receptor WCDMA pode ainda detectar o sinal. A relação sinal-interferência de faixa larga é também chamada de relação portadora-interferência ( $C/I$ ). Devido ao espalhamento espectral e sua operação inversa, a  $C/I$  pode ser menor em WCDMA que, por exemplo, em GSM. Uma conexão com boa qualidade de voz em GSM requer uma relação portadora-interferência entre 9 e 12 dB (NAWROCKI *et al.*, 2006).

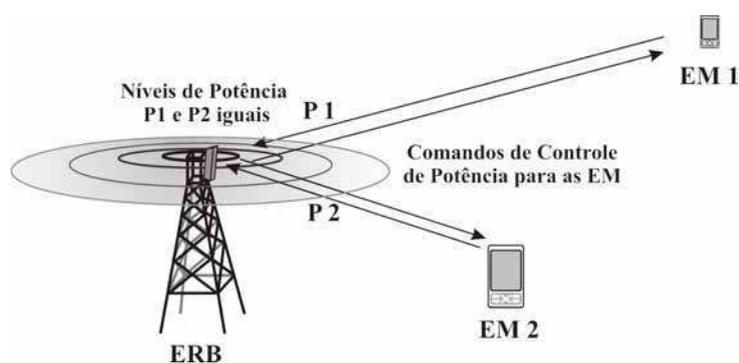
Em uma dada taxa de *chips* o ganho de processamento é diminuído com a taxa de transmissão de dados. Em particular, para taxas de dados do usuário de 2 Mbit/s, o ganho de processamento é menor que 2 ( $3,84 \text{ Mchip/s} / 2 \text{ Mbit/s} = 1,92$ , que corresponde a 2,8 dB). Nesse caso a robustez do sistema WCDMA à interferência é comprometida.

As estações radiobase e estações móveis WCDMA usam esse tipo de receptor (por correlação). Entretanto, devido à propagação em múltiplos percursos e à possibilidade de usar múltiplas antenas receptoras, é necessário usar múltiplos receptores por correlação, de forma a recuperar a energia recebida de todos os caminhos, e fazer uma combinação desses sinais. Tal coleção de receptores por correlação, chamados ramos, constitui o receptor Rake.

Os benefícios de WCDMA devidos às propriedades relacionadas à faixa larga dos sinais são melhor observados em todo o sistema do que apenas no enlace.

### Controle de Potência

O controle de potência rápido e rigoroso é talvez o principal aspecto de WCDMA, em particular no enlace de subida. Sem o controle de potência uma única estação móvel operando com potência total poderia causar o bloqueio de uma célula inteira. Na Figura 2.14, é ilustrado o problema e a solução na forma de controle de potência.



**Figura 2.14** Controle de potência.

As estações móveis EM 1 e EM 2 operam na mesma frequência, separáveis na estação radiobase apenas pelos seus respectivos códigos de espalhamento. Se, por exemplo, o sinal da estação EM 1 sofrer uma perda de percurso de 70 dB em relação à estação móvel EM 2 que está mais próxima da estação radiobase e se não há mecanismos que controlem a potência de EM 1 e EM 2 para que sejam iguais na estação radiobase, o sinal de EM 2 pode facilmente se sobrepôr ao sinal de EM 1. Esse mecanismo é conhecido como problema perto-distante do

CDMA. A estratégia para minimizar esse problema e maximizar a capacidade é equalizar a potência recebida por *bit* de todas as estações móveis todo o tempo.

Uma das soluções para o controle de potência em WCDMA é o controle rápido em laço fechado. Nesse mecanismo, a estação radiobase, no enlace de subida, faz estimativas frequentes da relação portadora-interferência ( $C/I$ ) e compara com a  $C/I$  alvo (*target C/I*). Se a  $C/I$  medida é maior que a  $C/I$  alvo, a estação radiobase envia um comando para a estação móvel diminuir sua potência. Se a  $C/I$  medida for mais baixa que a  $C/I$  alvo, é enviado um comando para a estação móvel aumentar sua potência.

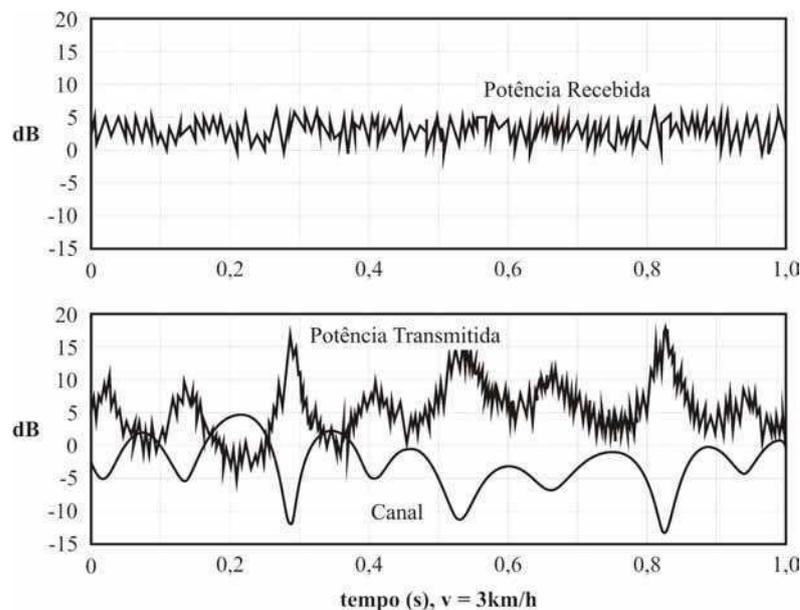
Esse ciclo, medida-comando-reação, é executado 1500 vezes por segundo (1,5 kHz) para cada estação móvel e, portanto, opera mais rápido que mudanças significativas nas perdas de percurso ou mais rápido que o desvanecimento rápido de Rayleigh desde baixas (aproximadamente 3 km/h) até moderadas velocidades do móvel (em torno de 50 km/h). Então, o controle de potência em ciclo fechado previne o desbalanceamento dos sinais recebidos pela estação radiobase.

Essa técnica também é usada no enlace de descida, mas o problema nessa situação é diferente: no enlace de descida não há o problema perto-distante devido aos sinais serem originados de apenas uma estação radiobase e enviados para várias estações móveis. No enlace de descida, o controle de potência é usado para aumentar a capacidade da célula devido ao fato de os usuários em uma célula compartilharem a capacidade de transmissão da estação radiobase. Se uma estação móvel está recebendo sinais com alta potência, resta menos potência para transmitir para as demais estações móveis na célula, reduzindo assim, a capacidade da célula no enlace de descida.

Na Figura 2.14 é mostrado o funcionamento do controle de potência em ciclo fechado no enlace de subida. O controle de potência envia comandos para a estação móvel usar uma potência de transmissão inversamente proporcional à potência recebida. A estação móvel transmite então com potência tal, que o desvanecimento no receptor da estação radiobase é muito baixo, como se o canal não apresentasse desvanecimento.

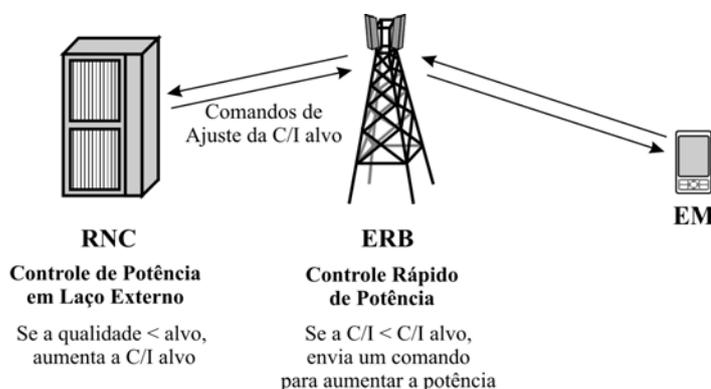
Enquanto essa remoção dos efeitos do desvanecimento é desejável do ponto de vista do receptor (no caso do enlace de subida: a estação radiobase), aumenta significativamente a potência transmitida no lado do transmissor (a estação móvel, no enlace de subida). Esse aumento de potência transmitida pelas estações móveis aumenta também a interferência em outras células. Na Figura 2.15 pode ser observado o mecanismo do aumento de potência que resulta na diminuição dos efeitos do desvanecimento.

Outra forma de controle de potência é o mecanismo de controle em laço externo. Nessa técnica a  $C/I$  alvo é ajustada na estação radiobase de acordo com a necessidade do enlace de rádio individual, de forma que a qualidade de serviço seja constante, usualmente definida como uma determinada taxa de erro de *bit* alvo ou taxa de erro de quadro alvo. O controle de potência em laço externo é realizado pelo RNC (*Radio Network Controller*). Quando o indicador de qualidade do quadro mostra uma diminuição dessa qualidade de transmissão, o RNC envia um



**Figura 2.15** Efeito do controle de potência.

comando para a estação radiobase para aumentar a  $C/I$  alvo em um determinado valor. A razão de o controle em laço externo ser realizada pelo RNC é que essa função deve ser exercida depois de uma operação de *soft handover*, por exemplo. Esse mecanismo de controle de potência é ilustrado na Figura 2.16.

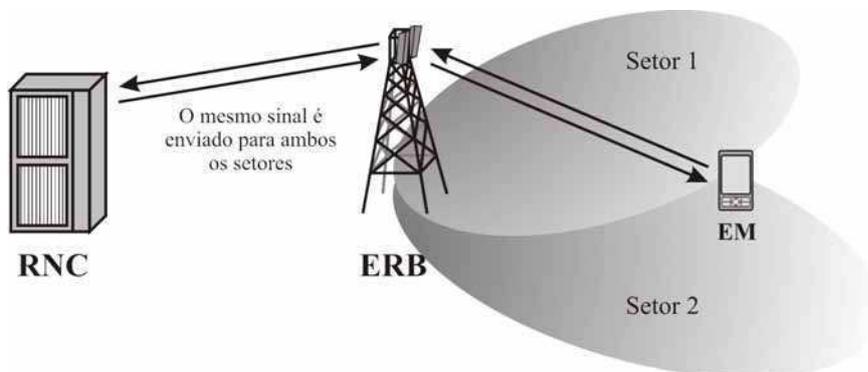


**Figura 2.16** Controle de potência em laço externo.

### A operação de *Handover*

Há duas formas principais de operação de *handover* em WCDMA: *softer* e *soft handover*. Durante o *softer handover*, a estação móvel está na região de transição das áreas de cobertura de dois setores adjacentes de uma estação radiobase. A comunicação entre a estação móvel e a estação radiobase deve ser feita concorrentemente por dois canais, um para cada setor. Essa operação requer o uso de dois códigos no enlace de descida para que a estação móvel consiga distinguir os dois sinais. Esses sinais são recebidos na estação móvel usando receptores Rake (explicados na Subseção 2.4.5), similarmente ao que acontece em uma recepção em

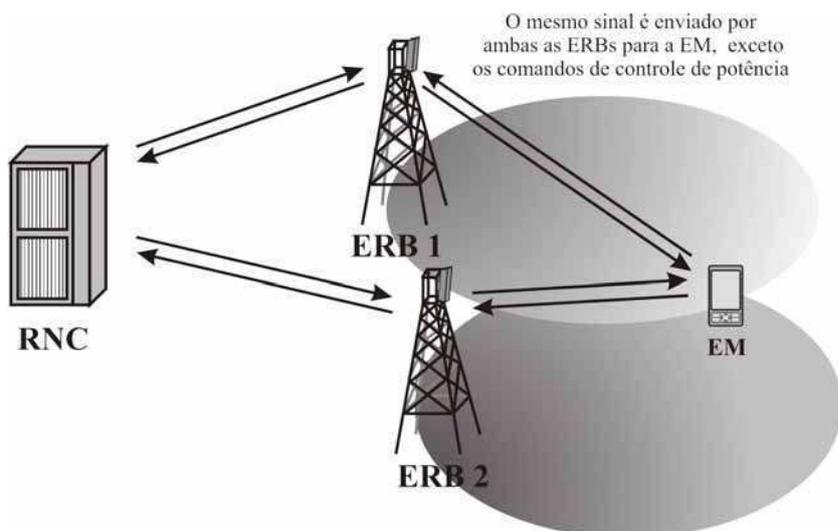
múltiplos percursos, exceto que os ramos precisam gerar os respectivos códigos de cada setor para uma apropriada operação de recuperação do sinal espalhado espectralmente. O cenário do *softer handover* é mostrado na Figura 2.17.



**Figura 2.17** Operação de *softer handover*.

No enlace de subida, um processo similar é realizado pela estação radiobase. Nesse caso, é recebido em cada setor o código da estação móvel, que é roteado para o mesmo receptor Rake para serem combinados. Durante o *softer handover* apenas um laço de controle de potência é realizado. Essa modalidade de handover ocorre em 5 a 10% das conexões.

Diferentemente do *softer handover*, durante o *soft handover*, uma estação móvel está na região de transição das áreas de cobertura de setores de estações radiobase diferentes. Da mesma forma que no caso anterior, a comunicação entre a estação móvel e estações radiobase é feita por dois canais na interface aérea, um para cada estação radiobase. Os sinais são também recebidos pela estação móvel usando um receptor Rake. Do ponto de vista da estação móvel, há poucas diferenças entre *softer* e *soft handover*. Na Figura 2.18 é ilustrado o cenário do *soft handover*.



**Figura 2.18** Operação de *soft handover*.

Entretanto, no enlace de subida o *soft handover* difere bastante do *softer handover*. O código da estação móvel é recebido por ambas as estações radiobase, mas os sinais recebidos são roteados para o RNC para combinação. Tipicamente o RNC usa o indicador de confiança do quadro, conforme previsto no controle de potência em laço externo, para selecionar o melhor quadro dentre os dois possíveis candidatos.

Durante o *soft handover*, dois laços de controle de potência por conexão são executados, um para cada estação radiobase. O *soft handover* ocorre em torno de 20 a 40% das conexões.

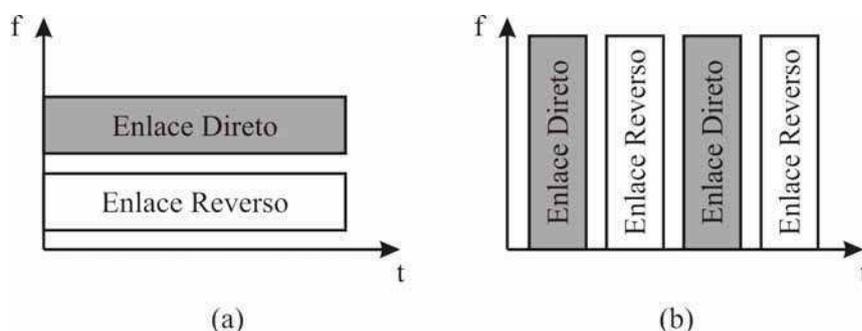
Essas formas de *handover* (*softer* e *soft*) são necessárias em WCDMA para evitar o problema perto-distante, que aconteceria quando uma estação móvel transitasse de uma célula para outra sem que essa última pudesse realizar o controle de potência.

Adicionalmente a *softer* e *soft handover*, WCDMA apresenta outros tipos de *handover*: *hard handover* entre frequências e *hard handover* entre sistemas. No primeiro tipo, uma estação móvel pode mudar de uma portadora WCDMA para outra, por exemplo. Uma aplicação desse tipo de *handover* é aumentar a capacidade das estações radiobase com várias portadoras.

No segundo tipo (*hard handover* entre sistemas), acontece o *handover* entre modos de operação do sistema WCDMA (FDD e TDD, por exemplo) ou entre WCDMA e GSM.

## Modos de Operação

Há dois modos de duplexação propostos para WCDMA: o FDD (*Frequency Division Duplex*) e o TDD (*Time Division Duplex*). No modo FDD, os enlaces de subida e de descida empregam duas faixas de frequências separadas. Um par de faixas de frequências com determinada separação é alocada para uma conexão (3GPP, 2007). Por sua vez, no modo TDD, as transmissões nos enlaces de subida e de descida são feitas na mesma banda, usando intervalos de tempo sincronizados. Com isso, as janelas de tempo de um canal físico são divididas em uma parte para transmissão e outra para recepção. Essas duas formas de operação são ilustradas na Figura 2.19



**Figura 2.19** Modos de duplexação (a)FDD e (b)TDD.

Como diferentes regiões do mundo possuem diferentes alocações de frequências, a capacidade de operar em quaisquer dos modos, FDD ou TDD, permite um uso eficiente do espectro disponível. Enquanto o modo FDD é destinado especialmente a grandes coberturas, aplica-

ções de banda larga e aplicações de rádio simétricas, como vídeo e telefonia móvel, o modo TDD providencia altas taxas de dados para aplicações assimétricas e de reduzida mobilidade, incluindo serviços baseados na Internet.

O WCDMA suporta taxas de transmissão altamente variáveis. A cada usuário são alocados quadros de 10 ms para transmissão e, em cada quadro, a taxa é mantida constante. No entanto, as taxas de transmissão dos usuários podem variar de quadro para quadro, com a alteração do seu fator de espalhamento. Cada quadro possui 15 janelas de tempo e os fatores de espalhamento do enlace de subida variam 4 a 256, enquanto que no enlace de descida vão de 4 a 512.

Em relação ao padrão cdmaOne, os sistemas WCDMA apresentam melhor desempenho em presença de multipercurso, podem realizar operação assíncrona das estações radiobase, trabalham com faixa larga, realizam controle de potência rápido, suportam serviços com diferentes qualidades (QoS).

O melhor desempenho em presença de multipercurso pode ser explicado da seguinte maneira: a duração de um *chip* a 3,84 Mchip/s é de 0,26  $\mu$ s. Se a diferença de tempo entre as componentes de multipercursos for de pelo menos 0,26  $\mu$ s, o receptor do WCDMA consegue separá-las e combiná-las coerentemente, obtendo assim diversidade de multipercurso. Essa diferença de tempo (0,26  $\mu$ s) pode ser obtida com uma diferença de percurso de pelo menos 78 m  $\left(\frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{3,84 \text{ Mchip/s}}\right)$ , se considerada a velocidade da luz  $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Com uma taxa de chip de 1 Mchip/s, encontrada nos sistemas IS-95 (CDMA de faixa estreita), a diferença de percurso tem que ser aproximadamente 300 m, que não pode ser obtida em células pequenas (CORRÊA, 2003).

No WCDMA a operação das estações radiobase é assíncrona. Com isso, ao contrário do sistema IS-95, não há necessidade de uma referência de tempo global, como um GPS (*Global Positioning System*). Sendo assim, a existência de microcélulas e células *indoor* são facilitadas, uma vez que não é necessário fazer a recepção do sinal GPS.

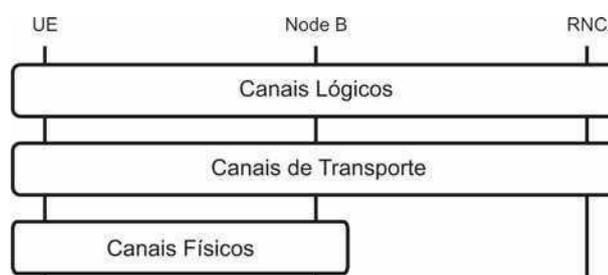
Um resumo dos principais parâmetros relacionados com a interface aérea WCDMA é mostrado na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1** Principais parâmetros WCDMA.

<b>Método de acesso múltiplo</b>	DS-WCDMA
<b>Modos de Operação</b>	FDD/TDD
<b>Sincronização da Estação Radiobase</b>	Operação Assíncrona
<b>Taxa de chips</b>	3,84 Mchip/s
<b>Duração de um Quadro</b>	10 ms
<b>Multiplexação dos Serviços</b>	Diversos serviços com diferentes QoS numa mesma conexão
<b>Múltiplas Taxas</b>	Fator de espalhamento variável
<b>Antenas Inteligentes</b>	Implementação opcional

## 2.4.2 Estrutura de Canais

O sistema WCDMA aloca uma largura de faixa para os usuários e o conjunto formado por essa faixa alocada e funções de controle é tratado usando o termo Canal. Conforme mostrado na Figura 2.20 os canais são organizados em três camadas: canais lógicos, canais de transporte e canais físicos. Os canais lógicos tratam dos tipos de informação que devem ser transmitidos, os canais de transporte descrevem como os dados são transmitidos nos canais lógicos e os canais físicos são o meio de transmissão pelo qual a informação é realmente transferida (HOLMA; TOSKALA, 2004; KAARANEN *et al.*, 2005).



**Figura 2.20** Estrutura de canais na rede de acesso.

Diferentemente do sistema GSM, os canais físicos formam a interface Uu entre o equipamento do usuário e a rede de acesso. Em GSM, os canais físicos e sua estrutura são reconhecidos pela BSC (*Base Station Controller*), mas, em WCDMA, eles realmente existem na interface Uu, e o RNC (*Radio Network Controller*) não necessariamente reconhece toda a sua estrutura (HAWWAR *et al.*, 2006; HOLMA; TOSKALA, 2004).

Em vez dos canais físicos, o RNC tem acesso aos canais de transporte que mapeiam diversos fluxos de informação na interface Uu e o responsável pelo mapeamento desses fluxos de informações nos canais físicos é o *Node B*. Canais lógicos não são canais de fato como os canais físicos, mas podem ser entendidos como funções da rede.

Há basicamente dois tipos de canais de transporte: o canal dedicado e os canais comuns. Como os nomes sugerem, o primeiro tipo é utilizado por um único usuário, e o segundo é compartilhado por todos ou por um grupo de usuários em uma célula. Há seis tipos de canais comuns: canal de *broadcast* (BCH, *Broadcast Channel*), o canal de acesso direto (FACH, *Forward Access Channel*), canal de busca (PCH, *Paging Channel*), canal de acesso aleatório (RACH, *Random Access Channel*), canal de pacotes comum no enlace de subida (UCPCH, *Uplink Common Packet Channel*) e canal compartilhado no enlace de descida (DSCH, *Downlink Shared Channel*).

