

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**METODOLOGIA DE CÁLCULO DE ESPECTRO PARA  
SUPPORTAR A EVOLUÇÃO DO SISTEMA MÓVEL  
CELULAR**

**ESDRAS SIMÕES DA SILVA**

**ORIENTADOR: ANTÔNIO JOSÉ MARTINS SOARES**

**CO-ORIENTADOR: FLÁVIO LIMA**

**CO-ORIENTADOR: ORLANDO TADEU RUSCHEL**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONALIZANTE EM  
ENGENHARIA ELÉTRICA**

**PUBLICAÇÃO: PPGENE.DM - 040/07**

**BRASÍLIA/DF: OUTUBRO – 2007**

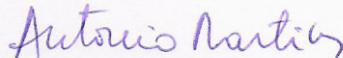
**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA  
FACULDADE DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE ESPECTRO PARA  
SUPPORTAR A EVOLUÇÃO DO SISTEMA MÓVEL CELULAR**

**ESDRAS SIMÕES DA SILVA**

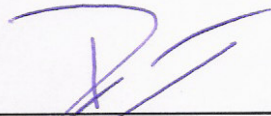
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO PROFISSIONALIZANTE SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:



---

ANTÔNIO JOSÉ MARTINS SOARES, Dr, ENE/UNB  
(ORIENTADOR)



---

PAULO HENRIQUE PORTELA DE CARVALHO, Dr., ENE/UNB  
(EXAMINADOR INTERNO)



---

PRISCILA AMÉRICA SOLÍS MENDEZ BARRETO, Dr<sup>a</sup>, CIC/UNB  
(EXAMINADORA INTERNA)

BRASÍLIA, 29 DE OUTUBRO DE 2007.

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

SILVA, ESDRAS SIMÕES DA

Metodologia de Cálculo de Espectro para Suportar a Evolução do Sistema Móvel Celular  
[Distrito Federal] 2007.

xix, 90p., 210 x 297 mm (ENE/FT/UnB, Mestre, Dissertação de Mestrado – Universidade de  
Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

1. Metodologia de cálculo

2. Capacidade do sistema

3. Cálculo de espectro

4. Sistemas móveis 3G

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

## **REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA**

SILVA, ESDRAS SIMÕES DA (2007). Metodologia de Cálculo de Espectro para Suportar a Evolução do Sistema Móvel Celular. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM – 040/07, Departamento Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 90p.

## ***CESSÃO DE DIREITOS***

AUTOR: Esdras Simões da Silva.

TÍTULO: Metodologia de Cálculo de Espectro para Suportar a Evolução do Sistema Móvel Celular

GRAU: Mestre      ANO: 2007

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

---

Esdras Simões da Silva

Quadra 203, Lote 07, Apartamento 808, Águas Claras.

71.939-360 Brasília – DF – Brasil.

Dedico este trabalho à minha mãe, Eunice, que não mediu esforços para proporcionar educação aos filhos.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço a DEUS por tudo o que ELE tem me proporcionado.

Agradeço também à minha amada esposa, Luciana, pelo apoio, incentivo e compreensão me concedidos durante toda essa jornada.

Agradeço ao meu orientador e incentivador, Prof. Dr. Antônio José Martins, que tranqüilamente norteou os rumos desse trabalho, com muita dedicação e sabedoria.

Ao meu amigo e gerente, Ivo Celso, pela oportunidade concedida.

Aos meus co-orientadores e mestres, Flávio Lima e Orlando Tadeu Ruschel.

A todos os professores e colegas do mestrado que me ajudaram, de alguma forma, a desenvolver meus conhecimentos que resultaram na realização deste trabalho.

Sinceramente, muito obrigado!

## **RESUMO**

### **METODOLOGIA DE CÁLCULO DE ESPECTRO PARA SUPORTAR A EVOLUÇÃO DO SISTEMA MÓVEL CELULAR**

**Autor: Esdras Simões da Silva**

**Orientador: Antônio José Martins Soares**

**Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica**

**Brasília, outubro de 2007.**

Este trabalho apresenta uma metodologia para calcular a quantidade estimada de espectro requerido para a evolução dos sistemas 3G e pós-3G, que são baseados nas recomendações da ITU-R. Por meio de uma abordagem sistemática, a metodologia proposta incorpora: definições de categorias de serviço; ambientes de serviço; ambientes rádio; análise de dados do mercado e estimativa de tráfego para essas categorias e ambientes; distribuição do tráfego entre os grupos de tecnologia de acesso rádio (RATGs); cálculo da capacidade requerida pelo sistema e da necessidade de espectro resultante. O texto contempla um breve histórico dos sistemas móveis, abordando-se a crescente demanda do mercado por comunicações sem fio, as conseqüentes mudanças do perfil de tráfego e a importância do espectro radioelétrico. Na apresentação do escopo e etapas da metodologia, serão definidos os tipos de serviço, classes de tráfego, categorias de serviço, ambientes de serviço e ambientes rádio, juntamente com os respectivos parâmetros de entrada para os cálculos propostos. Também serão definidos os grupos de tecnologia de acesso rádio e será discutida a relação entre eles, os ambientes de serviço e ambientes rádio. Propõe-se uma sistemática para obtenção da demanda de mercado e um processo para a distribuição do tráfego entre os diferentes grupos de tecnologia de acesso e entre os ambientes rádio internos a eles. O cálculo da capacidade requerida pelo sistema será realizado por meio de dois algoritmos distintos: um para a determinação da capacidade das categorias de serviço comutadas por circuito; e outro para as categorias comutadas por pacote. A partir de considerações práticas obtidas de redes já em operação, será possível realizar o cálculo da necessidade de espectro e a aplicação de ajustes necessários. A ferramenta utilizada para a simulação de cenários será validada por meio de uma aplicação prática à rede da Brasil Telecom. Os resultados da simulação de cenários considerando o uso de tecnologia 3G mostram os efeitos da variação de alguns dos principais parâmetros de entrada sobre a necessidade de espectro.

## **ABSTRACT**

### **METHODOLOGY FOR CALCULATION OF SPECTRUM REQUIREMENTS ESTIMATION FOR THE FUTURE DEVELOPMENT OF CELL MOBILE SYSTEM.**

**Author: Esdras Simões da Silva**

**Supervisor: Antônio José Martins Soares**

**Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica**

**Brasília, October of 2007.**

This work presents a methodology for calculation of spectrum requirement estimation for future development of 3G and beyond-3G systems based on ITU-R recommendations. It presents a systematic approach that incorporates service category definitions, service environments, radio environments, market data analysis and traffic estimation for these categories and environments, traffic distribution among radio access technique groups (RATGs), required system capacity calculation and resultant spectrum requirement determination. The work accommodates a brief historic of mobile systems and addresses an approaching about the increasing market expectations for wireless communications, as well as consequential change of traffic profile and spectrum relevancy. On the presentation of the scope and steps of the methodology it will be defined service types, traffic classes, service categories, service environments, radio environments and related input parameters for the proposed calculation. In addition, it will be defined radio access technique group and discussed the relationship among service environments, RATGs and radio environments. Furthermore, it is proposed a systematic for collecting market expectations and a process for distribution of traffic among radio access techniques and among radio environments within each RATG. System required capacity calculation will be made by using two separate algorithms for packet-switched and circuit switched service categories, respectively. Moreover, it will be possible to make the spectrum requirement calculation and to apply the necessary adjustments taking into account practical network deployments. The tool used for simulating sceneries implements the proposed methodology and it will be evaluated after a practical application on Brasil Telecom's network. Finally, the results of sceneries simulation take into account the use of 3G technology present the effects of the variation of some main input parameters on the spectrum requirements.

# SUMÁRIO

<b>1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 – METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE ESPECTRO .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2 – ESCOPO E ETAPAS DA METODOLOGIA .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3 – DEFINIÇÕES E ASPECTOS TÉCNICOS.....</b>	<b>11</b>
<b>2.3.1 - Tipos de serviço.....</b>	<b>11</b>
<b>2.3.2 - Classes de tráfego .....</b>	<b>13</b>
<b>2.3.3 - Parâmetros das categorias de serviço .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3.4 - Ambiente de Serviço.....</b>	<b>18</b>
<b>2.3.5 - Ambiente Rádio .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4 – GRUPOS DE TECNOLOGIA DE ACESSO RÁDIO .....</b>	<b>22</b>
<b>2.5 – RELAÇÃO ENTRE AMBIENTES DE SERVIÇO, RATGS E AMBIENTES RÁDIOS.....</b>	<b>25</b>
<b>3 – DEMANDA DE MERCADO, TRÁFEGO, CAPACIDADE DO SISTEMA E NECESSIDADE DE ESPECTRO.....</b>	<b>27</b>
<b>3.1 – INTRODUÇÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>3.2 – DEMANDA DE MERCADO.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2.1 - Aplicações, serviços e respectivos atributos de tráfego.....</b>	<b>29</b>
<b>3.2.2 - Cálculo dos valores dos atributos de mercado.....</b>	<b>30</b>
<b>3.3 – DISTRIBUIÇÃO DO TRÁFEGO.....</b>	<b>36</b>
<b>3.3.1 - Frações de distribuição de tráfego .....</b>	<b>37</b>
<b>3.3.2 - Distribuição das taxas de chegada de sessões.....</b>	<b>41</b>
<b>3.3.3 - Cálculo do tráfego oferecido.....</b>	<b>42</b>
<b>3.4 – CÁLCULO DA CAPACIDADE REQUERIDA PELO SISTEMA .....</b>	<b>44</b>
<b>3.4.1 - Cálculo da capacidade requerida pelo sistema para o tráfego comutado por circuito .....</b>	<b>44</b>
<b>3.4.2 - Cálculo da capacidade requerida pelo sistema para o tráfego comutado por pacotes .....</b>	<b>47</b>
<b>3.5 – CÁLCULO DA NECESSIDADE DE ESPECTRO.....</b>	<b>50</b>



3.5.1 -	Aplicação de ajustes a partir de considerações práticas .....	51
3.5.2 -	Cálculo da necessidade total de espectro .....	53
4 -	FERRAMENTA PARA SIMULAÇÃO DA METODOLOGIA .....	56
4.1 -	INTRODUÇÃO .....	56
4.2 -	EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA FERRAMENTA.....	56
4.2.1 -	Área da célula ou setor .....	58
4.2.2 -	Parâmetros rádio para o RATG1 .....	59
4.2.3 -	Parâmetros das categorias de serviço .....	60
4.2.4 -	Distribuição do tráfego entre RATGs e percentual de cobertura da população.....	65
4.2.5 -	Necessidade de espectro resultante da simulação.....	67
5 -	SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS COM TECNOLOGIA 3G .....	69
5.1 -	INTRODUÇÃO .....	69
5.2 -	VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ESPECTRAL .....	70
5.3 -	VARIAÇÃO DO RAIO DA CÉLULA .....	74
5.4 -	VARIAÇÃO DA TAXA DE BIT MÉDIA.....	76
5.5 -	VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE USUÁRIOS.....	79
6 -	CONCLUSÕES.....	83
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Subfaixas de frequências da banda “E”.....	5
Tabela 2.1 – Categorização dos serviços.....	12
Tabela 2.2 – Tipos de serviço e suas taxas de bit.....	12
Tabela 2.3 – Mapeamento das classes de mobilidade.....	17
Tabela 2.4 – Valores típicos de $J_m$ para o mapeamento das classes de mobilidade em diferentes ambientes de serviço.....	18
Tabela 2.5 – Parâmetros das categorias de serviço usados como entrada no algoritmo de cálculo de espectro.....	18
Tabela 2.6 – Ambientes de serviço.....	19
Tabela 2.7 – Exemplos de grupos de usuários e aplicações típicas do ambiente de serviço (SE).....	19
Tabela 2.8 – Valores típicos da área máxima da célula por ambiente rádio em km <sup>2</sup> .....	21
Tabela 2.9 – Exemplo do percentual de cobertura da população por ambiente rádio em cada ambiente de serviço.....	21
Tabela 2.10 – Exemplos dos parâmetros rádio para o RATG1 [10].....	22
Tabela 2.11 – Exemplos dos parâmetros rádio para o RATG2 [10].....	23
Tabela 2.12 – Exemplos dos parâmetros rádio para o RATG3 [10].....	24
Tabela 2.13 – Exemplos dos parâmetros rádio para o RATG4 [10].....	24
Tabela 2.14 – Exemplo da matriz de eficiência espectral por ambiente rádio para o RATG2.....	25
Tabela 3.1 – Exemplos de aplicações e de serviços e seus atributos de tráfego [9].....	30
Tabela 3.2 – Exemplos de respostas ao questionário sobre mercado e serviços [9].....	31
Tabela 3.3 – Mapeamento dos serviços dentro das categorias.....	32
Tabela 3.4 – Atributos de mercado por categoria/ambiente de serviço.....	34
Tabela 3.5 – Exemplo das possíveis combinações entre SC, SE e RE para cada RATG e intervalo de tempo após a fase 1 da distribuição de tráfego.....	38
Tabela 3.6 – Exemplo das frações de distribuição do tráfego entre os RATGs disponíveis.....	39
Tabela 3.7 – Mapeamento das classes de mobilidade de acordo com o ambiente rádio.....	40
Tabela 4.1 – Raio médio das células da rede móvel da BrT GSM.....	58
Tabela 4.2 – Área do setor da célula, em km <sup>2</sup> , da rede móvel da BrT GSM.....	58
Tabela 4.3 – Parâmetros rádio para a rede móvel da BrT GSM.....	59