Há ainda alguns canais físicos que não possuem nenhum canal de transporte correspondente, dentre os quais o canal piloto (CPICH, *Common Pilot Channel*). Existem dois tipos de piloto, o primário e o secundário (P-CPICH e S-CPICH). Entre suas funções está o auxílio ao terminal em estimar o canal.

O Canal Dedicado (DCH, *Dedicated Channel*) é o único canal de transporte alocado exclusivamente para um UE. O DCH transporta todas as informações provenientes das camadas mais altas destinadas a um usuário. Na camada física, o DCH é mapeado no DPCH (*Dedicated Physical Channel*), que é composto por dois outros canais, o canal físico dedicado de dados (DPDCH, *Dedicated Physical Data Channel*), para dados do usuário, e o canal físico dedicado de controle (DPCCH, *Dedicated Physical Control Channel*, para sinalização e outras informações da camada física, por exemplo, um piloto dedicado (HOLMA; TOSKALA, 2004).

### 2.4.3 Transmissão

#### Transmissão no Enlace de Subida

No enlace de subida, transmissões descontínuas podem causar interferência audível em equipamentos de áudio que estão nas proximidades do terminal. Nos períodos de silêncio, apenas informações para manutenção do enlace (como controle de potência, por exemplo) são transmitidas a 1,5 kHz. Se o DPDCH e o DPCCH fossem multiplexados no tempo, causaria interferência no meio da faixa de frequências de telefonia. Sendo assim, no WCDMA eles são multiplexados por códigos/I-Q (componentes fase e quadratura), conseguindo transmissão contínua, como mostrado na Figura 2.21.

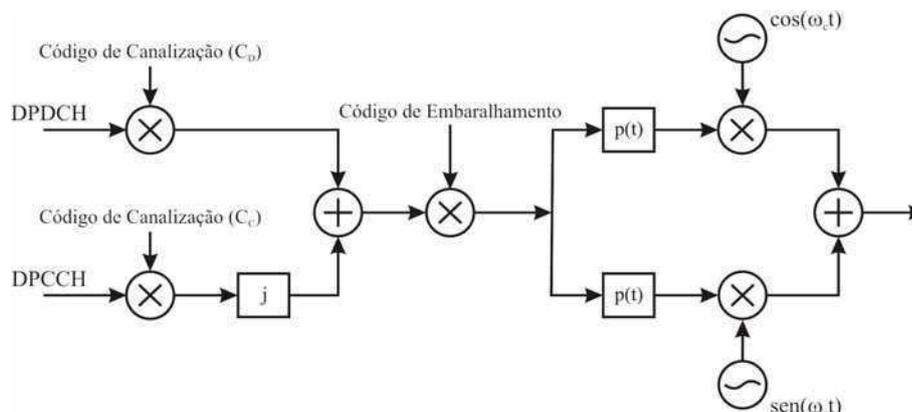


**Figura 2.21** Transmissão paralela dos DPDCH/DPCCH com a presença/ausência de dados.

Na Figura 2.21, nota-se que o único momento que há transmissão de pulsos é quando o DPDCH é desligado, mas isso não ocorre com uma alta frequência, evitando assim a interferência audível.

No enlace de subida, o esquema de modulação de sinais de dados nos dois canais dedicados é o BPSK (*Binary Phase Shift Keying*). O DPCCH modulado é mapeado no canal Q, enquanto o primeiro DPDCH é mapeado no canal I. Os DPDCHs adicionados na seqüência são mapeados alternativamente nos canais I ou Q. A modulação do espalhamento é aplicada depois da modulação de dados e antes da aplicação do formato do pulso. A modulação do espalhamento usada no enlace de subida é a QPSK canal-dual (*Quadrature Phase Shift Keying*). Tal modulação consiste em duas operações. A primeira é o espalhamento propriamente dito, em que cada símbolo de dados é espalhado em um número de *chips*, dado pelo fator de espalhamento. Isso aumenta a largura de banda do sinal. A segunda operação é o embaralhamento, em que um código de embaralhamento complexo é aplicado ao sinal já espalhado. Essa operação não altera a largura de banda do sinal (KAARANEN *et al.*, 2005).

O espalhamento e a modulação para um usuário do enlace de subida são ilustrados na Figura 2.22. Note-se que o usuário referente a esse exemplo tem apenas um DPDCH e um DPCCH.



**Figura 2.22** Modulação e espalhamento no enlace de subida.

Os símbolos de dados transmitidos nas componentes I e Q são multiplicados por códigos de canalização diferentes. Os códigos de canalização aplicados em WCDMA são conhecidos como Códigos de Fator de Espalhamento Variável Ortogonais (OVSF, *Orthogonal Variable Spreading Factor*). Os códigos OVSF preservam a ortogonalidade mútua de transmissão entre canais físicos diferentes, mesmo que usem fatores de espalhamento diferentes. O uso de códigos OVSF é um fator chave no alto grau de flexibilidade de serviços da interface aérea WCDMA. Mais detalhes sobre a geração dos códigos OVSF podem ser encontrados em (HOLMA; TOSKALA, 2004).

Ainda na Figura 2.22, percebe-se que o sinal resultante do espalhamento é multiplicado por um código de embaralhamento complexo. Esse processo é necessário para separar o terminal (no enlace de subida) ou as estações radiobase (no enlace de descida) uns dos outros. Como mencionado, o processo de embaralhamento é usado juntamente com o espalhamento, sem mudar a largura de banda do sinal, no entanto, faz com que sinais de fontes diferentes sejam separáveis entre si.

O código de embaralhamento do enlace de subida pode ser do tipo longo ou curto. Os códigos curtos são recomendados para estações radiobase que possuam receptores avançados, fazendo a detecção de múltiplos usuários ou cancelamento de interferência. No enlace de subida, não há necessidade de fazer um planejamento de códigos, uma vez que existem milhares de códigos das duas famílias.

Em seguida, o sinal é formatado por um pulso. Os filtros empregados são do tipo raiz quadrada do cosseno levantado com fator de queda de 0,22. Na seqüência, o sinal formatado pelo pulso é transladado para altas frequências.

A aplicação de um código de embaralhamento complexo com modulação de espalhamento como descrito é usualmente conhecida como HPSK (*Hybrid Phase Shift Keying*). HPSK

reduz o fator de pico (relação potência de pico/potência média) das estações móveis ao fazer a geração da seqüência de embaralhamento complexa.

Para maior eficiência do amplificador de potência, a transmissão do equipamento do usuário deve ter o menor fator de pico possível. Dessa maneira, o terminal pode operar com um requisito mínimo de redução do nível de potência de saída do amplificador de potência, em relação à sua potência de saturação (*back-off* do amplificador). As potências do DPDCH e do DPCCH são normalmente diferentes, principalmente quando a taxa de transmissão aumenta. Com isso, a transmissão paralela dos dois canais dedicados aumenta o fator de pico.

Os códigos de embaralhamento complexos são formados de maneira que as rotações entre *chips* consecutivos, dentro de um mesmo período de símbolo, sejam limitadas a  $\pm 90^\circ$ . A rotação completa de  $180^\circ$  pode acontecer apenas entre símbolos consecutivos. Dessa maneira, esse método reduz o fator de pico, que é o objetivo desejado.

O fator de espalhamento do canal de controle deve apresentar o maior valor possível, que para o enlace de subida é 256. Isso faz com que o canal de controle seja mais imune a ruído, uma vez que seu ganho de processamento é o mais alto possível.

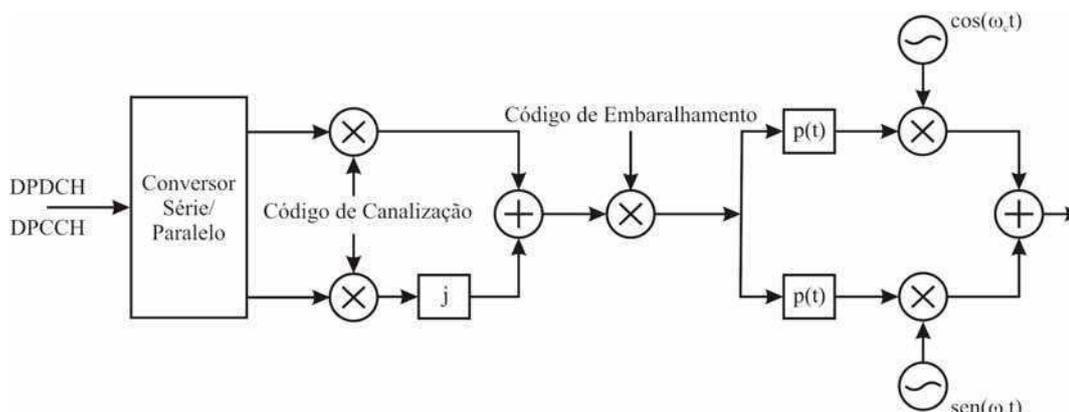
### Transmissão no Enlace de Descida

A técnica de modulação empregada nos sinais de dados no enlace de descida é a QPSK. Cada dois *bits* de entrada passam por um conversor série/paralelo e são mapeados nas componentes I e Q, respectivamente, ou seja, são multiplexados no tempo em vez de multiplexados por códigos como no enlace de subida. Os códigos de canalização são os mesmos códigos OVSF mencionados na seção anterior. O sinal espalhado é, em seguida, multiplicado pelo código de embaralhamento específico de uma célula.

A interferência audível na ausência de transmissão do DPDCH não é relevante no enlace de descida, uma vez que os canais comuns têm transmissão contínua. Além disso, o número de transmissões paralelas no enlace de descida é maior que no enlace de subida, sendo assim, otimizações para o fator de pico como ocorre nesse último não são necessárias. Além disso, reservar um código de canalização apenas para servir ao canal de controle (DPCCH) resultaria em mau aproveitamento dos códigos, principalmente quando se transmite vários sinais de uma única fonte. Como as componentes I e Q têm a mesma potência, a operação de embaralhamento provoca variações no envelope da portadora como no enlace de subida.

O espalhamento e a modulação para um usuário do enlace de descida são ilustrados na Figura 2.23. Este usuário tem apenas um DPDCH e um DPCCH. Canais de dados adicionais são modulados com a técnica QPSK e espalhados com diferentes códigos de canalização.

Assim como no enlace de subida, o sinal multiplicado pelo código de embaralhamento é formatado por um pulso. Os filtros empregados também são do tipo raiz quadrada do cosseno levantado com fator de queda de 0,22. Em seguida, o sinal formatado pelo pulso é transladado para altas frequências (KAARANEN *et al.*, 2005).



**Figura 2.23** Modulação e espalhamento no enlace de descida.

Deve-se notar que a multiplicação por  $j$  mostrada na Figura 2.23 é uma forma sintética de definir o processo de codificação por representação complexa. Na realidade, o código de embaralhamento é um código bidimensional, ou seja, constituído por duas seqüências binárias,  $c_I$  e  $c_Q$ , e o processo de codificação corresponde à multiplicação destas duas seqüências pelas duas seqüências de dados já espalhados,  $d_I$  e  $d_Q$ , de forma a obter duas novas seqüências,  $x_I$  e  $x_Q$ . Elas, que são as correspondentes em fase e quadratura do sinal modulado (antes da filtragem), são dadas por:

$$x_I = d_I c_I - d_Q c_Q = \text{Re} [(d_I + j d_Q) (c_I + j c_Q)], \quad (2.7)$$

$$x_Q = d_I c_Q - d_Q c_I = \text{Im} [(d_I + j d_Q) (c_I + j c_Q)]. \quad (2.8)$$

No enlace de descida, os códigos de embaralhamento são os códigos longos, isto é, os mesmos códigos usados no enlace de subida. Os códigos curtos não são usados. Nesse caso, o conjunto de códigos de embaralhamento é limitado a 512 códigos, uma vez que, se o número de códigos fosse muito grande, o procedimento de busca de célula ficaria comprometido.

Como mencionado, os códigos de canalização do enlace de descida são os mesmos códigos OVSF usados no enlace de subida. A árvore de códigos sob um único código de embaralhamento é compartilhada com vários usuários. Tipicamente, apenas uma árvore de códigos é utilizada em um setor de uma ERB. Os canais comuns e os dedicados compartilham a mesma árvore, sendo a única exceção o SCH, que não é multiplicado pelo código de embaralhamento.

No enlace de descida, o fator de espalhamento do canal dedicado não varia de quadro para quadro. A variação de taxa de dados é obtida pelo ajuste de taxas e pela descontinuidade da transmissão. No entanto, quando se tem transmissões de múltiplos códigos, cada código paralelo tem um código de canalização diferente e estão todos sob um mesmo código de embaralhamento, mas o fator de espalhamento de todos eles é o mesmo.

A exceção é o PDSCH, ou canal físico compartilhado no enlace de descida. Ele pode usar fatores de espalhamento variáveis de quadro para quadro. Dessa forma, os códigos de

canalização utilizados no espalhamento são escolhidos do mesmo ramo da árvore de códigos, para facilitar a implementação do terminal. Isto é, se em um quadro o usuário possui um fator de espalhamento igual a oito e no quadro seguinte deseja mudar para dezesseis, ele tem que utilizar o código de canalização do mesmo ramo que vinha utilizando, tendo assim duas opções de códigos com fator de espalhamento igual a dezesseis.

#### 2.4.4 Ambiente de Propagação

Para que um usuário se conecte a uma estação radiobase é necessário haver um meio por onde os sinais radioelétricos se propagam. Os sinais são atenuados no trajeto entre a estação radiobase e o equipamento do usuário em função das características do ambiente em que a onda eletromagnética se propaga. As características físicas do ambiente determinam os mecanismos de propagação da onda eletromagnética: se o terreno é plano ou ondulado, se os edifícios são mais altos ou mais baixos que a antena transmissora, se a vegetação é densa ou escassa, etc. Esses fatores levam à ocorrência de certos mecanismos de propagação em determinadas regiões do ambiente.

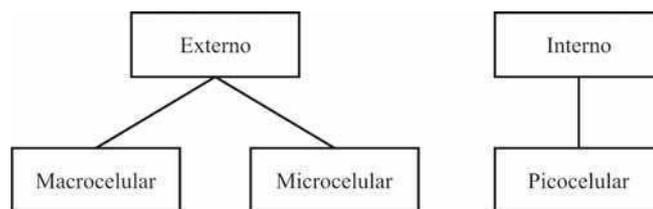
Os ambientes de propagação podem ser classificados em (PORTELA, 2006):

- Urbano;
- Suburbano;
- Rural;
- Dentro de edifícios (interno).

Um ambiente urbano modela grandes cidades com altos edifícios. O ambiente suburbano, por sua vez, representa uma área residencial com edifícios mais baixos que no ambiente urbano. Um ambiente com baixa densidade demográfica com utilização de grandes células é caracterizado pelo ambiente rural. E por último, o ambiente dentro de edifícios modela o ambiente no interior de edificações em que há muita reflexão, absorção e múltiplos percursos. Esses são os modelos mais utilizados para representar os ambientes de propagação, entretanto há diversos modelos mais específicos de ambientes que se deseja modelar, como rodovias, lagos e terrenos planos ou ondulados.

Outra forma de classificação dos ambientes de propagação é mostrada na Figura 2.24. Essa classificação é feita de acordo com a dimensão da área de alcance da célula que depende da altura da antena da estação radiobase em relação à altura média das construções no ambiente.

Um ambiente é chamado macrocelular se a altura média da antena da estação radiobase é maior que a altura média das construções na área. O ambiente externo macrocelular pode ser classificado como urbano, suburbano e rural dependendo da densidade e do tipo de



**Figura 2.24** Tipos de ambientes de propagação.

obstáculos na área. O ambiente externo microcelular é usualmente empregado em áreas urbanas densas com construções comerciais e alta densidade de usuários, em que as antenas são dispostas abaixo do nível de topo médio das construções.

Redes de comunicações móveis podem também cobrir ambientes internos isolados, tais como o interior de edifícios ou estações de metrô, com a instalação de estações radiobase dentro dos prédios para diminuir a perda devida à atenuação dos sinais quando se propagam através das paredes.

A perda de percurso é definida como a perda de potência entre transmissor e receptor em uma comunicação via rádio. Essa perda depende de fatores como altura das antenas transmissora e receptora, altura média dos edifícios, largura das ruas, potência de transmissão, densidade de árvores, ocorrência de visada direta, frequência, distância e outros.

### Mecanismos e Efeitos da Propagação

O canal de propagação via rádio não é de fácil modelagem devido à sua natureza aleatória e dependência da faixa de frequências utilizada, exigindo estudos teóricos e dados estatísticos para sua caracterização, que deve considerar os mecanismos de propagação responsáveis pelas variações aleatórias do nível de sinal. Os mecanismos de propagação predominantes na faixa de frequência usada para sistemas celulares são reflexão, difração e dispersão.

Um dos efeitos da propagação mais importantes é fenômeno referente à perda de energia do sinal em função de obstáculos e da mobilidade do usuário, chamado de desvanecimento.

Quando essa atenuação atinge todo o espectro do sinal causando uma queda na relação sinal-ruído, o desvanecimento é dito plano. Isto significa que a causa do desvanecimento está relacionada apenas à dissipação de energia. Neste caso, a faixa de frequência do sinal transmitido  $W_A$  é menor que a faixa de coerência do canal  $W_{CO}$  ( $W_A < W_{CO}$ ).

Quando um sinal sofre reflexões e difrações múltiplas até chegar ao receptor, resultando em um sinal recebido composto de inúmeras versões do sinal original transmitido, é dito que esse sinal se propagou em multipercurso. A propagação em multipercurso determina um atraso na recepção do sinal que por sua vez causa perda em determinada faixa de frequência. Esse tipo de perda é chamada desvanecimento seletivo em frequência (PORTELA, 2006; ALENCAR; ROCHA JR., 2005).

O desvanecimento pode ainda ser classificado em relação à variação aleatória da envoltória do sinal em função da distância, uma variação rápida e outra lenta, dando origem a dois tipos de desvanecimento (YACOUB, 1993):

- Desvanecimento rápido : Em que a envoltória do sinal varia rapidamente em relação a pequenos deslocamentos do móvel. Nesse tipo de desvanecimento, o tempo de coerência do canal  $T_c$  é menor que o período do símbolo transmitido  $T_0$  ( $T_c < T_0$ ). A envoltória do sinal é modelada pela distribuição de Rayleigh;
- Desvanecimento lento : Em que a variação aleatória da envoltória do sinal é lenta em relação à distância. Esse tipo de desvanecimento também é conhecido como sombreamento ou desvanecimento de longo prazo, causado por obstáculos no ambiente, como edifícios, por exemplo. A envoltória do sinal, expressa em dB, tem distribuição gaussiana, o que implica que a componente lenta do desvanecimento pode ser modelada pela distribuição log-normal.

#### 2.4.5 Recepção

Como visto, a transmissão no canal móvel terrestre é caracterizada por reflexões múltiplas, difrações e atenuação da energia do sinal.

Receptores otimizados para esse tipo de canal têm sido objetos de pesquisa ao longo das últimas décadas (SIMON; ALOUINI, 2000), (MEYR *et al.*, 1998), (WEHINGER *et al.*, 2003). As medidas normalmente adotadas contra desvanecimento em WCDMA são as seguintes:

- A energia dispersada pelos atrasos é combinada utilizando diversos receptores por correlação, chamados de ramos de Rake, centrados em valores de atrasos nos quais parcelas significativas da energia chegam ao ponto de recepção;
- Controle rápido de potência e recepção por diversidade (inerente a receptores Rake);
- Intensa codificação de canal, entrelaçamento da informação e protocolos de retransmissão;

A dinâmica do canal móvel sugere que a recepção do sinal CDMA obedeça aos seguintes passos:

1. Identificação dos valores de atrasos para os quais energias significativas chegam ao ponto de recepção e utilização de receptores por correlação. A granularidade para a aquisição do perfil de atrasos por multipercursos é da ordem da duração de um *chip* (tipicamente na faixa entre 1/4 e 1/2 dessa duração), com uma taxa de atualização da ordem de alguns décimos de milissegundos (FREUDENTHALER *et al.*, 2006);



zador de atrasos compensa, em cada ramo, as diferenças nos tempos de chegada. O combinador Rake então combina os símbolos compensados, obtendo assim a proteção contra o desvanecimento provocado pelos multipercursos. A capacidade de sistemas baseados em DS-SS e receptores Rake, como UMTS, é limitada principalmente pela interferência de acesso múltiplo (MAI) (FREUDENTHALER *et al.*, 2005). Normalmente, receptores Rake são implementados com Circuitos Integrados de Aplicação Específica (ASIC) para as funções na taxa de *chips* e acima desta velocidade, e por meio de Processadores Digitais de Sinais (DSP) para as funções na velocidade dos símbolos (AZIZ *et al.*, 2003),(HAWWAR *et al.*, 2006).

## CAPÍTULO 3

---

# Simulações

---

Simulações são tipicamente usadas na fase de planejamento de redes celulares para verificar a capacidade e a cobertura da rede projetada em diferentes cenários. Simulações devem também ser utilizadas em atividades de pesquisa, em que se buscam formas de melhorar os sistemas de comunicações móveis.

Simulações também permitem testar o sistema em diferentes configurações de ambiente (urbano, rural, com/sem sombreamento, etc). Mudando parâmetros ambientais, pode-se observar a forma como o sistema se comporta em um novo ambiente.

Simulações tornam a verificação de mudanças de variáveis em um sistema mais rápida e eficiente. As simulações também são uma boa opção para testar sistemas com características dinâmicas complexas em espaço e tempo (como os algoritmos de gerenciamento de recursos radioelétricos do UMTS), cuja análise, baseada em processos estocásticos, é difícil de executar com técnicas puramente analíticas (NAWROCKI *et al.*, 2006). Com simulações dinâmicas de sistemas UMTS, é possível simular diferentes perfis de mobilidade dos usuários (por exemplo, veículos e pedestres), diferentes distribuições de tráfego (distribuição de usuários ativos por unidade de área) e verificar o desempenho da rede com diferentes cenários de carga e de perfis de serviços usados (HURTADO, 2005).