Tabela 4.4 – Eficiência espectral por ambiente rádio para o RATG1 [bit/(s · Hz · célula)]. .....	60
Tabela 4.5 – Categorias de serviço consideradas na simulação. ....	61
Tabela 4.6 – Faixas de mobilidade para distribuição do tráfego. ....	62
Tabela 4.7 – Parâmetros das categorias de serviço. ....	63
Tabela 4.8 – Parâmetros adicionais das categorias de serviço comutadas por pacotes. ....	66
Tabela 4.9 – Percentuais de distribuição do tráfego entre RATGs da simulação. ....	66
Tabela 4.10 – Percentual de cobertura da população na rede simulada. ....	67
Tabela 4.11 – Capacidade calculada para a rede GSM da BrT. ....	67

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Etapas da metodologia de cálculo de espectro.....	10
Figura 2.2 – Distribuição da demanda de tráfego entre ambientes de serviço, RATGs e ambientes rádio [8].....	26
Figura 3.1 – Processo de análise dos dados de mercado. ....	28
Figura 4.1 – Planilha principal da ferramenta de cálculo de espectro.....	57
Figura 4.2 – Necessidade de espectro GSM por ambiente rádio e classe de teledensidade.	68
Figura 4.3 – Necessidade de espectro GSM por classe de teledensidade.....	68
Figura 5.1 – Necessidade de espectro 3G por ambiente rádio e classe de teledensidade....	70
Figura 5.2 – Necessidade de espectro 3G por classe de teledensidade. ....	70
Figura 5.3 – Necessidade de espectro versus variação da eficiência espectral em bit/(s·Hz·célula). (a) Macro-célula. (b) Micro-célula. (c) Total .....	72
Figura 5.4 – Necessidade de espectro versus variação percentual da eficiência espectral..	72
Figura 5.5 – Efeitos da variação da eficiência espectral no cálculo do espectro.....	73
Figura 5.6 – Estimativa do aumento da eficiência espectral. (a) RATG1. (b) RATG2. ....	74
Figura 5.7 – Efeitos da variação do tamanho da célula no cálculo do espectro, por ambiente rádio. (a) Macro-célula. (b) Micro-célula. ....	75
Figura 5.8 – Efeitos da variação do tamanho da célula no cálculo do espectro.....	76
Figura 5.9 – Efeitos da variação percentual da taxa de bit média da categoria de serviço, por ambiente rádio. (a) Macro-célula. (b) Micro-célula. ....	77
Figura 5.10 – Efeitos da variação da taxa de bit média da categoria de serviço. ....	78
Figura 5.11 – Necessidade de espectro em função da taxa de bit média.....	78
Figura 5.12 – Necessidade de espectro versus densidade de usuário por classe de teledensidade e ambiente rádio. (a) Macro-célula. (b) Micro-célula. ....	80
Figura 5.13 – Necessidade de espectro versus densidade de usuário por classe de teledensidade.....	81
Figura 5.14 – Necessidade total de espectro em função da densidade de usuário. ....	81

## LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURAS E ABREVIACÕES

Símbolo	Descrição	Unidade
$P'_{m,t,n, rat, p}$	A taxa de chegada de sessões, por célula, da categoria de serviço $n$ , em um ambiente de serviço $m$ , distribuída no RATG $rat$ , dentro do ambiente de rádio $p$ , no intervalo de tempo $t$	[sessões/(s · célula)]
$\bar{w}_{m,t,s}$	Peso ponderador para a taxa de bit média ou razão de mobilidade do serviço $s$ , no ambiente de serviço $m$ e intervalo de tempo $t$	–
$\lambda_{\leq N_{ps}}$	Taxa de chegada de pacotes agrupada para todas as categorias de serviço	[pacotes/s]
$\mathbf{v}$	Vetor com o número de canais requeridos pelas categorias de serviço comutadas por circuito [ $\mathbf{v} \equiv (v_1, v_2, \dots, v_{N_{cs}})$ ]	–
$\rho_{d,t,n, rat, p}$	Tráfego oferecido por célula para a categoria de serviço $n$ , na teledensidade $d$ , intervalo de tempo $t$ , RATG $rat$ e ambiente rádio $p$	Erlang/célula
$\xi_{hs}$	Razão de distribuição intermediária do tráfego para o ambiente rádio <i>hot-spot</i>	–
$\xi_{macro}$	Razão de distribuição intermediária do tráfego para o ambiente rádio macro-célula	–
$\xi_{micro}$	Razão de distribuição intermediária do tráfego para o ambiente rádio micro-célula	–
$\mathbf{v}_n$	Número de canais requeridos simultaneamente pela categoria de serviço $n$ , comutada por circuitos	–
$\xi_{pico}$	Razão de distribuição intermediária do tráfego para o ambiente rádio pico-célula	–
$\xi_{pico\&hs}$	Razão de distribuição intermediária do tráfego para os ambientes rádio pico-célula e <i>hot-spot</i>	–
1G	Primeira geração	–
2G	Segunda geração	–
3G	Terceira geração	–
$A_{d,p}$	Área da célula [ $\text{km}^2$ ] do RATG $rat$ , com teledensidade $d$ e no ambiente rádio $p$ .	$\text{km}^2$
ANUF	Área de Numeração Fechada	–
AMPS	<i>Advanced Mobile Phone System</i>	–
AoD	<i>Audio on demand</i>	–
BER	<i>Bit error ratio</i>	–

$b_n$	Coeficiente do termo de segundo grau da equação cúbica	–
$B_n$	Probabilidade de bloqueio da categoria de serviço, $n$ , comutada por circuito	–
CBW	<i>Carrier bandwidth</i>	–
$C_{d,t,rat,p}$	Capacidade requerida pelo sistema na teledensidade $d$ , intervalo de tempo $t$ , RATG $rat$ e ambiente rádio $p$	[bit/(s·célula)]
$C_{d,t,rat,p,cs}$	Capacidade requerida pelo sistema, para atender ao tráfego comutado por circuito, na teledensidade $d$ , intervalo de tempo $t$ , RATG $rat$ e ambiente rádio $p$	[bit/(s·célula)]
$C_{d,t,rat,p,cs,DL}$	Capacidade requerida pelo sistema, para atender ao tráfego comutado por circuito no <i>downlink</i> , na teledensidade $d$ , intervalo de tempo $t$ , RATG $rat$ e ambiente rádio $p$	[bit/(s·célula)]
$C_{d,t,rat,p,cs,UL}$	Capacidade requerida pelo sistema, para atender ao tráfego comutado por circuito no <i>uplink</i> , na teledensidade $d$ , intervalo de tempo $t$ , RATG $rat$ e ambiente rádio $p$	[bit/(s·célula)]
$C_{d,t,rat,p,ps}$	Capacidade requerida pelo sistema, para atender ao tráfego comutado por pacotes, na teledensidade $d$ , intervalo de tempo $t$ , RATG $rat$ e ambiente rádio $p$	[bit/(s·célula)]
$C_{d,t,rat,p,ps,DL}$	Capacidade requerida pelo sistema, para atender ao tráfego comutado por pacotes no <i>downlink</i> , na teledensidade $d$ , intervalo de tempo $t$ , RATG $rat$ e ambiente rádio $p$	[bit/(s·célula)]
$C_{d,t,rat,p,ps,UL}$	Capacidade requerida pelo sistema, para atender ao tráfego comutado por pacotes no <i>uplink</i> , na teledensidade $d$ , intervalo de tempo $t$ , RATG $rat$ e ambiente rádio $p$	[bit/(s·célula)]
CDMA	<i>Code Division Multiple Access</i>	–
$c_n$	Coeficiente do termo de primeiro grau da equação cúbica	–
CS	<i>Circuit switching</i>	–
$d$	Indicador de Teledensidade	–
D-AMPS	<i>Digital AMPS</i>	–
DECT	<i>Digital Enhanced Cordless Telecommunications</i>	–
$D_n$	Atraso médio do pacote para a categoria de serviço $n$	[s/pacote]
$d_n$	Coeficiente constante da equação cúbica	–
EDGE	<i>Enhanced Data rates for GSM Evolution</i>	–
ETSI	<i>European Telecommunications Standards Institute</i>	–
$F$	Necessidade total de espectro para todos os RATGs	Hz

FCFS	<i>First come first served</i>	–
$F_{d,FSU}$	Necessidade de espectro para RATGs que utilizam esquema FSU e com teledensidade $d$	Hz
$F_{d,rat}$	Necessidade de espectro para o RATG $rat$ com teledensidade $d$	Hz
$F_{d,rat,nonFSU}$	Necessidade de espectro para o RATG $rat$ sem esquema FSU e com teledensidade $d$	Hz
$F_{d,t,FSU}$	Necessidade de espectro para RATGs que utilizam esquema FSU e com teledensidade $d$ e no intervalo de tempo $t$	Hz
$F_{d,t,rat}$	Necessidade de espectro para o RATG $rat$ com teledensidade $d$ e no intervalo de tempo $t$	Hz
$F_{d,t,rat,p}$	Necessidade de espectro para o RATG $rat$ com teledensidade $d$ , ambiente rádio $p$ e no intervalo de tempo $t$	Hz
$F_{d,t,rat,p,mm}$	Necessidade de espectro para o tráfego <i>multicast</i> no RATG $rat$ , com teledensidade $d$ , ambiente rádio $p$ e no intervalo de tempo $t$	Hz
$F_{FSU}$	Necessidade de espectro para os RATGs com esquema FSU	Hz
$F_{rat}$	Necessidade de espectro para o RATG $rat$	Hz
$F_{rat,nonFSU}$	Necessidade de espectro para o RATG $rat$ sem esquema FSU	Hz
FSU	<i>Flexible spectrum usage</i>	–
$FSU_{marg}$	Margem de imperfeição FSU (multiplicador)	–
FTTH	<i>Fibre-to-the-home</i>	–
$G$	Função intermediária para calcular a probabilidade de bloqueio	
GPRS	<i>General Packet Radio Service</i>	–
$G_{rat}$	Banda de guarda, entre operadoras, para o RATG $rat$	Hz
GSM	<i>Global System for Mobile Communication</i>	–
HM	<i>High Mobility</i>	–
HSDPA	<i>High Speed Downlink Packet Access</i>	–
HSUPA	<i>High Speed Uplink Packet Access</i>	–
$i$	Vetor de estado do sistema no cálculo da capacidade para atender ao tráfego comutado por circuito	–
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>	–
$i_m$	Número de chamadas da classe $m$ , comutada por circuito, ocupando os canais	–

IMT-2000	<i>International Mobile Telecommunications-2000</i>	–
IMS	<i>Interactive Multimedia Service</i>	–
IP	<i>Internet Protocol</i>	–
ITU-R	<i>International Telecommunication Unit Radiocommunication Sector</i>	–
$J_m$	Parâmetro para o mapeamento das classes de mobilidade	–
$k$	Indicador de Canal no cálculo da capacidade para atender ao tráfego comutado por circuito	–
LAN	<i>Local area network</i>	–
LBS	<i>Location Based Services</i>	–
LM	<i>Low Mobility</i>	–
$m$	Indexador para ambiente de serviço	–
$MinSpec_{rat,p}$	Largura de banda mínima requerida pelo RATG $rat$ no ambiente rádio $p$	Hz
MMS	<i>Multimedia Message Service</i>	–
$MR_{hm_{m,t,n}}$	Razão de mobilidade da classe alta mobilidade para a categoria de serviço $n$ , no ambiente de serviço $m$ e intervalo de tempo $t$ (mobilidade calculada na metodologia)	%
$MR_{lm_{m,t,n}}$	Razão de mobilidade da classe baixa mobilidade para a categoria de serviço $n$ , no ambiente de serviço $m$ e intervalo de tempo $t$ (mobilidade calculada na metodologia)	%
$MR_{market\_hm_{m,t,n}}$	Razão de mobilidade da classe alta mobilidade para a categoria de serviço $n$ , no ambiente de serviço $m$ e intervalo de tempo $t$ (mobilidade demandada pelo mercado)	%
$MR_{market\_lm_{m,t,n}}$	Razão de mobilidade da classe baixa mobilidade para a categoria de serviço $n$ , no ambiente de serviço $m$ e intervalo de tempo $t$ (mobilidade demandada pelo mercado)	%
$MR_{market\_shm_{m,t,n}}$	Razão de mobilidade da classe <i>super-high mobility</i> para a categoria de serviço $n$ , no ambiente de serviço $m$ e intervalo de tempo $t$ (mobilidade demandada pelo mercado)	%
$MR_{market\_sm_{m,t,n}}$	Razão de mobilidade da classe mobilidade estacionária para a categoria de serviço $n$ , no ambiente de serviço $m$ e intervalo de tempo $t$ (mobilidade demandada pelo mercado)	%
$MR_{market_m,s}$	Razão de mobilidade do serviço $s$ no ambiente de serviço $m$ (mobilidade demandada pelo mercado)	%