Simulações de sistemas são realizadas usando programas simuladores de rede. Esses programas podem fazer parte de uma ferramenta de planejamento, em que diferentes elementos de uma rede são modelados para tornar a simulação tão realística quanto possível. Tais elementos são, por exemplo: modelos de propagação para diferentes ambientes, mapas digitais para modelagem precisa da área em questão e modelos de antenas para cálculos realísticos de cobertura. Simulações de redes 3G também incluem modelagem de interferência, dado que esse é um dos principais problemas em redes dessa geração.

Alguns dados, tais como localização das estações radiobase e distribuições de tráfego, servem de entrada para o programa de simulação. Parâmetros que descrevem a configuração da rede são ajustados para corresponder ao cenário simulado. Depois das simulações, os resultados

das análises são entregues na saída do simulador e, finalmente, os indicadores de desempenho da rede são mostrados na forma de dados numéricos ou gráficos.

Esses gráficos são apresentados em duas formas básicas: estatísticas por células ou distribuição espacial. Na primeira classe, são apresentados resultados obtidos por célula ou a média por célula obtida na rede sob simulação. Na segunda classe, os dados são apresentados para cada *pixel* do mapa da rede, por exemplo, a distribuição de tráfego em cada *pixel* do mapa. No Apêndice A são mostrados alguns exemplos de gráficos de saída do programa de simulação usado neste trabalho.

## 3.1 Tipos de Simulação

As simulações podem ser realizadas em diferentes níveis. Simulações em nível de sistema fornecem informações sobre o desempenho de todo o sistema por meio do fornecimento de algumas funções de gerenciamento de recursos radioelétricos (*Radio Resource Management – RRM*), tais como *handovers* e controle de potência. Simulações em nível de enlace são de baixo nível e fornecem apenas informações sobre características físicas de um único enlace radioelétrico, e trabalham com uma estação móvel conectada a uma ou algumas estações radiobase. Esse tipo de simulação é mais preciso para a análise de desempenho de um receptor, por exemplo. Mas para analisar uma rede com várias estações móveis e radiobase, as simulações em nível de enlace se tornam complexas e requerem maior esforço computacional.

As simulações em nível de sistema, trabalham com um grande número de estações móveis e estações radiobase. Para a análise de uma rede, esse tipo de simulação é mais eficiente que aquele descrito anteriormente. Simulações em nível de sistema, modelam detalhadamente a influência da interferência gerada por outras estações móveis em torno daquela sob observação.

Simulações em nível de enlace são usadas para obter parâmetros para simulações em nível de sistema.

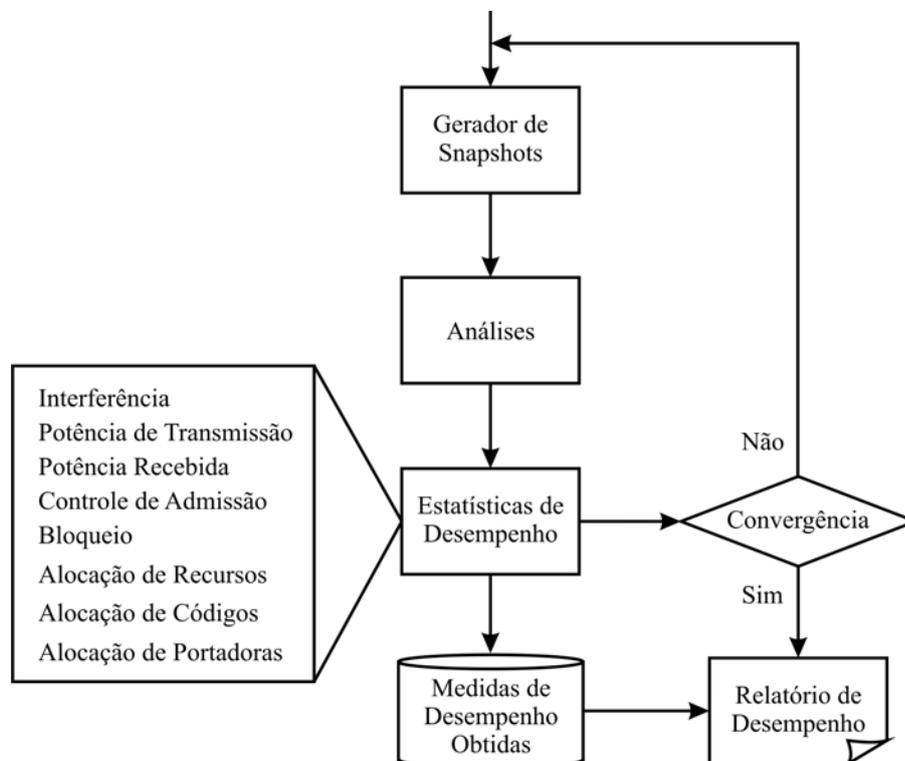
Adicionalmente à divisão em nível de enlace e nível de sistema, simulações podem ser divididas em duas categorias: simulações estáticas e simulações dinâmicas.

### 3.1.1 Simulações Estáticas

No caso de simulações estáticas, o desempenho da rede é analisado em várias instâncias de tempo, chamadas *snapshots*. A principal característica desse tipo de simulação é que a evolução do sistema simulado no tempo não é modelada, ou seja, não há correlação entre *snapshots* consecutivos (RIBEIRO, 2003). Dessa forma, não há como responder questões sobre o *status* do sistema em *snapshots* anteriores.

Simulações, em que se usa uma análise estatística de vários *snapshots* aleatórios são também conhecidas como simulações de *Monte Carlo*. Nesse tipo de simulação é usado um grande número de *snapshots* e o desempenho da rede é analisado considerando a média obtida

a partir dos dados de cada *snapshot* separadamente. O número de usuários ativos em uma rede em cada *snapshot* é uma variável aleatória de Poisson e varia entre *snapshots*. A localização das estações móveis também é aleatória (RIBEIRO, 2003; NAWROCKI *et al.*, 2006). Uma possibilidade de exploração do método de simulação de Monte Carlo é ilustrado na Figura 3.1.



**Figura 3.1** Avaliação de Desempenho Usando o Método de Simulação de Monte Carlo.

O número de *snapshots* e de estações móveis em simulações estáticas estão relacionados com a confiabilidade dos resultados. Isso é devido ao fato de que quanto mais usuários são considerados, mais *pixels* do mapa digital da área de cobertura da rede são considerados e portanto, mais localizações da área são consideradas pela simulação (NIEMELÄ, 2006). Entretanto, simulações estáticas não consideram, por exemplo, os efeitos de algumas funções do usuário, como o movimento na área da rede. Adicionalmente, as funcionalidades do RRM, como controle de acesso ou *packet scheduling* não são consideradas como funções do tempo nesse tipo de simulação. Em simulações estáticas não fica claro quando uma estação móvel se torna ativa na rede, nem quanto tempo permanece ativa (HURTADO, 2005).

Em simulações estáticas, o *handover* e informações de *status* da conexão podem ser observados em instantes de tempo descorrelacionados, mas a operação completa da rede não pode ser examinada como uma função do tempo, dado que tais operações têm características dinâmicas e, portanto, são correlacionadas em instantes diferentes.

Simulações estáticas são amplamente usadas em modelagem de redes 3G, devido ao poder computacional necessário para esse tipo de simulação ser menor que o necessário para

simulações dinâmicas. Portanto o tempo necessário para simulações estáticas é menor que para simulações dinâmicas em um mesmo equipamento computacional.

### 3.1.2 Simulações Dinâmicas

Simulações dinâmicas podem ser usadas, por exemplo, para obtenção de informações mais detalhadas sobre o desempenho de funções gerenciamento de recursos radioelétricos na rede. Nesse tipo de simulação, as estações móveis se deslocam nos sucessivos passos de tempo. Ações em passos de tempo sucessivos dependem dos resultados nos passos anteriores. A resolução do tempo de um simulador dinâmico 3G é usualmente definida por características da rede que mudam a situação de interferência mais frequentemente. Contudo, a resolução do tempo pode ser definida por alguma outra característica da rede, como período de *bit* ou período de *chip*. Em simulações dinâmicas, novas estações móveis podem ser acrescentadas à rede e as existentes podem terminar suas chamadas. Isso torna possível simular funções de RRM de forma mais detalhada.

Essas características fazem as simulações dinâmicas complexas, portanto os simuladores dinâmicos necessitam de grande poder computacional. Por isso os simuladores dinâmicos não são largamente utilizados na modelagem de sistemas 3G.

As simulações realizadas neste trabalho são do tipo estático. Por essa razão, são descritas com mais detalhes nas seções seguintes.

## 3.2 Metodologia de Simulação Estática

Em uma ferramenta de simulação estática, a análise do sistema sob simulação é dividida em duas partes: predição de cobertura e análise de desempenho. Nessa última, normalmente são usadas técnicas de *Monte Carlo*.

### 3.2.1 Predição de Cobertura

Uma das partes fundamentais das simulações é a predição de cobertura, que além de influenciar significativamente a confiabilidade dos resultados apresentados, influencia também a complexidade da simulação. Nos cálculos de cobertura, matrizes com dados de perda de percurso são criadas seguindo modelos de propagação, informações da rede, configuração dos sítios e mapas digitais da área em simulação. A predição em cada *pixel* do mapa digital é feita de acordo com o modelo escolhido. A escolha da resolução do mapa digital influencia a confiabilidade e a complexidade computacional do simulador. Portanto, a adoção da resolução do mapa deve obedecer a um critério que leve essas características em consideração.

A maioria das ferramentas de planejamento celular permite o uso de modelos de propagação determinísticos, físicos ou empíricos. Entretanto, o modelo usado na simulação (ou

planejamento) deve ser escolhido de acordo com a morfologia da área de instalação da rede (NIEMELÄ, 2006).

### 3.2.2 Análise de Desempenho

Na análise de desempenho, as informações de propagação encontradas no processo de predição de cobertura são utilizadas para realizar iterativamente os cálculos da potência de transmissão necessária nos enlaces de subida e de descida, baseados na relação portadora-interferência.

Nas análises da capacidade durante um processo de simulação de Monte Carlo, várias simulações (*snapshots*) são realizadas para contemplar o estabelecimento dos serviços da rede. No início de cada simulação a potência de transmissão das estações radiobase e móveis é tipicamente iniciada com os valores da potência do ruído térmico. Em seguida, as potências de transmissão em cada enlace, são ajustadas iterativamente de forma que os requisitos da relação portadora-interferência sejam satisfeitos tanto no enlace de subida, quanto no de descida.

Para um sinal em um sistema WCDMA ser decodificado com sucesso no receptor, a razão entre a potência recebida do sinal desejado e a potência recebida de todos os sinais interferentes, incluindo o ruído, deve satisfazer um limiar específico. Essa razão, como apresentado na Seção 2.4.1, é chamada de razão portadora-interferência ( $\gamma$ ), e o limiar é chamado de  $\gamma$  alvo. A transmissão ocorre se a  $\gamma$  medida for igual ou maior que a  $\gamma$  alvo. Formalmente, a seguinte desigualdade deve ser satisfeita

$$\frac{P_R}{\sum P_I + N} \geq \gamma \text{ alvo}, \quad (3.1)$$

em que,  $P_R$  é a potência do sinal desejado,  $\sum P_I$  é a potência dos sinais interferentes e  $N$  é a potência do ruído.

Como o sistema UMTS utiliza tecnologias sofisticadas de controle de potência, a desigualdade é normalmente assumida como igualdade. O espalhamento espectral permite que o lado direito da desigualdade seja menor que um, ou seja, o sinal desejado pode ser mais fraco do que a interferência.

A condição básica para um usuário se conectar à rede é a capacidade de receber sinais no canal piloto, ou seja, o critério de desigualdade da  $\gamma$  deve ser obedecido no canal piloto. Além disso, as desigualdades na  $\gamma$  são consideradas para os canais dedicados no enlace de subida e descida. Um usuário em um *snapshot* é servido pela rede se todos os critérios de desigualdade da  $\gamma$  são obedecidos (sinal piloto, enlace de descida e/ou subida). Simulações estáticas podem ser usadas para determinar se uma combinação de usuários pode ser servida pela rede e, em caso afirmativo, sob que condições. Dessa forma, um sistema de simulações estáticas é uma coleção de desigualdades da relação portadora-interferência como a que é mostrada na Desigualdade 3.1.

## Aspectos Relevantes em Nível de Enlace

Há dois aspectos que devem ser levados em consideração, com relação à simulação em nível de enlace. O primeiro diz respeito aos requisitos da razão portadora-interferência. O segundo é relativo à ortogonalidade.

### a) Requisitos da Razão Portadora-interferência

Em geral, a fim de decodificar com sucesso um sinal com maior taxa de transferência de dados, um maior requisito de  $\gamma$  alvo deve ser cumprido. Esses requisitos de relação portadora-interferência são determinados com simulações em nível de enlace. Essas simulações determinam a probabilidade de erro de bloco e a razão  $E_b/N_0$  para os diferentes radioenlaces. A decisão sobre que portadora e probabilidade de erro aplicar a um usuário, é feita com base no tipo de serviço utilizado. O tipo de serviço que um usuário solicita, normalmente é parte das informações em um *snapshot*. Para cada serviço, é assumida uma probabilidade de erro alvo que leve a um valor mínimo de  $E_b/N_0$ . Esse valor geralmente é interpolado a partir de uma tabela com valores para simulações em nível de enlace. A exigência de  $E_b/N_0$  também depende da velocidade do usuário, uma vez que a influência do efeito de multipercurso varia com a velocidade.

Os requisitos de  $E_b/N_0$  são convertidos em requisitos de  $\gamma$  utilizando o ganho de processamento específico do sistema em simulação.

### b) Ortogonalidade

Cada RNC tem um conjunto de códigos ortogonais para transmissão no enlace de descida. Teoricamente, as transmissões com códigos ortogonais não interferem umas nas outras. Mas, devido ao efeito de multipercurso, perdem essa propriedade. O fator de ortogonalidade  $\alpha$  tem valores, tipicamente, entre 0 e 1. Com  $\alpha = 1$ , a ortogonalidade é perfeita. Para  $\alpha = 0$ , não há ortogonalidade.

Os valores de  $\alpha$  são dependentes do ambiente de propagação. Em áreas rurais com poucos obstáculos, a ortogonalidade é melhor preservada. Em áreas urbanas, o impacto do multipercurso é mais severo.

## Propagação

Os sistemas de simulações estáticas usam modelos de propagação de acordo com a Seção 2.4.4. As principais grandezas calculadas nessa parte das simulações, são a atenuação sofrida pelos sinais quando se propagam, as variações do canal (desvanecimento), de acordo com a Seção 2.4.4.

A principal saída dos modelos de propagação usados nos sistemas de simulações estáticas, são os fatores de atenuação  $L_{kj}^{ES}$  e  $L_{jk}^{ED}$  para cada par  $j$  e  $k$ , respectivamente, estação móvel e estação radiobase. Esses fatores também incluem perdas e ganhos do cabeamento, dos equipamentos da estação radiobase e do equipamento do usuário. Esses fatores são distintos

nos enlaces de subida e de descida, porque a influência dos equipamentos é diferente nessas direções.

Os fatores de atenuação também incluem os efeitos aleatórios do sombreamento. Mas, em simulações que seguem o modelo de Monte Carlo, apenas o efeito global do sombreamento é levado em consideração (NAWROCKI *et al.*, 2006).

### Modelagem dos Equipamentos

Os equipamentos transmissores e receptores, influenciam o sistema sob a perspectiva das simulações estáticas de três formas: a potência de transmissão é limitada, o equipamento atenua ou amplifica o sinal que ele opera, o equipamento altera o ruído percebido pelo receptor.

#### a) Ruído

Todos os sinais recebidos de fontes que não fazem parte da rede UMTS, são tratados como ruído. O ruído térmico e qualquer outra fonte de ruído na faixa do espectro usada na rede são somados para compor o ruído de fundo  $N$ . Como o ruído de fundo depende da faixa de frequência em operação, ele deve ser considerado separadamente em um sistema WCDMA FDD. Neste trabalho, o ruído de fundo é chamado apenas de ruído. O ruído nos enlaces de subida e descida é denotado respectivamente por  $N^{ES}$  e  $N^{ED}$ .

#### b) Estação Móvel

As especificações do padrão UMTS definem quatro classes de potência dos equipamentos do usuário (3GPP, 2006c). Uma estação móvel tem limites de potência de transmissão máximo e mínimo. O valor máximo da potência de transmissão de uma estação móvel no enlace de subida, é um fator limitante da cobertura da rede. Os valores máximos da potência de transmissão estão entre 21 dBm (126 mW), para equipamentos de classe 4 e 33 dBm (2 W), para equipamentos de classe 1. Esses valores são ajustados no controle de potência, como mostrado na Seção 2.4.1.

A avaliação da cobertura depende das propriedades das estações móveis assumidas no início das simulações. A sensibilidade das estações móveis (menor potência que uma estação móvel detecta), é uma fator limitante da cobertura no enlace de descida. Valores típicos da sensibilidade das estações móveis são em torno de -120dBm (HOLMA; TOSKALA, 2004).

#### c) Estação Radiobase

Um parâmetro importante das estações radiobase, é a sua máxima potência de transmissão. Esse limite de potência é um fator determinante da capacidade da rede, no enlace de descida. Um valor típico da máxima potência de transmissão de uma estação radiobase, é 43 dBm (20 W) (HOLMA; TOSKALA, 2004).

O receptor de uma estação radiobase apresenta uma característica técnica que relaciona a relação sinal-ruído de entrada com a relação sinal-ruído de saída, chamada de figura

de ruído. Essa característica deve ser levada em consideração nos cálculos do ruído. A figura de ruído deve ser considerada também, para outros equipamentos entre a estação e a antena (por exemplo, amplificadores de potência).

### 3.2.3 Capacidade no Enlace de Subida

A relação portadora-interferência no enlace de subida ( $\gamma^{ES}$ ) é usada para medir a qualidade de uma conexão. Na prática, a  $\gamma^{ES}$  necessária para que o sistema apresente uma determinada taxa de erro de *bit* (*BER*) depende do tipo de serviço usado e das características do usuário, como ambiente de propagação e velocidade do usuário.

Nas simulações, a qualidade do sinal, recebido pela estação radiobase, do  $j$ -ésimo usuário deve satisfazer a seguinte condição

$$\gamma_j^{ES} = \frac{L_{jk}^{ES} P_{jk}^{ES}}{\sum_{i \neq j} L_{ik}^{ES} v_i^{ES} P_i^{ES} + N_k^{ES}}, \quad (3.2)$$

em que,  $P_{jk}^{ES}$  é a potência transmitida pelo  $j$ -ésimo usuário na célula  $k$ ,  $L_{jk}^{ES}$  é a perda de percurso no sinal do  $j$ -ésimo usuário na  $k$ -ésima célula. Os sinais interferentes de outras estações móveis  $i \neq j$ , com potência  $P_i^{ES}$ , são ponderados pelo fator de atividade de serviço  $v_i^{ES}$ .  $N_k^{ES}$  é a potência do ruído na estação radiobase no caso de célula vazia (NAWROCKI *et al.*, 2006).

Durante as simulações,  $\gamma_j^{ES}$  é obtida iterativamente pela mudança da potência de transmissão da estação móvel. Durante um processo de simulação de Monte Carlo, as potências de cada conexão são ajustadas com base nos parâmetros dependentes do serviço utilizado e do perfil do usuário. Como a interferência de outros usuários afeta a razão portadora-interferência, o processo iterativo deve ser realizado até que se obedeça o critério de convergência.

A capacidade de uma célula  $k$  no enlace de subida é definida pelo fator de carga baseado na interferência (LAIHO *et al.*, 2005a),  $\eta_k^{ES}$ , que é dado por

$$\eta_k^{ES} = \sum_{j=1}^{M_k} \frac{1}{1 + \frac{W_C}{\rho_j^{ES} R_j^{ES} v_j^{ES}}} (1 + I^{ES}), \quad (3.3)$$

em que,  $W_C$  é a taxa de *chips*,  $\rho_j^{ES}$ ,  $R_j^{ES}$  e  $v_j^{ES}$  são, respectivamente, a relação sinal ruído de *bit* ( $E_b/N_0$ ), a taxa de transmissão e o fator de atividade de serviço no enlace de subida. A variável  $I^{ES}$  é a razão entre a interferência causada por usuários de outras células ( $I_o^{ES}$ ) e a interferência causada pelos usuários da célula sob observação ( $I_p^{ES}$ ), nesse enlace. Dessa forma,  $I^{ES}$  é dada por

$$I^{ES} = \frac{I_o^{ES}}{I_p^{ES}}. \quad (3.4)$$

Logo, é possível notar que o fator de carga no enlace de subida não depende apenas do número de usuários ativos na célula,  $M_k$ , mas também do número de usuários ativos em outras

células, dado que depende da razão  $I^{ES}$ . Além disso, a carga na célula também depende dos níveis de ruído recebidos pela estação radiobase, incluídos na razão  $\rho_j^{ES}$ .

O fator de carga no enlace de subida é calculado a partir dos níveis de potência da interferência para cada célula em todo ciclo de iteração e é sempre menor que um. Se o carregamento de uma célula excede o valor limite pré-fixado, alguns usuários da célula são bloqueados para reduzir a carga no enlace de subida. Esse processo é repetido até que a carga da célula seja menor que o valor máximo de carga.

O fator de carga  $\eta_k^{ES}$  também é usado para definir outro parâmetro de planejamento de redes WCDMA, chamado Margem de Interferência ( $IM_k$ ) que considera as mudanças na cobertura da rede devidas ao mecanismo de redução do raio da célula por meio da diminuição da potência de transmissão das estações radiobase de forma que o nível de interferência no enlace de subida na célula seja minimizado (*cell breathing*) (HOLMA; TOSKALA, 2004).

$$IM_k = -10\log_{10}(1 - \eta_k^{ES}) \quad (3.5)$$

Na fase de planejamento da configuração da rede, o máximo ruído no enlace de subida é tipicamente considerado entre 1,5 e 6,0 dB (então  $\eta^{ES}$  deve estar entre 30 e 75%) (NIEMELÄ, 2006). Do ponto de vista do planejamento da topologia, o alvo é conseguir um isolamento entre as células tão bom quanto possível. A razão  $I^{ES}$  se reflete no isolamento do setor da estação radiobase (ou célula) considerado e nas medidas de interferência recebidas de estações móveis de outras células. Essa razão pode ser reduzida, por exemplo, otimizando o diagrama de radiação das antenas de forma a minimizar a interferência recebida de outras células. Entretanto, isto deve ser feito de maneira que a cobertura total das células seja mantida (*i.e.*  $P_j^{ES}$  calculada no planejamento deve ser ainda suficiente). Então, pela redução de  $I^{ES}$ , com a mesma margem de interferência alvo, o número de usuários suportados pode aumentar, o que significa aumento da capacidade do sistema no enlace de subida (LAIHO *et al.*, 2005a).