$MR_{market_{m,t,n}}$	Razão de mobilidade da categoria de serviço $n$ , no ambiente de serviço $m$ e intervalo de tempo $t$ (mobilidade demandada pelo mercado)	%
$MR_{sm_{m,t,n}}$	Razão de mobilidade da classe mobilidade estacionária para a categoria de serviço $n$ , no ambiente de serviço $m$ e intervalo de tempo $t$ (mobilidade calculada na metodologia)	%
$n$	Indexador para categoria de serviço	–
$N$	Número total de categorias de serviço	–
$N_{cs}$	Número de categorias de serviço comutadas por circuito	–
NMT	<i>Nordic Mobile Telephone</i>	–
$N_o$	Número de operadoras	–
$N_{ps}$	Número de categorias de serviço comutadas por pacotes	–
OFDMA	<i>Orthogonal Frequency Division Multiple Access</i>	–
$P$	Função de distribuição da probabilidade de ocorrer o estado de equilíbrio ( <i>steady-state probability mass function</i> )	
$p$	Indexador para ambiente rádio	–
PAN	<i>Personal area network</i>	–
PDC	<i>Personal Digital Communication</i>	–
$P_{m,t,n, rat,p}$	A taxa de chegada de sessões por área de uma categoria de serviço $n$ , em um ambiente de serviço $m$ , distribuída no RATG $rat$ , dentro do ambiente de rádio $p$ , no intervalo de tempo $t$	[sessões/(s · km <sup>2</sup> )]
PS	<i>Packet switching</i>	–
$Q_{m,t,n}$	Taxa de chegada de sessões por usuário para a categoria de serviço $n$ , no ambiente de serviço $m$ e intervalo de tempo $t$	[sessões/(s·usuário)]
$Q_{m,t,s}$	Taxa de chegada de sessões por usuário para o serviço $s$ , no ambiente de serviço $m$ e intervalo de tempo $t$	[sessões/(s·usuário)]
QoS	<i>Quality of service</i>	–
$r$	Taxa de dados unitária, do serviço, por canal, utilizada para o cálculo da capacidade para o tráfego comutado por circuito	[bit/s]
RAN	<i>Radio access network</i>	–
$rat$	Indexador para RATG	–
RAT	<i>Radio access technique</i>	–
RATG	<i>Radio access technique group</i>	–

$r_{d,t,n,rat,p}$	Taxa de bit média do serviço da categoria $n$ , na teledensidade $d$ , intervalo de tempo $t$ , RATG $rat$ e ambiente rádio $p$	[bit/s]
RE	<i>Radio environment</i>	–
$r_{m,t,n}$	Taxa de bit média do serviço da categoria $n$ , no ambiente de serviço $m$ e intervalo de tempo $t$	[bit/s]
$r_{m,t,s}$	Taxa de bit média do serviço $s$ , no ambiente de serviço $m$ e intervalo de tempo $t$	[bit/s]
$s$	Indexador para serviço	–
SC	<i>Service category</i>	–
SE	<i>Service environment</i>	–
SG-8	<i>Study Group - 8</i>	–
SM	<i>Stationary/Pedestrian Mobility</i>	–
SMP	Serviço Móvel Pessoal	–
SMS	<i>Short message service</i>	–
$s_n$	Média da distribuição do tamanho do pacote IP, para a categoria de serviço $n$	[bit/pacote]
$s_n^{(2)}$	Segundo momento da distribuição do tamanho do pacote IP, para a categoria de serviço $n$	[bit <sup>2</sup> /pacote]
$t$	Indexador para intervalo de tempo	–
TACS	<i>Total Access Communication System</i>	–
$T_{d,t,n,rat,p}$	Tráfego oferecido à categoria de serviço $n$ , no RATG $rat$ , ambiente rádio $p$ , teledensidade $d$ e intervalo de tempo $t$ .	[bit/(s · célula)]
UIT	União Internacional de Telecomunicações	–
$U_{m,t,n}$	Densidade de usuário da categoria de serviço $n$ , no ambiente de serviço $m$ e intervalo de tempo $t$	[usuários/km <sup>2</sup> ]
$U_{m,t,s}$	Densidade de usuário do serviço $s$ , no ambiente de serviço $m$ e intervalo de tempo $t$	[usuários/km <sup>2</sup> ]
UMTS	<i>Universal Mobile Telecommunication System</i>	–
UWC-136	<i>Universal Wireless Communication-136</i>	–
VoD	<i>Video on demand</i>	–
VoIP	<i>Voice over Internet Protocol</i>	–
WCDMA	<i>Wideband CDMA</i>	–
WiMAX	<i>Worldwide Interoperability for Microwave Access</i>	–
$w_{m,t,s}$	Peso ponderador para a duração média da sessão do serviço $s$ , no ambiente de serviço $m$ e intervalo de tempo $t$	–