### 3.2.4 Capacidade no Enlace de Descida

A capacidade da célula no enlace de descida do sistema WCDMA funciona de forma diferente do enlace de subida. Isso é causado pelo fato de que as estações móveis compartilham a potência transmitida pelo setor da estação radiobase. Essas transmissões simultâneas são possíveis graças aos códigos ortogonais. Entretanto, a ortogonalidade dos códigos (representada pelo fator  $\bar{\alpha}_j$ ) é parcialmente destruída pela propagação em múltiplos percursos, que depende do ambiente de propagação e da velocidade da estação móvel. De forma a satisfazer os requisitos da razão portadora-interferência  $\gamma_j^{ED}$  da  $j$ -ésima estação móvel no enlace de descida, o seguinte critério deve ser obedecido

$$\gamma_j^{ED} = \frac{L_{jk}^{ED} P_{jk}^{ED}}{L_{jk}^{ED} \bar{\alpha}_j (\bar{P}_k^{ED} - v_j^{ED} P_{jk}^{ED}) + \sum_{i \neq k} L_{ij}^{ED} \bar{P}_i^{ED} + N_j^{ED}}, \quad (3.6)$$

em que,  $P_{jk}^{ED}$  é a potência do sinal transmitido pela estação radiobase  $k$  para a estação móvel  $j$ ,  $L_{jk}^{ED}$  é a perda de propagação sofrida pelo sinal recebido pela estação móvel,  $\bar{\alpha}_j$  é o fator de ortogonalidade dos sinais,  $\bar{P}_k^{ED}$  é a potência média de transmissão da estação radiobase  $k$ ,  $v_j^{ED}$  é o fator de atividade e  $N_j^{ED}$  é a potência do ruído recebido pela estação móvel  $j$  (NAWROCKI *et al.*, 2006).

A estimação da potência de transmissão correta requer um processo iterativo, dado que a razão  $\gamma_j^{ED}$  em cada estação móvel  $j$  depende da potência alocada às outras estações móveis.

O fator de carga no enlace de descida,  $\eta_k^{ED}$ , é definido com o auxílio da potência média transmitida pelos canais de tráfego da estação radiobase  $k$  (NAWROCKI *et al.*, 2006)

$$\eta_k^{ED} = [(1 - \bar{\alpha}) + I^{ED}] \sum_{j=1}^{M_k} \left( \frac{\rho_j^{ED} R_j^{ED} v_j^{ED}}{W_C} \right), \quad (3.7)$$

em que,  $W_C$  é a taxa de *chips*,  $\rho_j^{ED}$ ,  $R_j^{ED}$  e  $v_j^{ED}$  são, respectivamente, a razão entre a energia de *bit* e o ruído, a taxa de transmissão e o fator de atividade de serviço no enlace de descida.

### 3.3 Simulações Realizadas

Neste trabalho, o procedimento de simulação segue o método de Monte Carlo, apresentado na Seção 3.1.1. O programa de simulação utilizado nesse trabalho é o NPSW (*Network Planning Strategies for Wideband CDMA*) versão 5.0.0, desenvolvido por pesquisadores da Nokia (WACHER *et al.*, 2006). Foi usado na realização das simulações cujos resultados são apresentados no Capítulo 4. O NPSW é um simulador estático construído usando o Matlab<sup>®</sup>. O Apêndice A apresenta uma visão geral do funcionamento desse simulador.

As etapas desse processo de simulação são mostradas na Figura 3.2.

Antes do início do processo de simulação, são gerados os arquivos de parâmetros de entrada para o simulador. Os arquivos parâmetros das estações móveis contém dados como a posição das estações móveis no *snapshot*, a taxa de transmissão nos enlaces de subida e descida de cada estação móvel. Para as estações radiobase é usado apenas um arquivo de parâmetros de entrada, dado que a estrutura celular da rede não é variada neste trabalho. Esse arquivo contém as posições das estações radiobase, potência máxima de transmissão e várias outras informações sobre as estações radiobase. No Apêndice A, há uma descrição mais detalhada sobre os arquivos de parâmetros de entrada do simulador usado.

As estações móveis são posicionadas pseudo-aleatoriamente com distribuição uniforme na área da rede sob simulação, com exceção das regiões dos lagos, em que não foram posicionados usuários. A distribuição uniforme é adotada por simplicidade de geração de dados e para simplificar a análise dos resultados médios obtidos por célula.

Para execução do processo apresentado na Figura 3.2, são gerados cinquenta (50) arquivos de parâmetros das estações móveis, um para cada simulação. Esse número de simulações

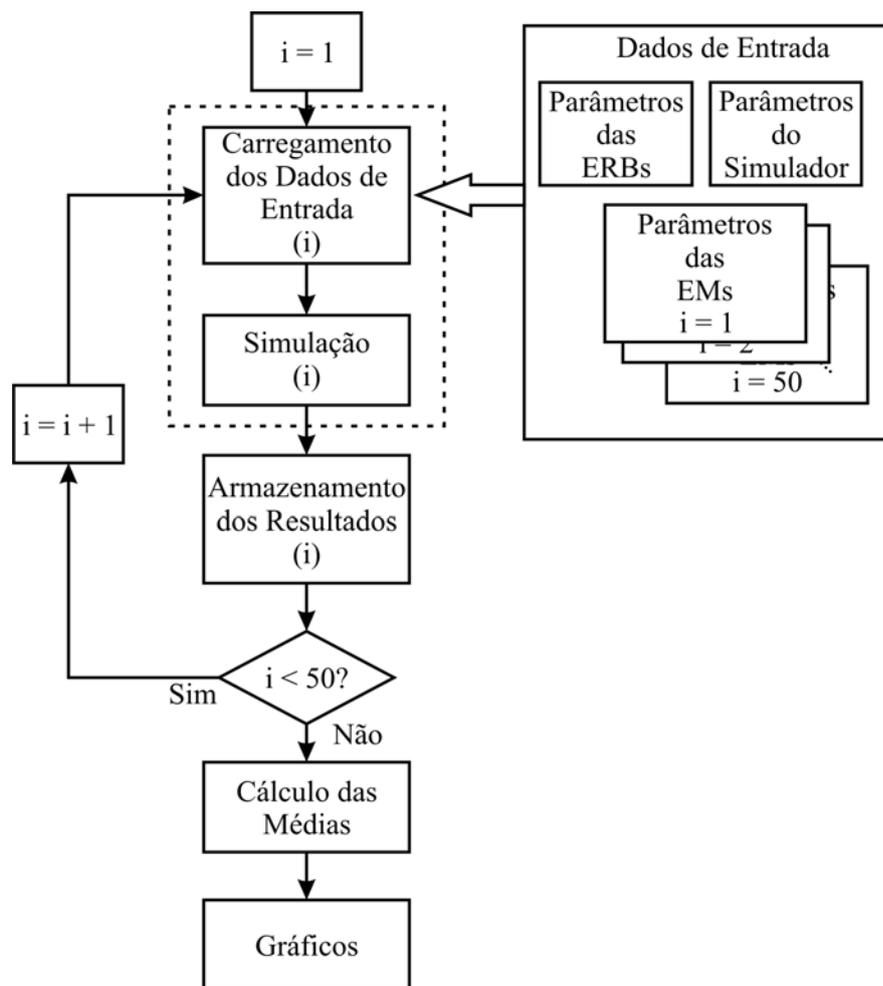


Figura 3.2 Processo de simulação realizado.

é estabelecido de acordo com a métrica de convergência adotada, que neste trabalho é o desvio padrão menor que dez por cento.

A partir desse ponto do texto, uma simulação é chamada de um *snapshot* e o conjunto das cinquenta simulações é chamado de processo de simulação. Em cada arquivo de parâmetros de entrada, a posição das estações móveis é modificada, seguindo a regra apresentada anteriormente.

Os dados de entrada, referentes às estações radiobase e móveis, são carregados cada vez que é iniciado um *snapshot*. Em seguida são lidos pelo simulador, que executa os cálculos das variáveis investigadas. Essa etapa do processo de simulação é destacada na Figura 3.2 pela região tracejada.

No fim de cada *snapshot*, são armazenadas as variáveis de interesse neste trabalho, por exemplo, a razão portadora-interferência. Depois da realização de cinquenta (50) *snapshots*, são calculadas as médias dessas variáveis. Essas médias são apresentadas em gráficos, mostrados no Capítulo 4.

Para execução do processo de simulação apresentado nessa seção, deve-se modificar a forma de trabalho do NPSW. Com essas mudanças, o simulador executa o processo de simulações estáticas seguindo o método de Monte Carlo.

### 3.3.1 Distribuição das Estações Móveis

Neste trabalho, são estudados os efeitos da variação da densidade de usuários no desempenho de uma rede UMTS/WCDMA. Dessa forma, é variada a quantidade de estações móveis distribuídas na área de cobertura da rede.

Além da influência da variação da quantidade de estações móveis, é também estudado o efeito da variação das taxas de transmissão de dados. As taxas de transmissão, para os enlaces de subida e descida, são parâmetros de entrada do simulador usado, e são definidas no arquivo de parâmetros das estações móveis. A taxa de transmissão é definida de acordo com o tipo de serviço utilizado pelos usuários. As classes de serviços consideradas neste trabalho<sup>1</sup> e suas respectivas taxas de transmissão, nos enlaces de subida e descida, são mostrados na Tabela 3.1 (NAWROCKI *et al.*, 2006).

**Tabela 3.1** Classes de serviços oferecidos pela rede em simulação.

Classe	Exemplos de Serviços	Taxa de Transmissão (kbit/s)	
		Enlace de Subida	Enlace de Descida
Classe 1	Chamadas de voz	12,2	12,2
Classe 2	Chamadas de vídeo	64,0	64,0
Classe 3	Rádio	12,2	64,0
Classe 4	TV móvel, Vídeo sob demanda	12,2	128,0
Classe 5	TV móvel, Vídeo sob demanda	12,2	256,0
Classe 6	TV móvel, Vídeo sob demanda	12,2	384,0
Classe 7	Internet	64,0	256,0

No processo de simulação, foram adotadas várias configurações de distribuição de usuários e classes de serviços usados por eles. Para simplicidade de análise, foram simuladas configurações em que o tráfego é composto por apenas uma classe de serviço para todos os usuários na rede e uma configuração com várias classes de serviços solicitados simultaneamente por diferentes usuários, como mostrado na Tabela 3.2. Essa última configuração representa uma situação mais realista do tráfego de uma rede de terceira geração. Nessa configuração, 86.79 % dos usuários requisitam o serviço de chamada de voz, 8,9% de usuários de serviços como chamadas de vídeo e SMS (TSILIMANTOS *et al.*, 2007) e o restante dos usuários compoem a parcela do tráfego, relativa aos outros tipos de serviços (CORDIER; ORTEGA, 2001). Para essas configurações, considerou-se apenas usuários pedestres com velocidade de 3 km/h.

<sup>1</sup>A divisão em classes de serviços apresentada nessa seção é baseada na divisão mostrada na Seção 2.2, mas é feita considerando, principalmente, as taxas de transmissão dos serviços.

**Tabela 3.2** Distribuição das classes de serviços.

Configurações	Percentual de Usuários (%)						
	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7
Config. 1	100	–	–	–	–	–	–
Config. 2	–	100	–	–	–	–	–
Config. 3	–	–	100	–	–	–	–
Config. 4	–	–	–	100	–	–	–
Config. 5	–	–	–	–	100	–	–
Config. 6	–	–	–	–	–	100	–
Config. 7	–	–	–	–	–	–	100
Config. 8	86,79	7,89	1,0	1,48	1,1	0,74	1,0

A fim de investigar o efeito, no desempenho do sistema UMTS, da velocidade com que os usuários se movem na área de cobertura, foram adotadas três velocidades: 3, 50 e 120 km/h. Essas velocidades foram escolhidas de acordo com o relatório técnico do ETSI (ETSI, 1998), para um ambiente com as características do cenário adotado neste trabalho, apresentadas na próxima seção. Essas velocidades foram aplicadas a distribuições de usuários com a configuração oito da Tabela 3.2.

### 3.3.2 Características da Rede Celular

As análises realizadas neste trabalho, são feitas com base em dados da cidade de Espoo, na Finlândia. A área analisada tem 152 km<sup>2</sup>. O ambiente de propagação dessa área é principalmente suburbano, com algumas áreas rurais (LAIHO *et al.*, 2005a). Esse cenário é usado por existirem dados disponíveis sobre os aspectos geográficos e parâmetros da rede, como a distribuição das estações radiobase (LAIHO *et al.*, 2005b). Além disso há análises na literatura referentes a esse cenário, que possibilitam comparações com os resultados obtidos neste trabalho (LAIHO *et al.*, 2005a; LAIHO, 2002). Na Figura 3.3 é mostrada uma fotografia aérea da área simulada.

O sistema que compõe esse cenário é formado por 19 macro-sítios com três setores cada. Alguns parâmetros referentes às estações radiobase são mostrados na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3** Parâmetros das estações radiobase.

<b>Pot. máx. transmissor</b>	43 dBm
<b>Pot. máx. transmissor por enlace</b>	30 dBm
<b>Pot. no canal piloto</b>	30 dBm
<b>Altura da antena</b>	20-25 m
<b>Diretividade/ganho das antenas</b>	65° / 17 dBi
<b>Carga máxima no enlace de subida</b>	75 %
<b>Perdas no cabeamento</b>	3 dB

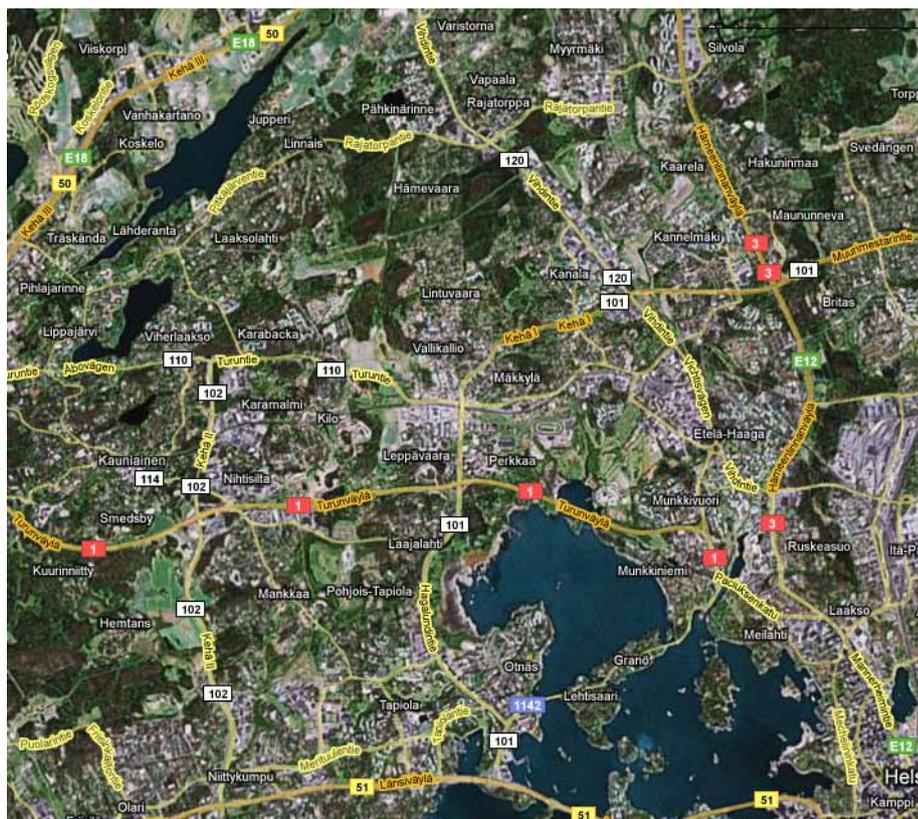


Figura 3.3 Espoo, Finlândia.

As perdas de percurso calculadas em cada *pixel* da área sob simulação, foram obtidas com outra ferramenta de simulação que usa o método de traçado de raios (LAIHO *et al.*, 2005b).

Mais detalhes sobre os dados de entrada do simulador usado neste trabalho, são apresentados no Apêndice A.

## CAPÍTULO 4

---

# Resultados

---

Neste capítulo são apresentados os resultados do processo de simulação mostrado na Seção 3.3. Nas seções seguintes são discutidos os resultados obtidos nas análises dos enlaces de subida e de descida, para as configurações mostradas na Tabela 3.2. Os resultados são apresentados em função da densidade de usuários na rede ( $n_U$ ), das taxas de transmissão dos serviços relacionados neste trabalho e das velocidades de locomoção dos usuários na área de cobertura da rede sob simulação.

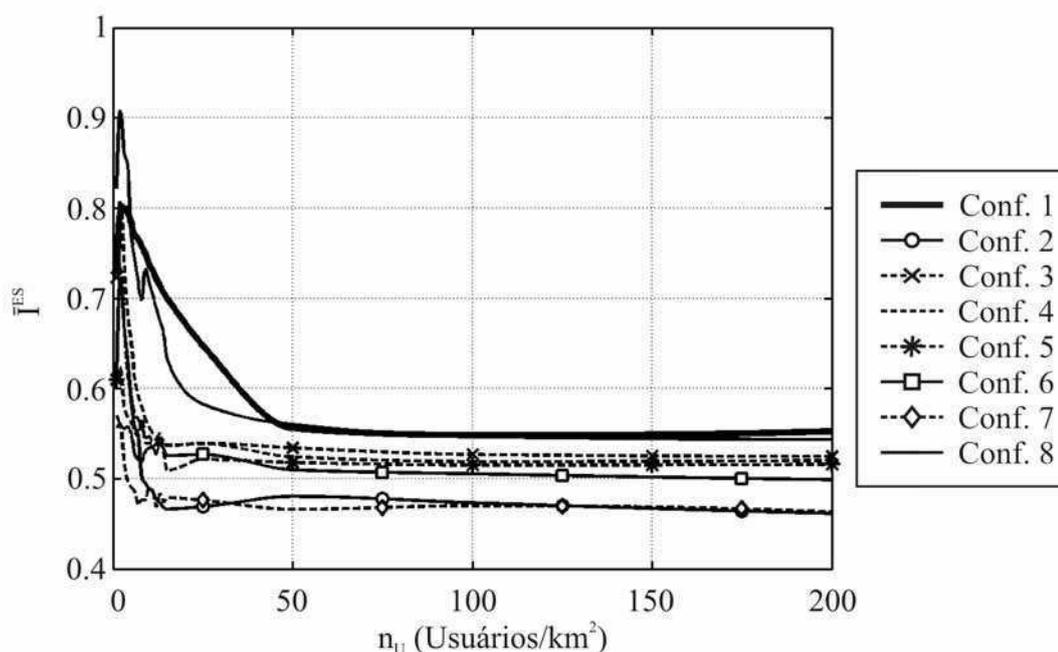
### 4.1 Desempenho no Enlace de Subida

#### 4.1.1 Análise da Interferência

A média da razão entre a interferência causada por usuários de outras células e a interferência causada pelos usuários da célula sob observação ( $\bar{I}^{ES}$ ), é mostrada na Figura 4.1. Nessa figura é possível notar que à medida que a densidade de usuários aumenta, a razão  $\bar{I}^{ES}$  diminui até estabilizar. Essa diminuição pode ser atribuída ao aumento da interferência proveniente de usuários da célula sob observação ser mais significativo do que o aumento da interferência recebida de outras células, para crescentes densidades de usuários. Percebe-se também que os valores de  $\bar{I}^{ES}$  são menores, para as configurações 2 e 7, para as quais os serviços têm taxa de transmissão, no enlace de subida, de 64 kbit/s, ou seja, a maior taxa de transmissão, no enlace de subida, considerada neste trabalho.

Pode ser feita também, uma relação entre  $\bar{I}^{ES}$  e as taxas de transmissão no enlace de descida. Observa-se que para as configurações com serviços de mesma taxa de transmissão no enlace de subida,  $\bar{I}^{ES}$  é maior para menores taxas de transmissão no enlace de descida.

Esse comportamento pode ser explicado pela diferença na quantidade de usuários ativos na rede para as configurações de distribuição de usuários usadas. No caso das configurações com serviços que apresentam maiores taxas de transmissão no enlace de descida, o número de usuários ativos nas células ( $N_{S_C}$ ) é significativamente menor que o número de usuários ativos



**Figura 4.1** Razão média  $\bar{I}^{ES}$  no enlace de subida.

para taxas menores nessa direção, como mostrado na Figura 4.8. Essa diferença faz com que a interferência gerada por usuários da célula sob observação, cresça mais rapidamente que a interferência proveniente de outras células, para os serviços com maiores taxas de transmissão.

Para melhor visualização dos gráficos, para pequenas densidades de usuários, na Figura 4.2 são apresentados apenas os pontos iniciais das curvas de  $\bar{I}^{ES}$ .

Com velocidades diferentes, a razão média  $\bar{I}^{ES}$  é mostrada na Figura 4.3. Pode-se observar nessa figura que, quanto maior a velocidade dos usuários, menor é a razão entre a interferência de usuários de outras células e a interferência de usuários na própria célula. Novamente, o maior número de usuários atendidos simultaneamente, como mostrado na Seção 4.2.2, torna a interferência de usuários dentro da célula sob observação mais significativa que a interferência de outras células.

## 4.1.2 Capacidade da Rede

No enlace de subida, um dos indicadores de desempenho, no tocante à capacidade da rede, é o fator de carga. Na Figura 4.4 é mostrado o fator de carga médio no enlace de subida  $\bar{\eta}^{ES}$ . Pode-se observar a influência no fator de carga, da quantidade de usuários atendidos simultaneamente pelas células. Quanto maior o número de conexões simultâneas, maior o fator de carga, como pode ser observado para as configurações um, dois e oito.