WP-8F	<i>Working Party – 8F</i>	–
WRC-2000	<i>World Radiocommunication Conference 2000</i>	–
xDSL	<i>x-digital subscriber line</i>	–
$X_{hs}$	Percentual de cobertura para células <i>hot-spot</i>	%
$X_{macro}$	Percentual de cobertura para macro-células	%
$X_{micro}$	Percentual de cobertura para micro-células	%
$X_{pico}$	Percentual de cobertura para pico-células	%
$\eta_{d, rat, p}$	Eficiência espectral do RATG <i>rat</i> na teledensidade <i>d</i> e ambiente rádio <i>p</i>	[bit/(s · Hz · célula)]
$\kappa$	Número de canais requeridos por célula	
$\lambda_{d, t, n, rat, p}$	Taxa de chegada de pacotes da categoria de serviço <i>n</i> , na teledensidade <i>d</i> , intervalo de tempo <i>t</i> , RATG <i>rat</i> e ambiente rádio <i>p</i>	[pacotes/s]
$\lambda_n$	Taxa de chegada de pacotes da categoria de serviço <i>n</i>	[pacotes/s]
$\mu_{m, t, n}$	Duração média da sessão da categoria de serviço <i>n</i> , no ambiente de serviço <i>m</i> e intervalo de tempo <i>t</i>	[s/sessão]
$\mu_{m, t, s}$	Duração média da sessão do serviço <i>s</i> , no ambiente de serviço <i>m</i> e intervalo de tempo <i>t</i>	[s/sessão]
$\xi_{m, t, n, rat, p}$	Razão de distribuição das taxas de chegada de sessões de serviço para a categoria de serviço <i>n</i> , no ambiente de serviço <i>m</i> , intervalo de tempo <i>t</i> , RATG <i>rat</i> e ambiente rádio <i>p</i>	–
$\pi_n$	Probabilidade de bloqueio máxima admissível para a categoria de serviço <i>n</i> , comutada por circuitos	–

## 1 – INTRODUÇÃO

As ondas eletromagnéticas vêm sendo utilizadas como meio de comunicação desde o final do século XIX. O primeiro uso regular do rádio em viaturas móveis ocorreu em 1921, para o Departamento de Polícia de Detroit, que enviava ordens do quartel central para seus comandados, nos automóveis. Contudo, os primeiros sistemas a oferecer comercialmente o serviço de telefonia móvel (telefone de carro) foram introduzidos no final dos anos 40 nos Estados Unidos e no início dos anos 50 na Europa. Esses sistemas eram muito limitados quanto à mobilidade e serviços, com baixa capacidade e má qualidade de voz. Além disso, o equipamento era pesado, caro e sensível à interferência. Devido a isso, havia menos de um milhão de usuários de telefonia móvel no início dos anos 80 em todo o mundo.

A introdução de sistemas celulares no final da década de 70 e no início da década de 80 representou um grande salto nas comunicações móveis: a tecnologia dos semicondutores e microprocessadores permitiu o desenvolvimento de telefones menores, mais leves e mais sofisticados, tornando-os uma realidade prática para mais usuários. Estes sistemas 1G ainda transmitiam apenas informação de voz analógica. Os sistemas de primeira geração englobam: *Advanced Mobile Phone System* (AMPS), *Nordic Mobile Telephone* (NMT) e *Total Access Communication System* (TACS). Com a introdução dos sistemas 1G, o número de usuários cresceu para aproximadamente 20 milhões em 1990.

O desenvolvimento dos sistemas celulares 2G foi impulsionado pela necessidade de se melhorar a qualidade de transmissão, a capacidade do sistema e a cobertura. Os avanços quanto à tecnologia dos semicondutores e dispositivos de microondas levaram ao uso da transmissão digital nas comunicações móveis. A transmissão de voz ainda dominava, mas a demanda por serviços de fax, *short messages* e transmissão de dados crescia rapidamente. Serviços suplementares como prevenção de fraudes e encriptação tornaram-se um padrão característico dessa geração. A taxa de transmissão de dados para 2G não excedia 9,6 kbps. Os sistemas 2G incluem: *Global System for Mobile Communication* (GSM), *Digital AMPS* (D-AMPS), *Code Division Multiple Access* (CDMA) e *Personal Digital Communication* (PDC). Ainda hoje, sistemas 1G e 2G são usados no mundo. Diferentes padrões oferecem aplicações com diferentes níveis de mobilidade, capacidade e área de serviço. Muitos são usados em apenas um país ou região, e a maioria deles é incompatível. Com cerca de 2,37 bilhões de usuários em julho/2007 [1], o GSM é o padrão

celular mais utilizado, suportando aproximadamente 82% dos usuários de telefonia móvel no mundo, distribuídos em cerca de 860 redes, com *roaming* internacional em aproximadamente 210 países.

O avanço das comunicações multimídia, providas de imagens e vídeos com alta qualidade, juntamente com a crescente demanda por acesso a informações e serviços a altas taxas de dados, fez com que a União Internacional de Telecomunicações (UIT) iniciasse, em 1992, o desenvolvimento de um sistema universal, o IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications-2000*).

Os objetivos iniciais do IMT-2000, também conhecido como a terceira geração de comunicações móveis (3G), eram produzir um padrão de interface rádio único para todos os países, possibilitando um *roaming* global e fazer uma designação espectral única em todo o mundo. Esses objetivos não foram alcançados devido a interesses de fabricantes e operadoras, que não desejavam mudanças radicais, e também devido a problemas no espectro de frequências alocadas sobre o *core band* do IMT em alguns países, como por exemplo, nos Estados Unidos. Esses fatos levaram a ITU a adicionar outras faixas do espectro para a prestação do 3G e também a incluir nas especificações do IMT-2000 a capacidade de evolução das redes 2G, que passariam ainda por 2.5G até chegar ao 3G.

As redes 2.5G são as versões avançadas das redes 2G com taxas de dados de aproximadamente 144 kbps. O GPRS (*General Packet Radio Service*) é o padrão europeu 2.5G desenvolvido sobre o GSM e substitui a comutação de circuitos do GSM por comutação por pacotes. Este foi um passo útil a caminho da terceira geração, dando aos fabricantes e operadoras de telecomunicações experiência em comutação por pacotes.

O IMT-2000 engloba cinco padrões: WCDMA, CDMA-2000, TD-CDMA/TD-SCDMA, DECT e UWC-136 (EDGE), todos eles especificados na recomendação ITU-R M.1457-6 [2]. Desses cinco padrões, três vêm sendo implementados por diversas operadoras ao redor do mundo: WCDMA, CDMA-2000 e EDGE sendo, neste último, a taxa de transmissão limitada a 384 kbps.

As taxas de transmissão no EDGE chegam a ser 3 vezes mais rápidas do que no GPRS. No entanto, o *upgrade* para WCDMA a partir do EDGE é um tanto complexo, pois implica não somente em atualização de software, mas também em mudanças nos subsistemas de hardware das estações base e antenas e na construção de novas estações base. Por essas

razões, algumas operadoras GSM optaram por não adotar o EDGE, mas sim ir diretamente do GSM ou GPRS para o padrão WCDMA.

Dos padrões de terceira geração propostos, o WCDMA (*Wideband Code Division Multiple Access*) é o que tem emergido como o mais promissor. Até o primeiro trimestre de 2007, havia 156 redes 3G utilizando tecnologia WCDMA em operação comercial em 64 países [3]. O WCDMA implantado nessas redes é denominado de UMTS (*Universal Mobile Telecommunication System*) pelo ETSI (*European Telecommunications Standards Institute*).

A exploração comercial do WCDMA/UMTS se iniciou em 2001 no Japão e, a partir de 2002, em diversos países da Europa. No Brasil ainda não foram licitadas as faixas de frequência para a exploração de serviços 3G, faixas essas regulamentadas pela Resolução nº. 454, de 11 de dezembro de 2006 (Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências nas Faixas de 800 MHz, 900 MHz, 1.800 MHz, 1.900 MHz e 2.100 MHz) e pela regulamentação do Serviço Móvel Pessoal (SMP).

Considerando que as faixas já estão alocadas à prestação do SMP, o passo seguinte para a autorização da exploração do serviço é a licitação. Esse passo foi dado pela Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações), por meio da Consulta Pública n.º 802, de 13 de julho de 2007, que estabelece uma “*Proposta de Edital de Licitação para a expedição de autorização para exploração do Serviço Móvel Pessoal - SMP e/ou outorga de autorização de uso de radiofrequências, nas subfaixas de radiofrequências F, G, I e J*”.

Em novembro de 2006, o IEEE (*Institute of Electrical and Electronics Engineers*) submeteu o documento 8F/1065-E – *Proposed New IMT-2000 Terrestrial Radio Interface Intended for Inclusion in Recommendation ITU-R M.1457* – como contribuição ao WP-8F (*Working Party - 8F*). Este documento propõe a inclusão na revisão da Recomendação ITU-R 1457-6 [2], de uma sexta interface aérea para o IMT-2000, a interface IP-OFDMA *Radio Transmissions Technology* (IP-OFDMA RTT). Essa contribuição foi elaborada por um grupo de especialistas do IEEE Project 802 e da indústria, e a sua submissão ao WP-8F foi aprovada pelo IEEE 802.16 – *Working Group on Wireless Metropolitan Area Networks*, pelo IEEE 802.18 – *Radio Regulatory Technical Advisory Group* e pelo IEEE 802 *Executive Committee* de acordo com a política e procedimentos internos do IEEE 802.

No documento 8F/1065-E, o IEEE incluiu uma nota para que informações adicionais sobre a nova interface proposta, IP-OFDMA, poderiam ser submetidas por outras organizações. Assim, imediatamente após a submissão do 8F/1065-E, o WiMAX Fórum submeteu ao WP-8F uma contribuição contendo os benefícios de se adicionar o IP-OFDMA às especificações técnicas da interface aérea do IMT-2000, o documento 8F/1075-E – *Benefits of adding IP-OFDMA as an IMT-2000 Terrestrial Radio Interface* – de 21 de dezembro de 2006.

Em janeiro de 2007, o WiMAX Fórum apresentou uma nova contribuição contendo detalhes técnicos adicionais da tecnologia IP-OFDMA, o documento 8F/1079-E – *Additional Technical Details Supporting IP-OFDMA as an IMT-2000 Terrestrial Radio Interface*. Este documento também inclui a descrição do modelo de referência de uma rede WiMAX, desenvolvido pelo WiMAX Fórum e usado como framework para a avaliação da interface rádio IP-OFDMA.

A intenção do IEEE e do WiMAX Fórum é que as contribuições para a inclusão do IP-OFDMA RTT na revisão da Recomendação ITU-R 1457-6 sejam completadas, avaliadas e aprovadas pelo WP-8F a tempo de submeter à apreciação e aprovação do SG-8 na reunião programada para junho de 2007.

Considerando todo o exposto até aqui sobre o processo de inclusão do IP-OFDMA nas especificações técnicas do IMT-2000, salienta-se que esta tecnologia será considerada neste trabalho, como um dos sistemas integrantes do RATG2 (*Radio Access Technique Group 2*). O conceito de RATG será abordado na seção 2.3.

O canal de comunicação utilizado por cada um dos sistemas descritos nada mais é que uma faixa de frequência dentro do espectro radioelétrico. Sem espectro não haveria comunicação via rádio e, portanto, trata-se de um recurso basilar para o desenvolvimento das telecomunicações sem fio. Por ser o espectro um recurso natural escasso, é necessário que decisões de cunho estratégico sejam adotadas após cuidadosa análise e discussão.

Considerando o disposto no inciso VIII do art. 19 da Lei n.º 9.472/1997, cabe à Anatel administrar o espectro de radiofrequências, expedindo as respectivas normas e regulamentos. Esta administração é feita levando em consideração o Regulamento de Radiocomunicações e também os Atos finais da Conferência Mundial de Radiocomunicação, editados pela ITU-R.

Um recurso tão precioso não é barato e todo operador de serviços de telecomunicações sabe quanto custa para adquirir o direito de explorar uma determinada banda de frequência. A BrT GSM, por exemplo, possui autorização para prestar o SMP na banda E, com 2 x 2,5 MHz na faixa de 900 MHz e 2 x 15 MHz na faixa de 1.800 MHz, o que resulta em uma banda total de 35 MHz, conforme ilustrado na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Subfaixas de frequências da banda “E”.

SUB-FAIXA	Transmissão da Estação Móvel (MHz)			Transmissão da Estação Rádio Base (MHz)			Banda Total (MHz)
E	912,5	A	915	957,5	a	960	5
	1740	A	1755	1835	a	1850	30

É evidente que os serviços e aplicações móveis futuros demandarão cada vez mais banda e, portanto, torna-se imprescindível mensurar a necessidade de espectro adicional para suportar tal demanda num horizonte de 5, 10 ou 15 anos.

A Anatel está preocupada com essa demanda e tem participado de fóruns internacionais sobre o assunto. Atualmente, o mercado aguarda o resultado da Consulta Pública nº. 802, comentada anteriormente.

A necessidade de espectro para a componente terrestre do IMT-2000 foi estimada no Report ITU-R M.2023 [4], anterior a WRC-2000, por meio do uso de uma metodologia baseada na combinação de redes de tecnologia 2G e 3G descrita na Recomendação ITU-R M.1390 [5]. Esta metodologia era focada essencialmente no paradigma da comutação por circuito.