De acordo com os gráficos mostrados na Figura 4.5, o fator de carga no enlace de subida também é afetado pela velocidade dos usuários. É possível observar que, para maiores velocidades, o fator de carga é também maior.

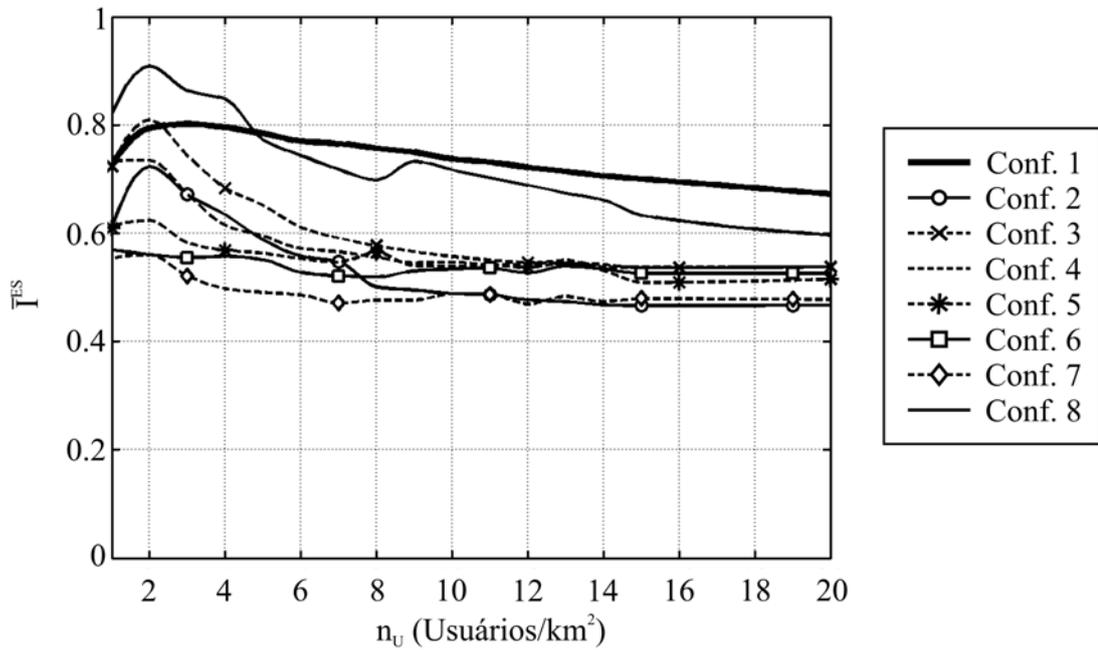


Figura 4.2 Razão média  $\bar{I}^{ES}$  no enlace de subida (ampliação).

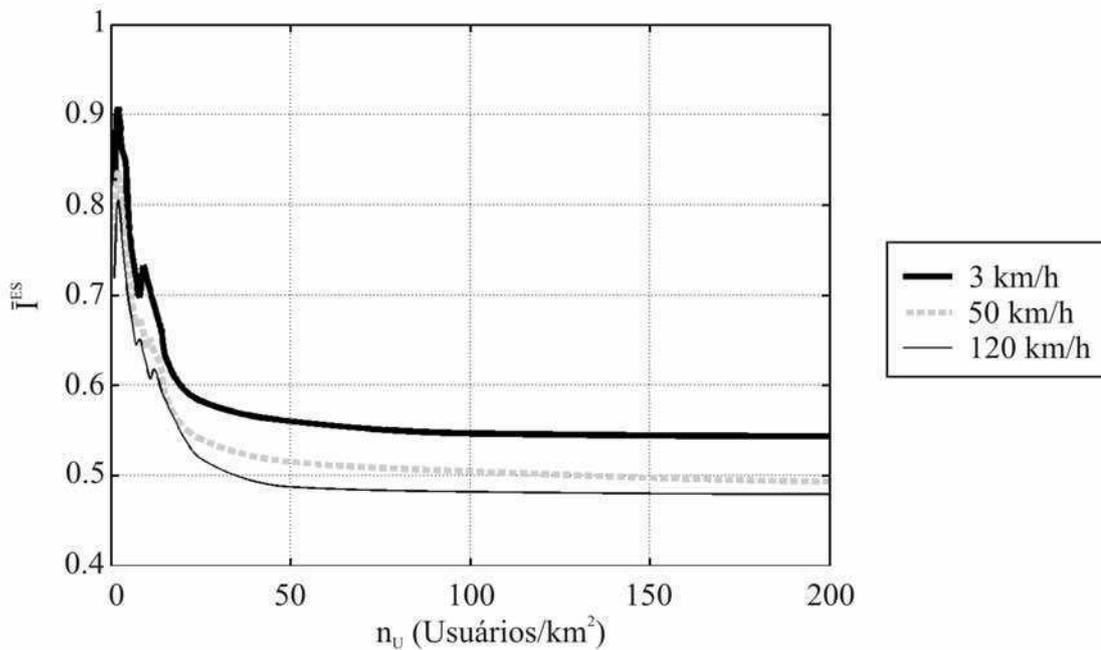
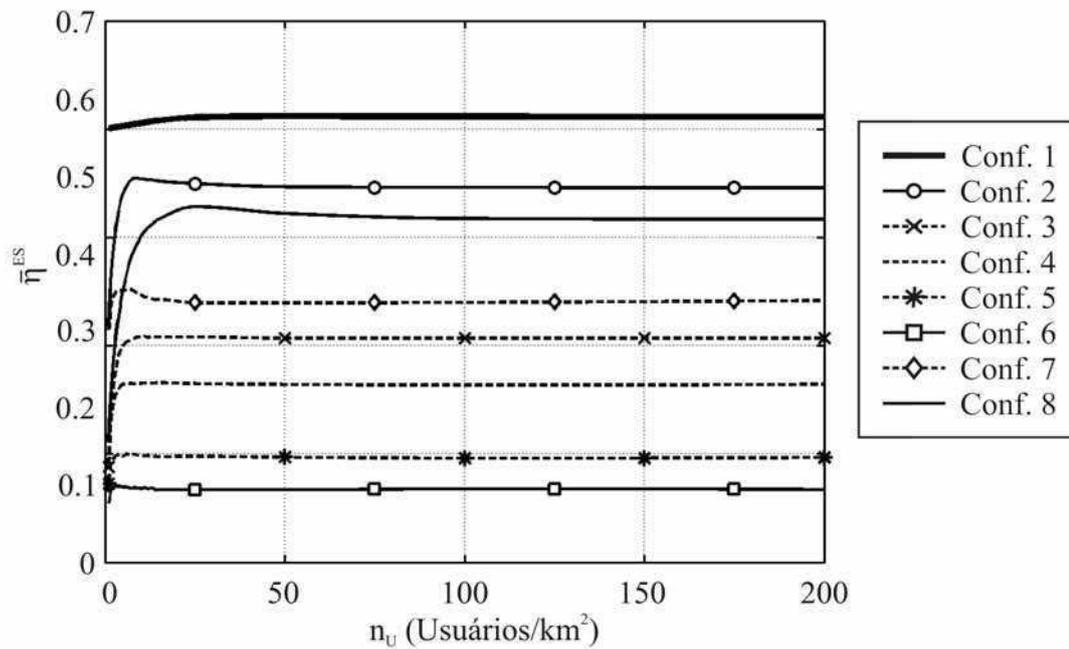


Figura 4.3 Razão média  $\bar{I}^{ES}$ , com diversas velocidades.

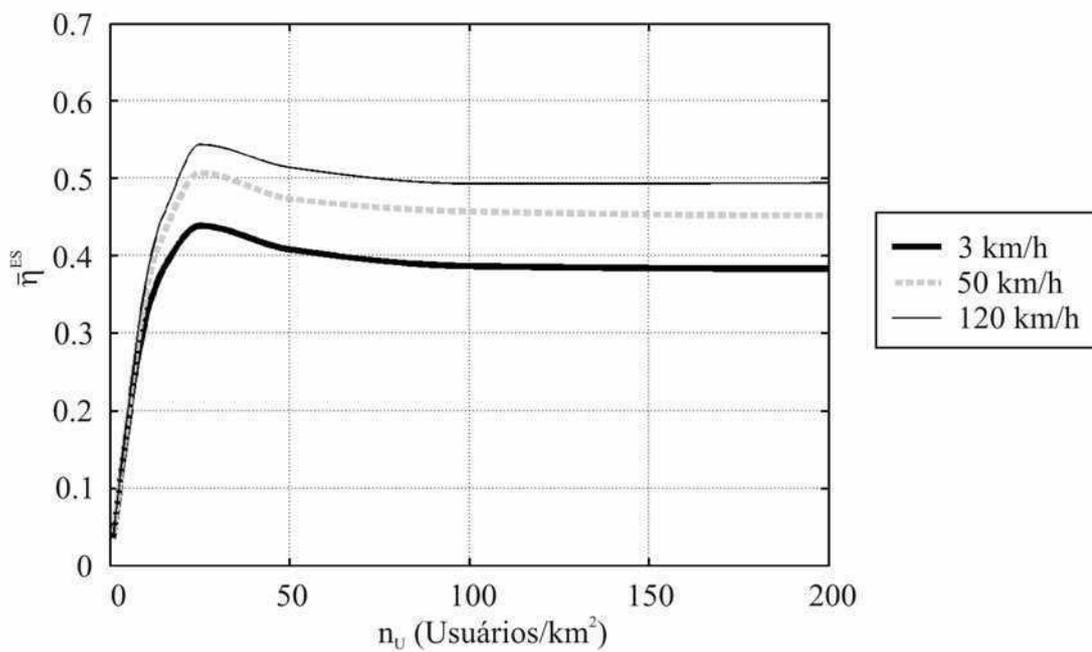
## 4.2 Desempenho no Enlace de Descida

### 4.2.1 Análise da Interferência

Os requisitos da relação portadora-interferência aumentam com a taxa de transmissão, como pode ser visto na Fig.4.6. Nessa figura é apresentada a relação portadora-interferência



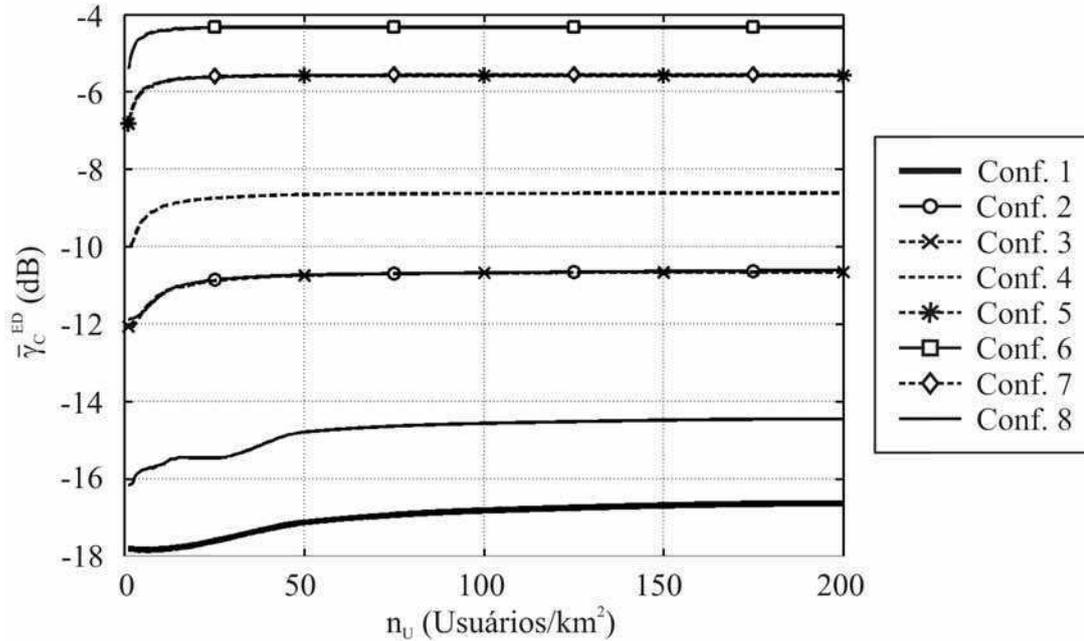
**Figura 4.4** Fator de carga no enlace de subida  $\bar{\eta}^{ES}$ .



**Figura 4.5** Fator de carga no enlace de subida  $\bar{\eta}^{ES}$ , com diversas velocidades.

média nas células ( $\bar{\gamma}_C^{ED}$ ). Pode-se observar que  $\bar{\gamma}_C^{ED}$  cresce rapidamente com a densidade de usuários, entretanto satura logo em seguida, permanecendo aproximadamente constante. Essa saturação apresentada pela relação portadora-interferência pode ser explicada pela saturação do número de usuários servidos simultaneamente nas células ( $N_{SC}$ ). Essa limitação de  $N_{SC}$  evita

o crescimento da interferência na rede que, por sua vez, torna desnecessário, no controle de potência, o aumento da potência de transmissão das estações móveis, então  $\bar{\gamma}_C^{ED}$  é estabilizada.



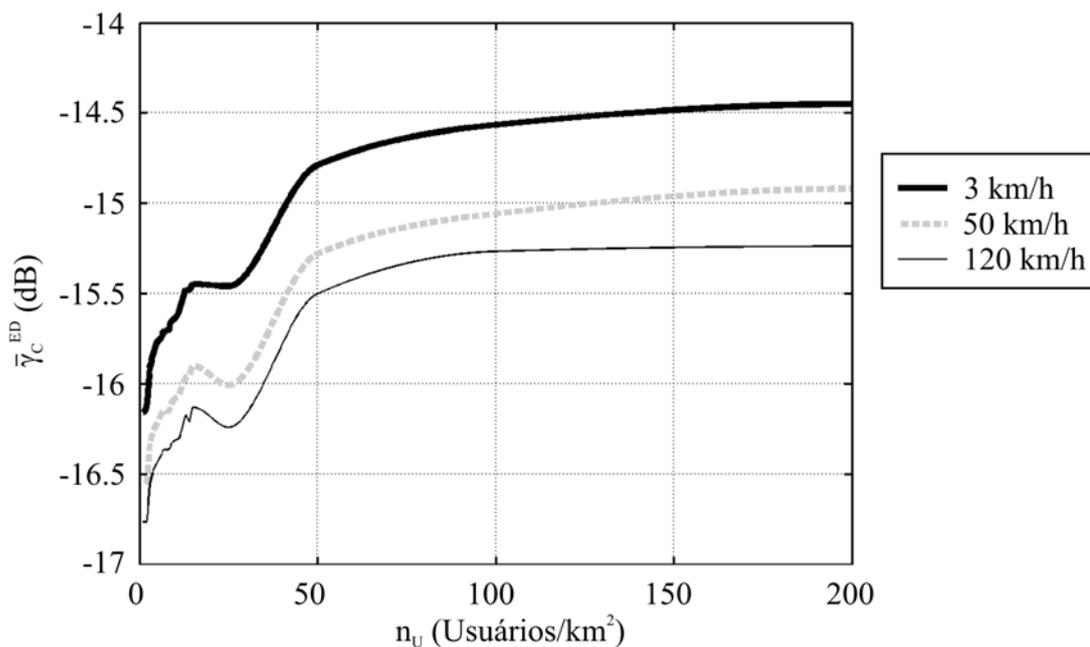
**Figura 4.6** Relação portadora-interferência média nas células.

Para a configuração oito, em que a maioria dos usuários utiliza o serviço de chamadas de voz,  $\bar{\gamma}_C^{ED}$  é maior do que para a configuração um, com usuários de voz apenas. Isso se deve à configuração oito ser composta de usuários que requisitam vários serviços com taxas de transmissão maiores que a taxa de transmissão de chamadas de voz. Dessa forma, a relação portadora-interferência cresce com a taxa de transmissão.

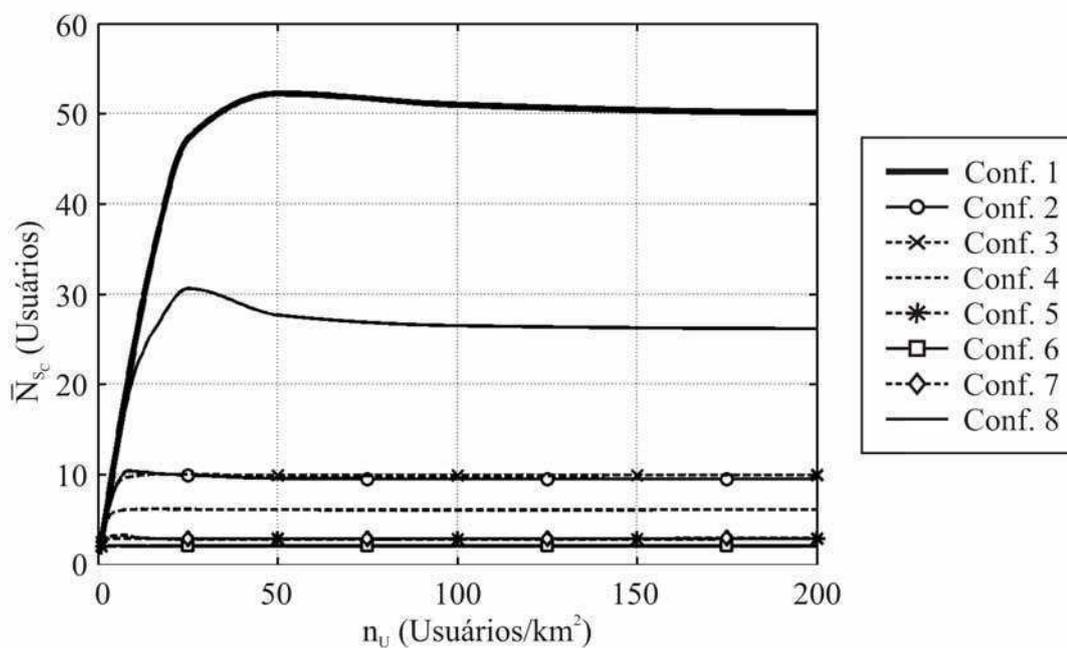
A relação portadora-interferência, para diferentes velocidades dos usuários, é mostrada na Figura 4.7. Nessa figura, observa-se que, quanto maior a velocidade, menor é a relação  $\bar{\gamma}_C^{ED}$ .

## 4.2.2 Capacidade da Rede

Nas simulações, o número médio de usuários ativos nas células satura em determinado nível, como mostrado na Figura 4.8. O número de usuários ativos simultaneamente é limitado por diversos fatores como, o aumento da interferência, que provoca, para cada usuário  $j$ , a diminuição da relação portadora-interferência medida ( $\gamma_j^{ED}$ ) a níveis mais baixos que a relação portadora-interferência alvo ( $\gamma_j$  alvo) estabelecida de acordo com o Capítulo 3. O número de usuários atendidos simultaneamente pode também ser limitado pelo número de canais disponíveis em cada célula; pela máxima potência de transmissão das estações radiobase em cada enlace, estabelecida no planejamento da rede e pela potência total de transmissão das estações radiobase. Todos esses fatores limitam a quantidade de usuários conectados ao mesmo tempo à estação radiobase em uma célula.



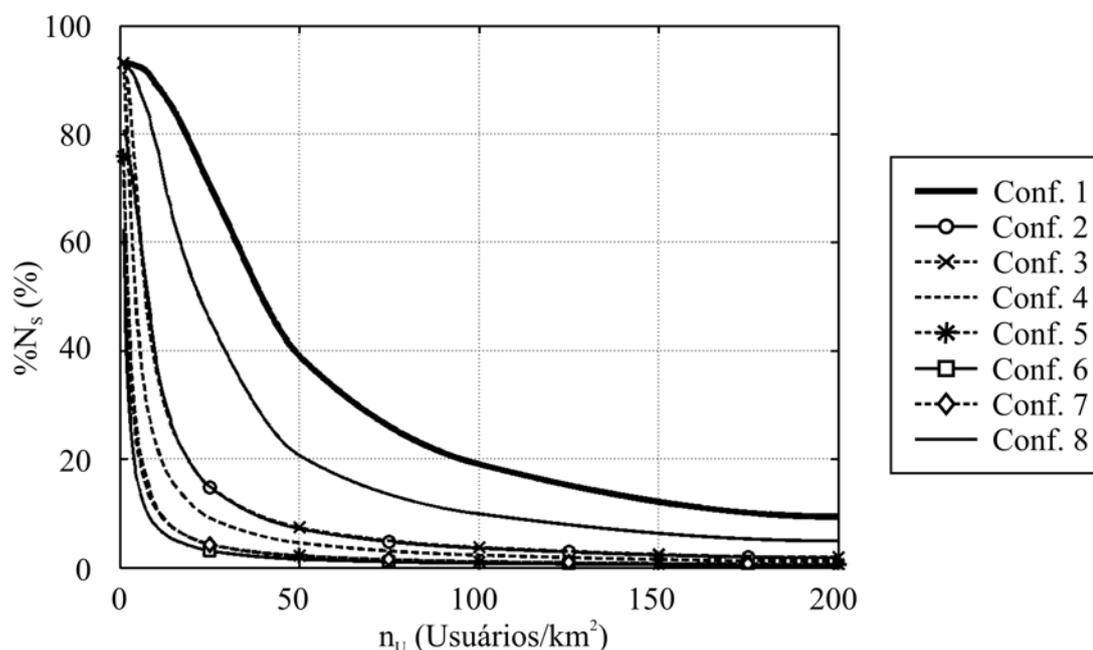
**Figura 4.7** Relação portadora-interferência média nas células, para diversas velocidades.



**Figura 4.8** Número médio de usuários servidos por célula.

Como o número de usuários conectados às estações radiobase é limitado, o percentual de usuários atendidos pelo sistema UMTS cai à medida que a densidade de usuários que solicitam serviços aumenta, como mostrado na Figura 4.9.

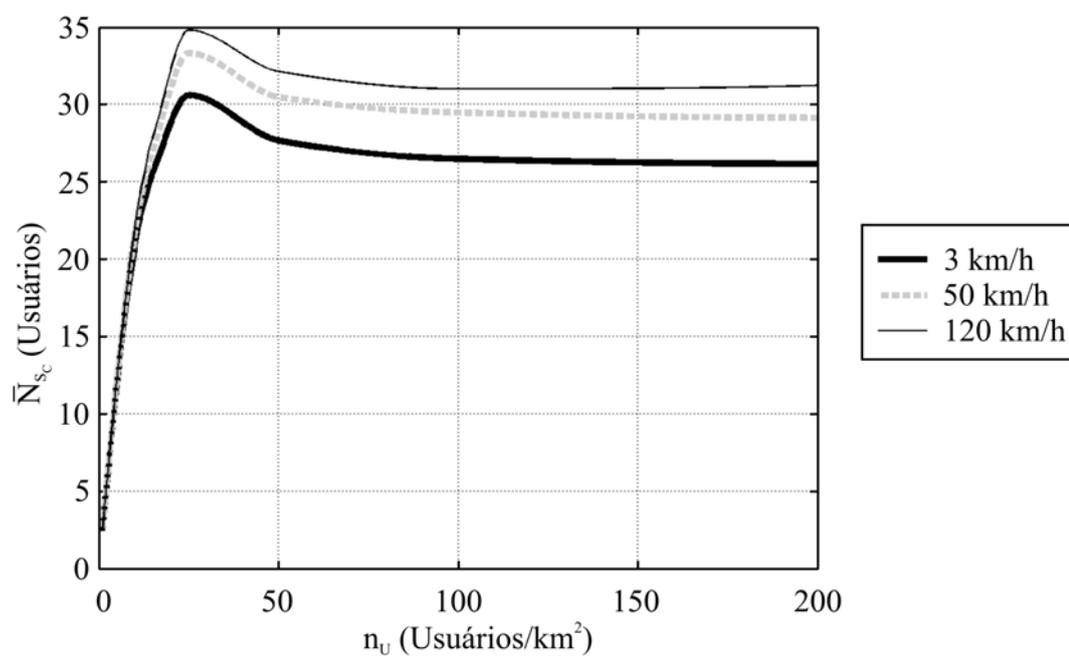
O número de usuários atendidos simultaneamente na rede, para diferentes velocidades, é mostrado na Figura 4.10. Nota-se nessa figura que o número de usuários atendidos simul-



**Figura 4.9** Percentual de usuários servidos na rede.

tâneamente é maior para maiores velocidades dos usuários. Isso contradiz o senso comum, mas pode ser explicado da seguinte forma. Para maiores velocidades dos usuários a relação portadora-interferência é menor, como mostrado na Figura 4.7. Isso permite que a estação radiobase transmita com menor potência para usuários individuais e, portanto, possa atender a mais usuários simultaneamente respeitando o limite de potência máxima. A menor relação portadora-interferência é devida à relação  $E_b/N_0$  ser menor para maiores velocidades no enlace de descida, o que indica que a qualidade do sinal cai com o aumento da velocidade de deslocamento do usuário. Esse fato é importante para deixar claro que o aumento da velocidade de deslocamento dos usuários aumenta a capacidade de conexão de usuários à rede, mas reduz a qualidade do serviço entregue ao usuário.

Os resultados mostrados na Figura 4.10, foram obtidos com distribuições de usuários de acordo com a configuração oito da Tabela 3.2. A fim de verificar como é a distribuição das classes de serviços entre os usuários atendidos, é mostrado na Tabela 4.1 o percentual de usuários para cada classe de serviço explorada neste trabalho, para as três velocidades simuladas. Nessa tabela é possível observar que o percentual de usuários atendidos, para cada classe de serviço, difere pouco do percentual de usuários na distribuição de entrada. Por exemplo, o percentual de entrada dos usuários da classe dois é 7,89% e, o percentual de usuários atendidos, dessa classe de serviço, difere pouco desse valor. Nota-se ainda, uma tendência de diminuição do percentual de usuários das classes de serviços com taxas de transmissão mais altas, para densidades de usuários mais altas. A distribuição dos usuários atendidos também muda pouco para velocidades diferentes.



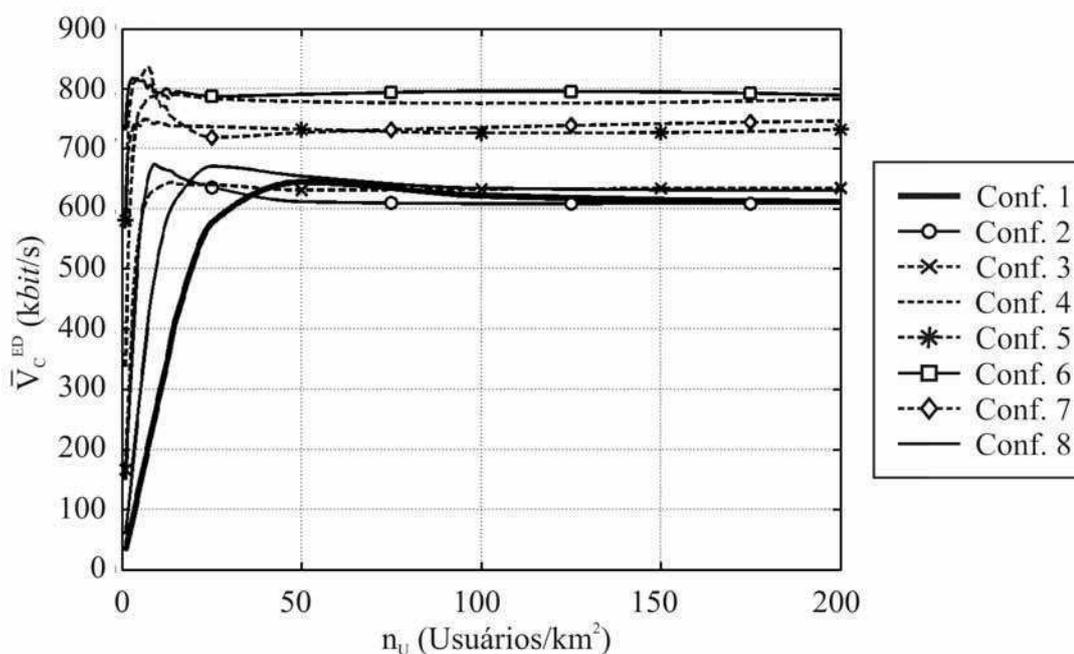
**Figura 4.10** Número médio de usuários servidos por célula, para diversas velocidades.

**Tabela 4.1** Percentual de usuários atendidos.

Densidade (Usuários/km <sup>2</sup> )	Percentual Médio de Usuários (%)																				
	Classe 1 (86,79 %)			Classe 2 (7,89 %)			Classe 3 (1,0 %)			Classe 4 (1,48 %)			Classe 5 (1,1 %)			Classe 6 (0,74 %)			Classe 7 (1,0 %)		
	Velocidade (km/h)			Velocidade (km/h)			Velocidade (km/h)			Velocidade (km/h)			Velocidade (km/h)			Velocidade (km/h)			Velocidade (km/h)		
	3	50	120	3	50	120	3	50	120	3	50	120	3	50	120	3	50	120	3	50	120
1	86,91	86,71	86,68	7,32	7,37	7,40	1,35	1,34	1,34	1,31	1,30	1,29	1,31	1,32	1,31	0,71	0,70	0,70	1,18	1,21	1,21
2	87,69	87,61	87,62	7,12	7,20	7,19	1,02	1,01	1,02	1,67	1,67	1,66	1,00	1,00	1,00	0,67	0,70	0,70	0,88	0,89	0,88
3	87,53	87,43	87,44	7,05	7,16	7,16	1,12	1,11	1,13	1,53	1,53	1,53	1,11	1,10	1,09	0,68	0,68	0,68	0,99	1,00	1,00
4	87,76	87,56	87,54	6,95	7,06	7,09	0,99	0,99	0,99	1,51	1,49	1,49	1,18	1,17	1,16	0,82	0,84	0,85	0,89	0,89	0,89
5	87,68	87,63	87,60	6,98	7,04	7,07	1,09	1,08	1,07	1,46	1,46	1,46	1,09	1,06	1,08	0,76	0,77	0,77	0,96	0,96	0,97
6	87,75	87,65	87,64	6,93	7,02	7,03	1,00	1,00	1,00	1,56	1,58	1,57	1,12	1,12	1,10	0,75	0,75	0,75	0,89	0,89	0,91
7	87,75	87,65	87,60	6,94	7,02	7,03	1,05	1,04	1,04	1,53	1,53	1,54	1,10	1,12	1,11	0,72	0,73	0,74	0,91	0,92	0,93
8	88,02	87,89	87,90	6,88	6,98	6,96	1,00	0,99	1,00	1,50	1,51	1,50	1,03	1,03	1,05	0,70	0,70	0,72	0,87	0,90	0,87
9	88,04	87,92	87,89	6,85	6,97	6,97	1,05	1,03	1,03	1,48	1,48	1,46	1,03	1,04	1,05	0,67	0,68	0,68	0,89	0,92	0,92
10	88,21	87,98	87,97	6,80	6,93	6,92	0,98	0,99	0,98	1,50	1,52	1,53	1,02	1,05	1,06	0,65	0,66	0,67	0,84	0,87	0,88
11	88,29	88,09	88,08	6,83	6,90	6,86	1,03	1,01	1,03	1,47	1,48	1,50	0,94	1,01	1,00	0,64	0,63	0,65	0,82	0,87	0,88
12	88,34	88,20	88,25	6,78	6,84	6,85	0,98	0,99	0,99	1,46	1,46	1,47	1,00	1,01	1,04	0,63	0,67	0,68	0,82	0,82	0,85
13	88,34	88,18	88,04	6,77	6,88	6,89	1,03	1,02	1,03	1,41	1,43	1,47	1,00	1,04	1,06	0,62	0,64	0,65	0,82	0,80	0,86
14	88,50	88,29	88,30	6,74	6,80	6,76	1,01	0,99	1,01	1,45	1,50	1,49	0,93	1,01	1,01	0,60	0,63	0,63	0,77	0,80	0,81
15	88,57	88,38	88,28	6,75	6,81	6,76	0,99	1,03	1,05	1,43	1,41	1,48	0,93	0,98	1,01	0,56	0,59	0,61	0,77	0,81	0,81
25	90,95	90,81	90,73	5,32	5,49	5,50	0,78	0,78	0,84	1,14	1,15	1,14	0,78	0,73	0,74	0,45	0,46	0,47	0,58	0,59	0,57
50	88,77	88,71	88,66	6,71	6,69	6,73	0,99	1,00	0,98	1,41	1,41	1,38	0,90	0,90	0,93	0,52	0,60	0,56	0,70	0,69	0,75
100	88,77	88,61	88,64	6,58	6,63	6,62	0,97	1,04	1,00	1,41	1,49	1,43	0,94	0,94	0,95	0,54	0,57	0,57	0,78	0,75	0,78
200	88,68	88,47	88,88	6,71	6,72	6,55	0,97	0,99	0,98	1,37	1,46	1,40	0,93	1,00	0,92	0,61	0,59	0,57	0,73	0,76	0,68

Como visto, o número máximo de usuários atendidos simultaneamente cresce para pequenas densidades de usuários ( $n_U$ ) na área de cobertura da rede, mas estabiliza logo em seguida para os serviços com maior taxa de transmissão no enlace de descida. Esse comportamento das curvas pode ser observado também nos gráficos vazão no enlace de descida ( $\bar{V}_C^{ED}$ ), apresentados na Figura 4.11. Esse efeito é mais crítico para crescentes taxas de transmissão no enlace de descida.

O número de usuários para o serviço de voz cresce para pequenas densidades de usuários, mas satura em torno de cinquenta usuários por célula, o que corresponde a uma vazão de 620 *kbit/s*. Para esse serviço as taxas são significativamente mais baixas que, por exemplo, para TV móvel, por isso mais usuários do serviço de voz podem ser atendidos simultaneamente pela rede. Se tomado o exemplo do serviço de TV Móvel com taxa de transmissão de 384 *kbit/s* no enlace de descida, a quantidade média de usuários atendidos simultaneamente em uma célula satura em aproximadamente dois. Isso limita a vazão média por célula, no enlace de descida, em aproximadamente 800 *kbit/s*, como mostrado na Figura 4.11.



**Figura 4.11** Vazão média por célula na rede.

A velocidade dos usuários também afeta a vazão no enlace de descida. Na Figura 4.12, é mostrada a vazão média por célula, nesse enlace. Observa-se que para maiores velocidades de locomoção dos usuários, a vazão média por célula é também maior. Isso pode ser explicado pela quantidade de usuários atendidos simultaneamente ser maior para velocidades crescentes, como mostrado na Figura 4.10

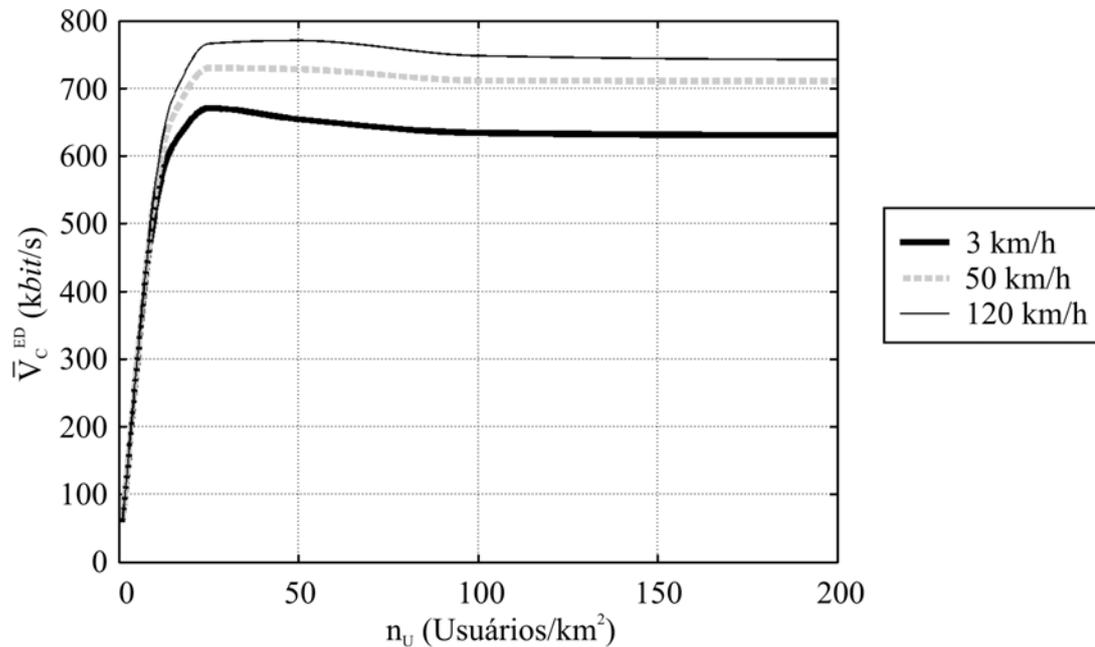


Figura 4.12 Vazão média por célula, para diversas velocidades.

### 4.2.3 Potência de Transmissão

A média da potência total de transmissão das estações radiobase ( $\bar{P}_T^{ED}$ ) por canal de tráfego, é mostrada na Figura 4.13. Nota-se que para crescentes densidades de usuários, a potência de transmissão da estação radiobase aumenta até um nível de saturação. Na verdade, a potência de transmissão aumenta com o número de usuários ativos na célula (NAWROCKI *et al.*, 2006; LAIHO *et al.*, 2005a), como esse número aumenta com a densidade de usuários e satura em determinado nível, a potência total de transmissão apresenta o mesmo comportamento.

Como o número de usuários atendidos simultaneamente exerce influência na potência total de transmissão das estações radiobase e, o número de usuários atendidos simultaneamente aumenta com a velocidade, então  $\bar{P}_T^{ED}$  também é maior para velocidades maiores, como mostrado na Figura 4.14

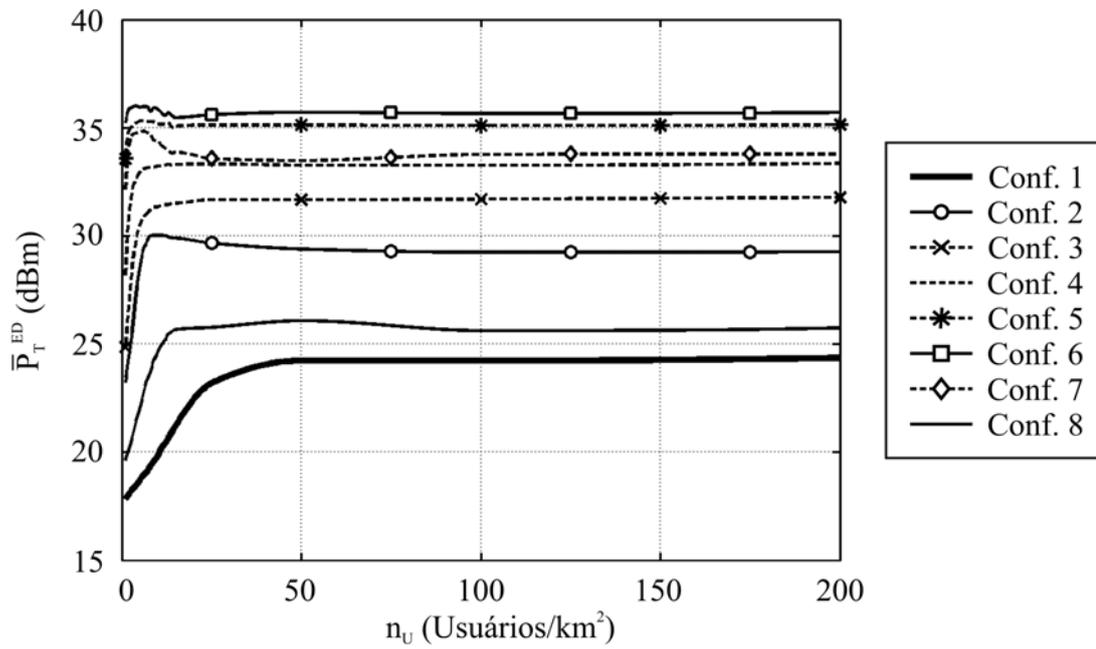


Figura 4.13 Potência de transmissão das estações radiobase.

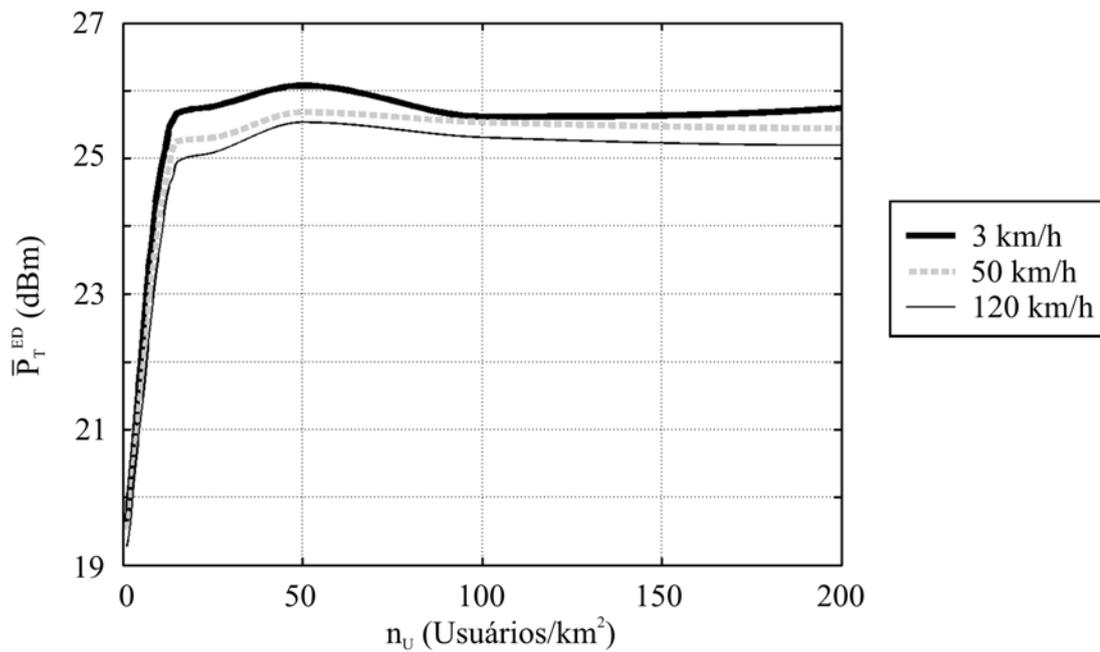


Figura 4.14 Potência de transmissão das estações radiobase, para diversas velocidades.

## CAPÍTULO 5

---

# Conclusões

---

Este trabalho apresenta os resultados da avaliação de desempenho de uma rede UMTS macrocelular, com dezenove sítios de três setores situada em Espoo, segunda maior cidade da Finlândia, com 235 mil habitantes, parte da região metropolitana de Helsinque. A área de cobertura da rede é de 152 km<sup>2</sup> e pode ser caracterizada como um ambiente suburbano.

A análise de desempenho feita neste trabalho se concentra em características da rede relacionadas com a interferência e com a capacidade de atendimento simultâneo de usuários de várias classes de serviços e diferentes velocidades de deslocamento. As análises são apresentadas em função da densidade de usuários na área de cobertura da rede.

Nas simulações é utilizado um sistema de simulações estáticas de Monte Carlo baseado em modificações de um simulador de rede conhecido na literatura, o NPSW. Esse sistema de simulação executa o simulador cinquenta vezes para obtenção de médias de indicadores de desempenho da rede simulada. Em cada simulação é usado um conjunto diferente de usuários uniformemente distribuídos na área de cobertura da rede.

Os resultados indicam que o número médio de usuários atendidos simultaneamente nas células cresce com a densidade de usuários até saturar, indicando que a partir desse nível a rede não suporta o atendimento de novos usuários.

O número médio de usuários atendidos simultaneamente pelas células diminui com as taxas de transmissão usadas nas diversas classes de serviços. Por exemplo, para altas qualidades do serviço de televisão digital móvel, ou seja, maiores taxas de transmissão, a quantidade média de usuários atendidos diminui. Para esse serviço com taxa de transmissão de 128 kbit/s, a quantidade média de usuários saturou em torno de seis usuários por célula. Para TV móvel com taxas de transmissão de 256 kbit/s e 384 kbit/s, respectivamente, o número de usuários servidos simultaneamente nas células foi aproximadamente dois e três. Esses números estão bastante abaixo do número médio de usuários de voz, por exemplo, que saturou em cinquenta usuários por célula.

A máxima vazão nas células para o enlace de descida na rede analisada fica entre setecentos e oitocentos kbit/s, para as classes de serviços que incluem TV móvel e acesso à Internet.

Para as classes que apresentam menores taxas de transmissão, a vazão no enlace de descida se apresenta em torno de seiscentos e vinte *kbit/s* para o serviço de voz, embora para essas classes o número de usuários atendidos simultaneamente seja maior que para as que têm taxas maiores.

Analizou-se a razão média entre a interferência proveniente de outras células e a interferência da própria célula, no enlace de subida. Essa razão se mostrou decrescente com a densidade de usuários, até um nível mínimo em que se estabiliza. Esse nível depende da classe de serviço oferecida e é menor para classes de serviço com taxas de transmissão mais altas.

Analizou-se também a variação da razão portadora-interferência média nas células. Os resultados indicam que, para maiores taxas de transmissão, essa razão deve também ser maior. Além disso, verificou-se pequena variação em relação à densidade de usuários para cada taxa de transmissão de dados.

## Possibilidades de Trabalhos Futuros

Como possibilidades de trabalhos futuros, pode-se destacar a utilização de um simulador dinâmico para efetuar uma simulação com os dados apresentados neste trabalho e comparar seus resultados aos obtidos. As simulações dinâmicas apresentam maior precisão que as simulações estáticas com relação a operações da rede que são executadas em função do tempo, como algumas operações de gerenciamento de recursos radioelétricos.

Outra possibilidade de trabalho futuro é a análise de desempenho de redes UMTS com dados de cidades brasileiras que tenham características diferentes em termos de, por exemplo, tipos de ambientes de propagação, densidade de usuários e topografia.

Há várias possibilidades de variação dos dados de entrada do processo de simulação como, tipos de antenas das estações radiobase, inclinação, azimute e potência máxima de transmissão. Além disso, pode-se utilizar uma distribuição de macro e micro células simultaneamente e, dessa forma, estudar os efeitos de uma distribuição não uniforme de usuários na área de cobertura da rede, colocando maiores densidades de usuários em algumas regiões em que há maior concentração de pessoas.

## APÊNDICE A

# O Simulador NPSW

Neste capítulo é apresentado o funcionamento básico do programa de planejamento celular utilizado no trabalho para simular uma rede UMTS. Essa ferramenta realiza simulações estáticas para analisar o desempenho de sistema baseado em WCDMA. Nesta descrição do simulador é dada ênfase à análise do impacto da interferência na capacidade e cobertura da rede. Uma descrição completa do sistema de simulação pode ser vista em (WACHER *et al.*, 2006).

## A.1 O Simulador Estático NPSW

O NPSW é um simulador estático construído usando a plataforma de programação do Matlab<sup>®</sup>.

Para iniciar o simulador, o usuário deve modificar o diretório corrente do Matlab<sup>®</sup> para o diretório com os arquivos do NPSW. Em seguida deve usar o comando **npsw** para iniciar a interface gráfica do sistema de simulação. Na Figura A.1 é apresentada a tela inicial do simulador NPSW.

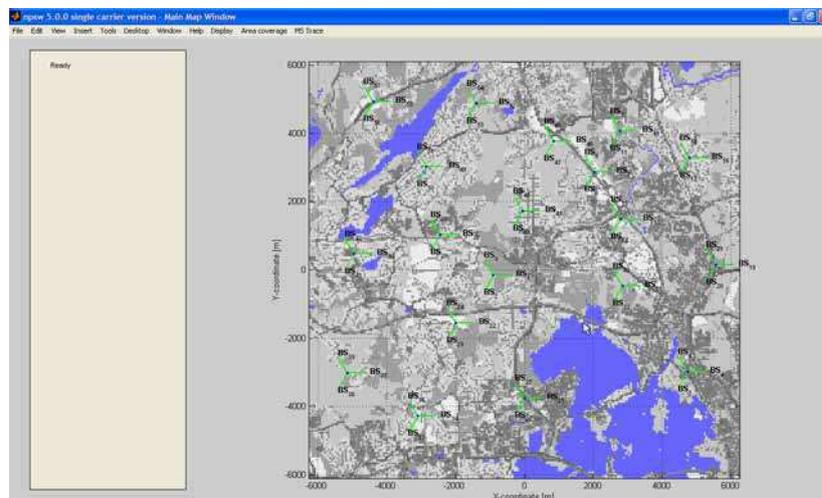


Figura A.1 Tela Inicial do NPSW.

No NPSW são realizadas análises de diversas operações de sistemas WCDMA, independentemente para os enlaces de subida e descida, de forma a contemplar as diferenças de funcionamento do sistema em cada percurso.

Neste trabalho, o foco é a análise da interferência, então os requisitos de qualidade de serviço são expressos em termos da relação sinal-interferência (SIR) ou da relação portadora-interferência ( $\gamma$ ).

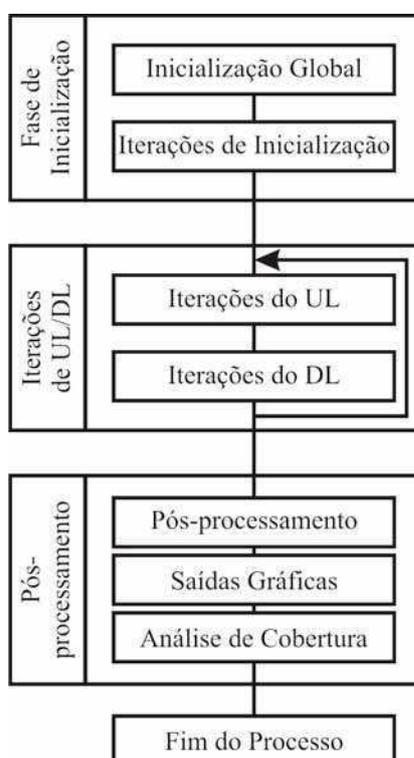
A seguir são apresentadas as fases de uma simulação no NPSW e a estrutura básica desse programa. Em seguida são mostrados exemplos de algumas telas com resultados de simulações.

### A.1.1 Fases das Simulações

As simulações no NPSW são realizadas em três fases:

- fase de inicialização geral;
- fase de combinação de análise dos enlaces de subida e descida;
- fase de pós-processamento.

A estrutura básica do NPSW é apresentada na Figura A.2. Na fase de inicialização, são lidos todos os arquivos de parâmetros e executados os cálculos que devem ser realizados apenas uma vez, como os valores das perdas de percurso.



**Figura A.2** Estrutura básica do NPSW.

As perdas de percurso de todos os sinais das estações radiobase são calculadas para todos os *pixels* do mapa, simulando assim o ambiente de propagação. A complexidade dessa fase é definida pelo número total de *pixels* no mapa usado, *i.e.* a resolução do mapa usado nas simulações define o tempo de simulação. A resolução do mapa é um parâmetro de entrada do simulador, definido pelo usuário antes de iniciar a simulação.

No NPSW, podem ser usados vários modelos de propagação, setorização das estações radiobase e configurações de antenas. Entre os modelos de propagação, está o modelo de Okumura-Hata, mas o simulador também pode importar dados de perdas de percurso de outras ferramentas, que implementam, por exemplo, o método de traçado de raios (WACKER *et al.*, 1999).

Na fase de iteração, vários parâmetros de desempenho são calculados iterativamente. As iterações relativas ao enlace de subida (UL) são necessárias para alocação da potência de transmissão das estações móveis. Assim o processo iterativo para o enlace de subida, é executado até que as mudanças nos valores de interferência nas estações radiobase sejam menores que os especificados. O alvo do processo iterativo referente ao enlace de descida (DL) é alocar a potência de transmissão das estações radiobase para cada estação móvel. A fase de iteração é executada quando o usuário aciona o menu **Calculate**, logo após a fase de inicialização geral.

Nas seções seguintes são apresentados mais detalhes sobre as fases de simulação do NPSW.

### A.1.2 Procedimento Geral de Inicialização

Antes de começar o processo de simulação, vários parâmetros que descrevem o sistema e a rede devem ser configurados no simulador. Existem três funções para determinar esses parâmetros de inicialização:

- ***npswsys.m*** que define os parâmetros de descrição do sistema a ser simulado, determinando aqueles que devem ser mantidos fixos durante todo o processo de simulação;
- ***npswini.m*** que define parâmetros globais, que podem ser modificados durante a simulação;
- ***mapini.m*** que define todos os parâmetros de descrição das propriedades geográficas da rede.

Os dados referentes ao *layout* do sistema em simulação são armazenados em dois arquivos com informações sobre as estações radiobase e sobre as estações móveis. Os nomes desses arquivos são especificados na função ***npswini.m***

A seguir é apresentada uma visão geral dessas funções de inicialização do programa. Os parâmetros apresentados nessas funções devem ser ajustados de acordo com as características do sistema.

## Ajuste de Parâmetros do Sistema

Na função *npswsys.m* são ajustados os parâmetros gerais do sistema. Alguns dos parâmetros contidos nessa função são: frequência da portadora em MHz; separação entre portadoras em Hz, se mais de uma portadora é utilizada pelo sistema; taxa de *chips* em Hz; densidade de potência do ruído térmico  $N_0$  em dBm/Hz, definido por  $N_0 = K \cdot T$ , em que  $K = 1,38 \cdot 10^{-23}$  W/Hz, em que  $K$  é a constante de Boltzmann e  $T$  a temperatura absoluta em kelvin; figura de ruído do receptor em dB; figura de ruído do receptor da estação móvel em dB e altura padrão da antena da estação móvel em metros. O código-fonte do arquivo *npswsys.m* é mostrado na Figura A.3.

```

%NPSWSYS   this file contains all the system related parameters needed.
%
%Authors: Jaana Laiho-Steffens (jls), Achim Wacker (AWa), Kari Sipilä (KSi)
%
5  %Revision: 5.0.0web   Date: 17-Jul-2005
%
%needed m-files: none

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% general %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
10 frequency = 2000;      %MHz
   channelSpacing = 5e6; %Hz
   channelOffset = 1;    %Offset for the second carrier (multiple of the channelSpacing)
   W = 3.84e6;           %Hz - CDMA bandwidth

15 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% BS parameters %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
   BS_noise_figure = 5;      % dB
   Thermal_noise_density = -174; % dBm/Hz

   %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% MS parameters %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
20 msHeight = 1.5;         %m
   MS_noise_figure = 8;    %dB

```

**Figura A.3** Exemplo de Ajuste de Parâmetros no Arquivo *npswsys.m*.

## Ajuste de Parâmetros Globais

Os parâmetros globais são ajustados no arquivo *npswini.m*, com conteúdo mostrado na Figura A.4. Esses parâmetros são não necessariamente dependentes do sistema em simulação e não precisam, portanto, ser fixos. Alguns desses parâmetros são:

- Parâmetros da estação móvel como ganho de antena, número de estações móveis, *body loss* da estação móvel, a interferência que uma estação móvel sofre na transmissão de um sinal da estação radiobase em canais adjacentes;
- Parâmetros das estações radiobase como o número de estações radiobase, a sensibilidade da estação base em dBc como função do canal de *offset*, etc;
- Parâmetros necessários nas iterações de enlaces de subida como a velocidade da estação móvel de referência em km/h, a potência de transmissão máxima da estação móvel de referência em dBm, etc;
- Parâmetros necessários nas iterações de enlaces de descida;

- Parâmetros comuns nas iterações de enlaces de subida e de descida;
- Parâmetros utilizados na análise de canais comuns e canais dedicados.

### Parâmetros Geográficos

Os parâmetros geográficos da rede são definidos no arquivo `mapini.m`, cujo conteúdo está mostrado na Figura A.5, entre eles:

- Dimensões do mapa em metros;
- Área;
- Resolução. Todas as localizações da rede são mapeadas em uma grade, em que a distância entre os *pixels* vizinhos são especificados (em metros).
- Dados de perda, se importados de outro programa;
- Mapa vetorial, se disponível de outra ferramenta de planejamento.

#### A.1.3 Dados de Entrada

Além do ajuste dos parâmetros descritos, é necessária a introdução de dados sobre as estações radiobase, móveis e sobre a área geográfica da rede. Os dados sobre as estações radiobase e móveis são apresentados em dois arquivos, `BSparamFile` e `MSparamFile`, respectivamente. As informações referentes às estações radiobase incluem a localização geográfica, altitude, altura da antena, valores máximos de potência de transmissão, tipos de antenas usadas, direção e inclinação das antenas, entre outras. Exemplos dessas informações podem ser vistos na Tabela A.1.

As informações sobre as estações móveis são localização geográfica, altitude, altura da antena, potência máxima de transmissão, ganho das antenas, taxas de dados em *kbit/s* no enlace de subida e de descida, e velocidade em *km/h*, como mostrado na Tabela A.2.

Para os diversos tipos de antenas das estações radiobase são usados arquivos contendo dados sobre ganho e diagrama de irradiação (horizontal e vertical) das antenas.

As informações geográficas da rede são apresentadas em um mapa digital que deve conter pelo menos os dados topográficos, os dados morfológicos e a localização dos prédios, assim como suas alturas. Quando disponíveis, informações sobre as estradas e ruas podem ser utilizadas em algumas operações como modelamento de tráfego e predições de cobertura. A resolução do mapa depende do tipo de região. Quanto mais urbana, menor deve ser essa resolução. Se não se dispõe de um mapa digital da área de interesse, as simulações são realizadas usando uma grade homogênea plana sem dados reais de perda de percurso. Para esses casos, o NPSW suporta, por exemplo, o modelo de propagação de Okumura-Hata.

Para informações mais detalhadas sobre a fase de inicialização do NPSW, deve-se consultar (WACHER *et al.*, 2006).

**Tabela A.1** Exemplo de entrada de informações das estações radiobase

<i>xPos</i> (m)	<i>yPos</i> (m)	<i>Ground Height</i> (m)	<i>Ant. Height</i> (m)	<i>Max TX Power</i> (dBm)	<i>Max TX Power Per Link</i> (dBm)	<i>Min TX Power Per Link</i> (dBm)	<i>P TxDL AbsMax</i> (dBm)	<i>CPICH Power</i> (dBm)	<i>Common Channel Other</i>	<i>CPICH To RefRab Offset</i>	...
0	0	0	25	43	30	-999	60	30	30	7	...
0	0	0	25	43	30	-999	60	30	30	7	...
0	0	0	25	43	30	-999	60	30	30	7	...
3000	0	0	25	43	30	-999	60	30	30	7	...
...											...

<i>Ant. Type</i>	<i>Ant. Dir</i> (°)	<i>Ant. Tilt</i> (°)	<i>Cable Losses</i> (dB)	<i>MHA Gain</i> (dB)	<i>rfHead Gain</i> (dB)	<i>Channel</i>	<i>Window Add</i>	<i>num Carr</i>	<i>Used Carr</i>	<i>Excess Load Own</i>	<i>Excess Load Total</i>
65deg	90	0	3	0	0	1	-3	1	2	0.5	0.9
65deg	210	0	3	0	0	1	-3	1	2	0.5	0.9
65deg	330	0	3	0	0	1	-3	1	2	0.5	0.9
Omni	90	0	3	0	0	1	-3	1	2	0.5	0.9
...											

**Tabela A.2** Exemplo de entrada de informações das estações móveis.

<i>xPos</i> (m)	<i>yPos</i> (m)	<i>Ground Height</i> (m)	<i>Ant. Height</i> (m)	<i>Max TX Power</i> (dBm)	<i>Min TX Power</i> (dBm)	<i>Ant. Gain</i> (dBi)	<i>Body Losses</i> (dB)	<i>Bit rate UL</i> (bit/s)	<i>Bit rate DL</i> (bit/s)	<i>Used Carrier</i>	<i>Speed</i> (km/h)
6450.75	5.43	0	1.5	24	-45	1.5	1.5	8000	8000	1	50
-514.75	2505.43	0	1.5	24	-45	1.5	1.5	8000	8000	1	100
168.579	-364.08	0	1.5	24	-45	1.5	1.5	12200	12200	1	50
-530.81	2047.24	0	1.5	24	-45	1.5	1.5	384000	384000	1	50
987.38	-235.82	0	1.5	24	-45	1.5	1.5	8000	8000	1	50

## A.2 Cálculos Realizados Pelo Simulador

Em redes celulares WCDMA, várias células da rede usam a mesma frequência de portadora, de forma que os usuários são separados apenas pelas sequências de códigos usadas no espalhamento espectral. O desempenho de um sistema WCDMA é então limitado fortemente pela interferência. A capacidade da rede (ou da célula) é definida pela interferência que, por outro lado, limita o número máximo de usuários ou a máxima vazão em uma célula.

Neste trabalho, a capacidade do sistema é definida como o número máximo de usuários suportados simultaneamente pelo sistema, com uma probabilidade de serviço alvo pré-definida, ou correspondentemente com a carga alvo nos enlaces de subida e descida. Os cálculos realizados pelo NPSW obedecem as equações apresentadas na Seção 3.2.

## A.3 Visualização dos Resultados

Os resultados das simulações do NPSW são apresentados em sua maioria na forma de gráficos após a convergência das iterações e realização do pós-processamento dos dados.

No fim do pós-processamento o NPSW torna disponível o acesso ao menu **Display**. A maioria dos gráficos mostrados nessa seção podem ser visualizados acionando esse menu do

NPSW. Os gráficos de análise de cobertura e canal comum podem ser obtidos no menu **Area Coverage**.

Alguns dos resultados do NPSW são listados em seguida.

- Número de usuários por *pixel* – é mostrado um gráfico com o mapa do cenário em questão e o número de usuários por *pixel* desse mapa.
- Taxa de dados por usuário por pixel – representa no mapa os usuários de acordo com sua taxa de dados. Pode-se visualizar mapas separados para os usuários iniciais, para os usuários remanescentes após as iterações e para os usuários sem serviço.
- Carga na célula – dois mapas podem ser apresentados, contendo o tráfego na célula junto com o melhor servidor no enlace de subida.
- Potência de transmissão da estação móvel – apresenta um histograma, mostrando a probabilidade de uma estação móvel transmitir com determinada potência.
- Perda de percurso – quando acionado permite ao usuário escolher para qual estação radiobase apresentar as perdas de percurso. Pode-se também mostrar a composição de perdas de percurso.
- Distribuição de tráfego – apresenta a taxa de dados acumulada em todos os *pixels* do mapa em questão, representa também a taxa média em cada célula.
- Nível de sinal recebido – apresenta histogramas da potência recebida pelas estações móveis.
- Conexões com a estação radiobase no enlace de descida – é gerado um gráfico que apresenta todas as conexões no enlace de descida para as estações base selecionadas e mostradas em uma caixa de diálogo as estações móveis conectadas à estação radiobase escolhida.
- Conexões com a estação móvel no enlace de descida – é gerado um gráfico que apresenta todas as conexões no enlace de descida para as estações móveis selecionadas.
- Melhor servidor nos enlaces de subida e de descida – mostra em um gráfico os melhores servidores para cada *pixel* do mapa.
- Áreas de *Soft Handovers* – Mostra no mapa as áreas em que acontecem *soft handovers*.

Neste trabalho é dada prioridade para algumas dessas opções que, portanto, são descritas com mais detalhes na subseções seguintes.

### A.3.1 Distribuição de Usuários

O número de usuários por *pixel* pode ser visualizado sem levar em consideração sua taxa de dados. Para isso, o NPSW conta todos os usuários dentro de uma área quadrada (*pixel*), cuja dimensão depende da resolução adotada na simulação. Um exemplo de distribuição de usuários no mapa do cenário em simulação pode ser visto na Figura A.6.

Além disso, podem ser visualizados separadamente os usuários atendidos e não-atendidos (bloqueados) pela rede. Dessa forma, tem-se informações a respeito de possíveis problemas de cobertura em pontos da rede, dado que podem ser identificadas áreas com maior concentração de usuários bloqueados.

### A.3.2 Taxa de Dados de Usuários

O simulador mostra a distribuição de usuários na rede de acordo com suas taxas de dados. Podem ser visualizados todos os usuários destacados com cores diferentes de acordo com suas taxas. Podem também ser visualizados, separadamente, os usuários atendidos e não-atendidos. Os não-atendidos podem ser separados pelo motivo do bloqueio, por exemplo *hard blocking* ou por exceder a potência máxima de transmissão da estação móvel. Na Figura A.7 é mostrado o caso em que os usuários são bloqueados por causa da limitação da potência de transmissão da estação radiobase.

### A.3.3 Carga na Célula

O NPSW mostra o fator de carregamento em cada *pixel* do mapa, destacando com cores distintas os valores de  $\eta$  nas células. Os *pixels* com usuários não-atendidos são mostrados em branco, como pode ser visto na Figura A.8. O simulador permite mostrar separadamente a carga provocada pelos usuários da própria célula ou por todos os usuários da rede.

### A.3.4 Relação entre a Interferência das Outras Células e a Interferência da Própria Célula

O simulador permite a visualização da relação entre a interferência de todas as outras células e a interferência da própria célula, para cada *pixel* do mapa em cores diferentes, como mostrado na Figura A.9.

```

%NPSWINI this file contains all the frequently changed system and control
%paramters needed
%
%Authors: Jaana Laiho-Steffens (jls), Achim Wacker (AWa), Kari Sipilä (KSii)
5 %      Kari Heiska (KHe), Kai Heikkinen (KHeik)
%
%Revision: 5.0.0web Date: 17-Jul-2005
%
%needed m-files: none
10
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% general %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%following parameters are fixed but could be as well BS or MS
%specific if different classes of BSs or MSs exist
15
mobilestationAntennaGain = 1.5;% dBi
mobilestationBodyLoss = 1.5; % dB

limitCT = 0.2; % dB - limit for cov. threshold (uplink
20 % break criterion)
limitDeltaCT = 0.1; % dB - limit for delta cov. th. (uplink
% break criterion)
limitOutageUL = 1; % plain - number of iterations after MS is
% put to outage in UL
25 limitCI = 0.2; % dB - limit for C/I (downlink break criterion)
limitDeltaCI = 0.001; % dB - limit for delta C/I (downlink break
% criterion)
limitOutageDL = 2; % plain - number of iterations after MS is put
% to outage in DL
30 limitOutageCPICH = 1; % plain - number of iterations MS can stay in
% the carrier with bad CPICH EcIo
limitIFHO = 2; % plain - number of allowed IFHO after MS is
% put to outage

35 area_correction = [0]; % dB - 0 for urban,
% -3 for dense urban,
% 8 for suburban....

numMStype1 = 2000;
40 numMStype2 = 0;
numBStype1 = 57;
numBStype2 = 0;

%following values are from 3GPP 25.101 and 25.104 as of 10.6.2000
45 aciFilterUL = [65]; %channel offset 1,(BS selectivity), channel 2 not spec.
aciFilterDL = [33]; %channel offset 1,(MS selectivity), channel 2 not spec.
acpFilterDL = [45 50]; %channel offset 1, channel offset 2 (BS leakage)
acpFilterUL = [33 43]; %channel offset 1, channel offset 2 (MS leakage)

50 %following values are from "hat"
acMinPowUL = -55; %dBm <- JNu
acMinPowDL = -55; %dBm
acMinPowUL = -999; %dBm
acMinPowDL = -999; %dBm
55
%Espoo scenario:
msParamFile = 'MSparamEspoo.txt';
bsParamFile = 'BSparamEspoo.txt';
linklossFile = 'Espoo_ll'; % linkloss data file (.mat-file)
60 vectFile = ''; % vector building data (.mat-file)
mapFile = 'Espoo_map'; % name of the clutter map when exported
% from nps/x
waterAreaFile = 'Espoo_water'; % the variable in this .mat-file should be
% called waterArea,
65 % the filename can be anything

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% propagation related %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
pathlossModel = 7; % 1: Okumura Hata
                        % 2: UMTS pedestrian (micro)
71 deltaHb = 15; % (needed with 2) % 3: UMTS vehicular (macro)
                        % 4: UMTS vehicular with hb=15m, f=2000 MHz
                        % 5: OH with hb = 35 m
                        % 6: single slope model; slope = 40 dB/dec.
                        % 7: Linkloss data from nps/x
76                        % 8: Linkloss data from nps/x (vector data
                        % displayed)
useImportedAntennaInfo = 0; % 0: don't use antenna type/dir./tilt from
                        % NPSX, keep old (antenna in NPSX should
                        % have been isotropic)
81                        % 1: use antenna type/dir./tilt from NPSX

sigmaLogNorm = 7; % standard deviation for the log normal fading [dB]

sectCorr = 0.8; % fading correlation between sectors at same cell
siteCorr = 0.5; % fading correlation between sectors at different cell
86

%Names of the linkPerfTables definition files are given here without
%the .m extension In BS file the number in column 'channel' refers to
%these linkPerfTables.
channelFiles(1).name = 'vehALinkPerfTablesNew';
91 channelFiles(2).name = 'pedALinkPerfTablesNew';
channelFiles(3).name = 'twoTapLinkPerfTables';

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% coverage probability calculation, test probe definition %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
wideAreaCovR = 122000; % bits/s
96 wideAreaCovSpeed = 50; % km/h
wideAreaCovMsTxMax = 21; % dBm

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% common channel related %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
101 maxCPICHPower = 30; % dBm
CPICHPowerSwitch = 3; % 1 for fixed power CPICH
                        % 2 for changing power according to UL load
                        % 3 CPICH powers read from BS-file (for mixed cells)

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% LC related %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
106 loadControlSwitch = 3; % 1 for random choose of the MS:s to be thrown out
                        % 2 for MS with highest TX power at highly loaded
                        % cells to be thrown out
                        % 3 for random chose of MSs at highly loaded cells
reducePowerSwitch = 2; % 1 not used anymore
111 % 2 take randomly MSs out until BS TX power is
                        % small enough
                        % 3 take high power MSs out until BS TX power is
                        % small enough
116 % 4 take low power MSs out until BS TX power is
                        % small enough

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Common channel analysis %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
121 CPICHEcIoThreshold = -18; % default dB threshold for Ec/Io(wideband Io) for
                        % being able to measure CPICH channel
bchEbNo = 5; % Average Eb/No for the BCH channel
bchCpichOffset = 5; % difference in power between BCH and CPICH in dB
bchBitRate = 12200; % bits/s

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Downlink power allocation %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
126 limitDLPowerSwitch = 0; % 0: no limit for link powers in DL
pTxDLAbsMin = -999; % Maximum power per link in DL (dBm) 'soft'
                        % limit - not in SFS -> -999

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% hard blocking %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
131 hardBlocking = 0; % 0: no hard blocking used, 1: hard blocking used
basestationChannels = 172; % number of CHE in the base station pool

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Simulation mode %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
mode = 2;                                % 1: 2 Carriers
                                           % 2: 2 Operators
doInitialCarrierSelection = 0; % If mode == 1 and doInitialCarrierSelection
137                                     % equal 1 it is checked before the iteration
                                           % whether the MS can hear the CPICH channel
                                           % on the carrier indicated in the MS file.
                                           % If not, a carrier re-selection is made if
                                           % the second carrier can be heard.
142                                     % If mode == 1 and doInitialCarrierSelection
                                           % equal 2 MSs reselect the carrier with
                                           % highest CPICH Ec/Io

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%MS order method %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
147 %for random MS selection from the MS file
    randomizeMSfile = 0;
    usePrevRandStateInMsRead = 0;
    msReadDefRandState = 111;

```

**Figura A.4** Exemplo de ajuste de parâmetros no arquivo **npswini.m**.

```

1  %MAPINI   MAPINI defines the map parameters
2  %
3  %Inputs:
4  %Outputs:
5  %
6  %Authors: Achim Wacker (AWa), Kari Heiska (KHe), Kari Sipilä (KSi)
7  %
8  %Revision: 5.0.0web   Date: 17-Jul-2005
9  %
10 %needed m-files: none
11
12 if (~exist('mapFile') | pathlossModel <= 6)
13     mapFile = [];
14 end
15
16 if (~exist('waterAreaFile') | pathlossModel <= 6)
17     waterAreaFile = [];
18 end
19
20 if ((pathlossModel == 7)|(pathlossModel == 8))%The map generated from nps/x
21     load(linklossFile);                    % loads the linkloss-data
22     resolution = lossData(1).resolution;    % meters
23     area = lossData(1).area;
24     if (pathlossModel == 8)
25         load(vectFile);                    % loads the building vector info
26     else
27         vectMap = [];
28     end
29 else
30     resolution = 50;
31     area = 6500*[-1 1 -1 1]; % meters
32     lossData = [];
33     vectMap = [];
34 end
35 xmin = area(1);
36 xmax = area(2);
37 ymin = area(3);
38 ymax = area(4);

```

**Figura A.5** Exemplo de ajuste de parâmetros no arquivo **mapini.m**.

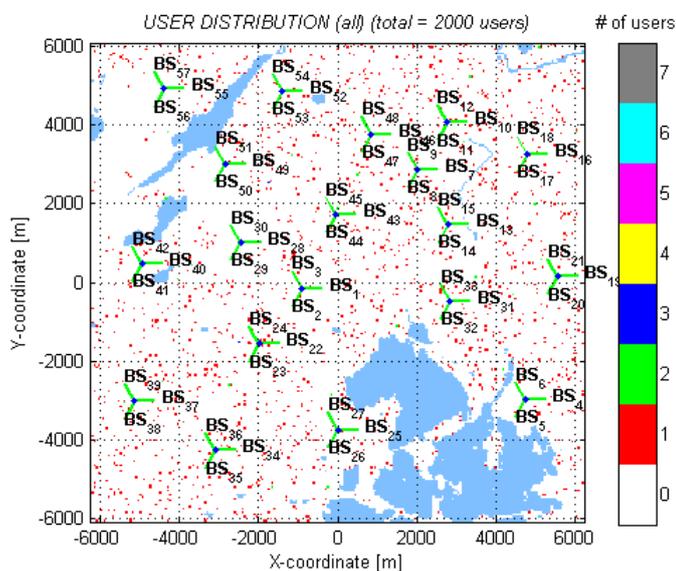


Figura A.6 Distribuição de usuários no mapa.

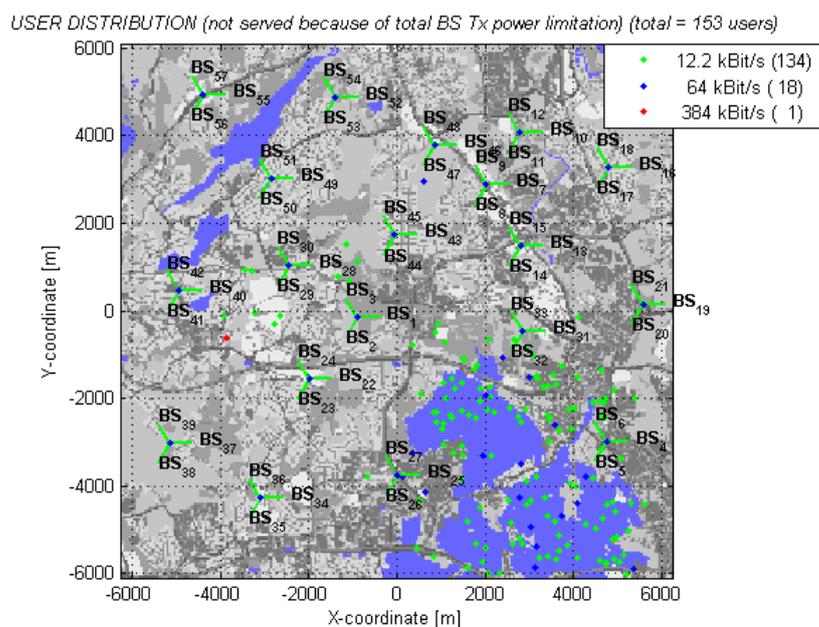
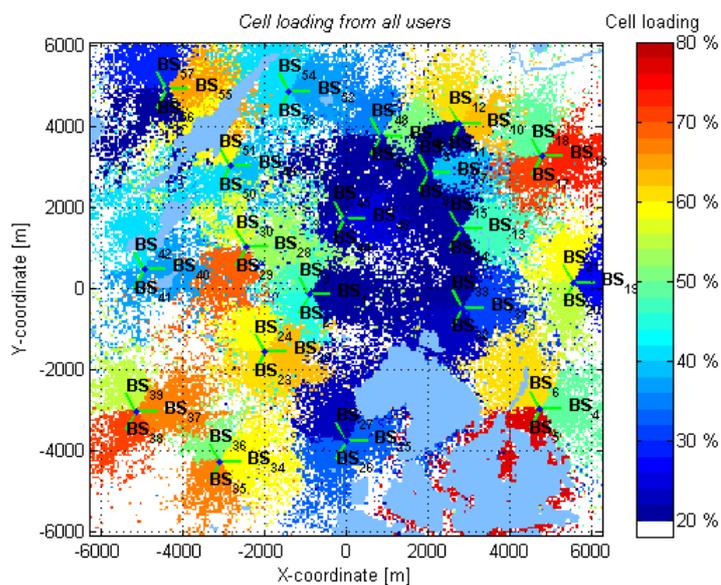
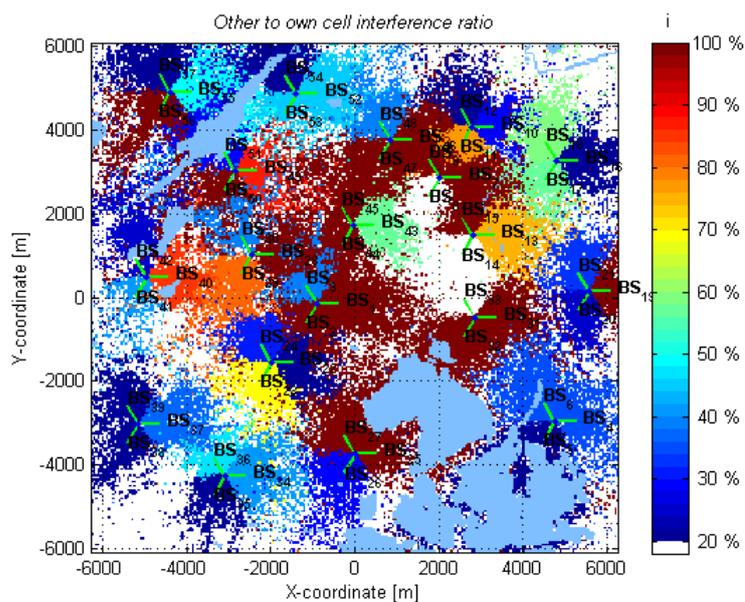


Figura A.7 Usuários bloqueados pela limitação da potência de transmissão da estação radiobase.



**Figura A.8** Carga nas células provocada por todos os usuários da rede.



**Figura A.9** Relação entre a interferência das outras células e a interferência da própria célula.

---

---

## Referências Bibliográficas

---

3GPP. *Physical Channels and Mapping of Transport Channels onto Physical Channels (FDD)*. [S.l.], Março 2006.

3GPP. *Services Provided by the Physical Layer*. [S.l.], Junho 2006.

3GPP. *User Equipment (UE) Radio Transmission and Reception (FDD)*. [S.l.], Setembro 2006.

3GPP. *Physical Layer – General Description*. [S.l.], Junho 2007.

ALENCAR, M. S. *Telefonia Celular Digital*. São Paulo: Érica, 2004.

ALENCAR, M. S.; ROCHA JR., V. C. *Communication Systems*. [S.l.]: Springer, 2005.

ANATEL. *Abril registra maior número de habilitações na telefonia celular*. Maio 2008. <http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalNoticias.do?acao=carregaNoticia&codigo=15932>. Visitado em 4 de Junho de 2008.

ANATEL. *Assinados os Termos de Autorização de 3G*. Abril 2008. <http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalNoticias.do?acao=carregaNoticia&codigo=15932>. Visitado em 23 de Maio de 2008.

AZIZ, A.; GAN, K.-C.; AHMED, I. *WCDMA Rake Receiver Comes to Life in DSP*. Novembro 2003. <http://www.eetimes.com/story/OEG20031119S0011>.

CORDIER, C.; ORTEGA, S. *On WCDMA Downlink Multiservice Coverage and Capacity*. 2001.

CORRÊA, R. J. de A. *Análise de Desempenho de Enlaces com Modulação Adaptativa Aplicada a Sistemas WCDMA/HSDPA*. Dissertação — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, Julho 2003.

ETSI. *Selection Procedures for the Choice of Radio Transmission Technologies of the Universal Mobile Telecommunication System UMTS (3G TR 101 112)*. [S.l.], Abril 1998.

ETSI. *Digital Cellular Telecommunications System (Phase 2+); Universal Mobile Telecommunications System (UMTS); Quality of Service (QoS) Concept and Architecture (3GPP TS 23.107 version 6.4.0 Release 6)*. [S.l.], Março 2006.

FREUDENTHALER, K. *et al.* Throughput analysis for a UMTS high speed downlink packet access LMMSE equalizer. Dresden, Alemanha, p. 19–23, Junho 2005.

FREUDENTHALER, K. *et al.* Update rate of channel estimation for UMTS-HSDPA in time-varying channels. Dresden, Alemanha, Maio 2006.

GSA. *Presentation from GSM → 3G CEE 2007*. 2007. <http://www.gsacom.com>. Visitado em 9 de Outubro de 2007.

GURJÃO, E. C. *Análise de Desempenho para um Sistema Multiportadora CDMA*. Dissertação — Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande, Brasil, Fevereiro 1999.

HAWWAR, Y. *et al.* 3G UMTS wireless system physical layer: Baseband processing hardware implementation perspective. *IEEE Communications Magazine*, v. 44, n. 9, p. 52–58, Setembro 2006.

HOLMA, H. *A Study of UMTS Terrestrial Radio Access Performance*. Tese — Helsinki University of Technology, Espoo, Finlândia, Outubro 2003.

HOLMA, H.; TOSKALA, A. *WCDMA for UMTS: Radio Access for Third Generation Mobile Communications*. 3a. ed. Londres: John Wiley & Sons, 2004.

HURTADO, A. F. C. *UMTS Capacity simulation study*. Dissertação — Faculty of Electrical Engineering, Mathematics and Computer Science – University of Twente, Maastricht, The Netherlands, Outubro 2005.

ITU. *Global Mobile Phone Users Top 3.3 Billion By End-2007*. Maio 2008. <http://www.itu.int/ITU-D/ict/newslog/Global+Mobile+Phone+Users+Top+33+Billion+By+End2007+.aspx>. Visitado em 4 de Junho de 2008.

KAARANEN, H. *et al.* *UMTS Networks: Architecture, Mobility and Services*. 2a. ed. Londres: John Wiley & Sons, 2005.

LÄHDEKORPI, P. *Effects of Repeaters on UMTS Network Performance*. Dissertação — Tampere University of Technology, Tampere, Finlândia, Fevereiro 2006.

LAIHO, J. *Radio Network Planning and Optimization for WCDMA*. Tese — Helsinki University of Technology, Espoo, Finlândia, Julho 2002.

LAIHO, J.; WACHER, A.; NOVOSAD, T. *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS*. 2a. ed. Londres: John Wiley & Sons, 2005.

LAIHO, J.; WACKER, A.; NOVOSAD, T. *Radio Network Planning and Optimisation for UMTS – Supplementary Material*. 2005. <http://www.wiley.com/go/laiho/>. Visitado em 10 de maio de 2007.

---

LEIBNITZ, K.; KRAUB, A. *Performance Evaluation of Interference and Cell Loading in UMTS Networks*. Würzburg, Alemanha, February 2001.

LESCUYER, P. *UMTS: Origins, Architecture and the Standard*. [S.l.]: Springer, 2002.

MATALGAH, M. *et al.* Throughput and spectral efficiency analysis in 3G FDD WCDMA cellular systems. *Global Telecommunications Conference, 2003. GLOBECOM '03. IEEE*, v. 6, p. 3423–3426 vol.6, Dezembro 2003.

MEYR, H.; MOENECLAHEY, M.; FECHTEL, S. A. *Digital Communication Receivers*. New York, USA: Wiley, 1998.

MOSTARDEIRO, M. *Sistema WCDMA: Planejamento de Sistemas Celulares de Terceira Geração*. Dissertação — Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil, Dezembro 2003.

NAWROCKI, M. J.; DOHLER, M.; AGHVAMI, A. H. *Understanding UMTS Radio Network Modelling, Planning and Automated Optimisation*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2006.

NIEMELÄ, J. *Aspects of Radio Network Topology Planning in Cellular WCDMA*. Tese — Tampere University of Technology, Tampere, Finlândia, Setembro 2006.

PORTELA, J. do N. *Planejamento Celular Usando Diagramas de Voronoi*. Tese — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, Março 2006.

RIBEIRO, L.; DASILVA, L. Traffic engineering for wireless mobile networks supporting heterogeneous traffic. *Wireless Communications and Networking Conference, 2005 IEEE*, v. 2, p. 1161–1167 Vol. 2, Março 2005. ISSN 1525-3511.

RIBEIRO, L. Z. *Traffic Dimensioning for Multimedia Wireless Networks*. Tese — Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Virgínia, EUA, Abril 2003.

ROCHA, J. *et al.* A Physical Layer Performance Simulation System for UMTS. *Microwave and Optoelectronics Conference, 2007. IMOC 2007.*, Outubro 2007.

RODRIGUES, E. J. B. *Um Estudo do Aumento da Capacidade de Sistemas 3G WCDMA Usando Técnicas 3.5G de Expansão do Enlace Reverso*. Dissertação — Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil, Dezembro 2005.

SIMON, M. K.; ALOUINI, M.-S. *Digital Communication over Fading Channels*. New York, USA: Wiley, 2000.

SIOMINA, I. *Radio Network Planning and Resource Optimization: Mathematical Models and Algorithms for UMTS, WLANs, and Ad Hoc Networks*. Dissertação — Institutionen för Teknik och Naturvetenskap, Linköping, Suécia, Outubro 2007.

---

SOLDANI, D. *QoS Management in UMTS Terrestrial Radio Access FDD Networks*. Tese — Helsinki University of Technology, Espoo, Finlândia, Outubro 2005.

TSILIMANTOS, D.; TSOULOS, G.; KAKLAMANI, D. Radio Network Planning for UMTS with Smart Antennas. *Electromagnetics in Advanced Applications, 2007. ICEAA 2007. International Conference on*, p. 415–418, Setembro 2007.

WACHER, A. *et al.* *NPSW – Matlab Implementation of a Static Radio Network Planning Tool for Wideband CDMA*. [S.l.], 2006.

WACKER, A. *et al.* Static simulator for studying WCDMA radio network planning issues. *Vehicular Technology Conference, 1999 IEEE 49th*, v. 3, p. 2436–2440 vol.3, Julho 1999.

WALKE, B.; SEIDENBERG, P.; ALTHOFF, M. P. *UMTS: The Fundamentals*. Londres: Wiley, 2003.

WEHINGER, J. *et al.* Adaptive minimum bit error rate space-time rake receiver for the uplink of UMTS frequency division duplex mode. Darmstadt, Alemanha, Dezembro 2003.

YACOUB, M. D. *Foundations of Mobile Radio Engineering*. [S.l.]: CRC Press, 1993.

ZHOU, M.; TU, G.; LIANG, S. Interference Analysis between Macro WCDMA and Macro WIMAX Coexisted in Adjacent Frequency Band. *Wireless Communications, Networking and Mobile Computing, 2007. WiCom 2007. International Conference on*, p. 910–913, Setembro 2007.