Naquela ocasião, as metodologias para o cálculo da necessidade de espectro para aplicações wireless, tal como a que é descrita na recomendação ITU-R M.1390, tratava de uma estrutura focada apenas em um mesmo sistema e cenário de mercado. Hoje o cenário mudou e abordagens como essa não são mais apropriadas à aplicação em ambientes onde a convergência entre sistemas fixos e móveis já é realidade. A convergência de redes e serviços ocasionou o surgimento de ambientes multi-rede e, conseqüentemente, trouxe a necessidade de haver suporte a atributos que promovam a interoperabilidade consistente entre diferentes sistemas de acesso.



De acordo com o descrito na Recomendação ITU-R M.1645 [6], o perfil do tráfego está migrando de comunicação de voz para comunicação multimídia e as redes e sistemas deverão ser planejados para suportar, de forma economicamente viável, a transferência de pacotes de dados. Assim, para a estimativa da necessidade de frequência espectral, novos modelos tiveram que ser desenvolvidos e aplicados, permitindo fazer correlação espacial e temporal entre serviços de telecomunicações e, ao mesmo tempo, levando em consideração a nova demanda do mercado e os cenários de rede existentes.

Neste trabalho, descreve-se uma metodologia para calcular a quantidade estimada de espectro requerido para a evolução dos sistemas 3G e pós-3G baseados nas recomendações da ITU-R. Como ponto de partida para o desenvolvimento do trabalho, adotou-se o documento 8/BL/34-E [7], de 20 de fevereiro de 2006, do SG-8 (*Radiocommunication Study Group 8*) da ITU-R. O SG-8 é um grupo de estudos, dentre os vários que compõem o Bureau de Radiocomunicações da ITU, que trata dos aspectos técnicos dos sistemas destinados aos serviços móveis, de radiodeterminação e radioamador, incluindo os correspondentes serviços por satélite. O documento 8/BL/34-E foi originado a partir de contribuições do WP-8F, que é o subgrupo de trabalho do SG-8 responsável por todos os aspectos técnicos referentes aos sistemas rádios ou interfaces aéreas do IMT-2000 e sistemas pós IMT-2000. Ele se encarrega principalmente dos assuntos relacionados à componente terrestre desses sistemas e trabalha em sintonia com o WP-8D (*Working Party 8D*) nos assuntos relacionados à componente satelital. O documento 8/BL/34-E originou a Recomendação ITU-R M.1768 [8] que é a principal referência bibliográfica adotada para o desenvolvimento deste trabalho.

Os capítulos seguintes apresentam a abordagem sistemática da recomendação ITU-R M.1768, sendo o capítulo 2 destinado a descrever o escopo e as etapas da metodologia proposta, os aspectos técnicos da abordagem e as definições usadas. Primeiramente serão apresentados o escopo e etapas da metodologia de cálculo de espectro e, na seqüência, as definições das categorias de serviço, ambientes de serviço, ambientes rádio, grupos de tecnologia de acesso rádio e, finalmente, a relação entre os ambientes de serviço e rádio. O capítulo 3 aborda a forma como é tratada a demanda de mercado para a estimativa do tráfego, o cálculo da capacidade do sistema e o espectro requerido para atendê-lo. Inicialmente é abordada a sistemática da análise dos dados de mercado, passando, em seguida, para a forma distribuição de tráfego entre grupos separados pela técnica de acesso rádio. Na seqüência, é apresentada a forma de cálculo da capacidade e necessidade de

espectro. O capítulo 4 apresenta a simulação do cenário atual da rede da Brasil Telecom GSM, para uma determinada área, visando validar a ferramenta utilizada para simular a metodologia de cálculo de espectro. O capítulo 5 contém os resultados da simulação de cenários considerando o uso de tecnologia 3G, apresentando os efeitos da variação de alguns dos principais parâmetros de entrada para a metodologia de cálculo de espectro. Finalmente, o capítulo 6 apresenta as conclusões desse trabalho.

É importante salientar que trata-se de uma metodologia que pode ser usada para diversas arquiteturas de sistemas celulares em diferentes mercados. No entanto, deve-se ter cuidado na escolha dos parâmetros de entrada apropriados para refletir situações particulares.

## **2 – METODOLOGIA PARA CÁLCULO DE ESPECTRO**

### **2.1 – INTRODUÇÃO**

No âmbito internacional, todas as considerações sobre espectro referentes aos sistemas 3G e pós-3G têm sido motivadas pela expectativa do mercado por serviços de comunicações sem fios entre os anos 2010 e 2020. O foco principal dessas considerações é, então, prever a demanda do mercado para os usuários de redes 3G e pós-3G. A metodologia deste trabalho é direcionada a acomodar uma ampla variedade de aplicações demandadas pelo mercado no intervalo de tempo citado.

O modelo de informações de mercado apropriado ao uso na metodologia foi obtido a partir do Report ITU-R M.2072 [9]. Este documento apresenta sumariamente um modelo de análise de mercado baseado na previsão da evolução da demanda e serviços nos sistemas 3G e pós-3G, entre outros. Nele foram estabelecidos parâmetros referentes ao mercado e feitas previsões relacionadas ao segmento móvel para os anos 2010, 2015 e 2020. Tais parâmetros são essenciais ao desenvolvimento de uma metodologia de cálculo de espectro.

As conclusões do Report M.2072 foram obtidas a partir de estudos internos e externos à ITU-R, com contribuições de mais de 30 países e organizações, tendo sido considerados dados detalhados sobre previsão de tráfego em diferentes partes do mundo até o ano 2020. O Report M.2072 também apresenta exemplos de potenciais aplicações e serviços sobre redes 3G e pós-3G a partir do ano 2010.

Neste capítulo, serão feitos comentários quanto a aspectos técnicos da abordagem e apresentadas as definições usadas na metodologia. Primeiramente será apresentado o escopo e etapas da metodologia. Na seqüência, serão definidos os tipos de serviço, classes de tráfego, categorias de serviço, ambientes de serviço e rádio juntamente com os respectivos parâmetros de entrada para os cálculos da metodologia. Finalmente serão definidos os grupos de tecnologia de acesso e será discutida a relação entre eles, os ambientes de serviço e rádio.

### **2.2 – ESCOPO E ETAPAS DA METODOLOGIA**

A metodologia a ser utilizada mantém uma abordagem tecnologicamente neutra quanto aos aspectos técnicos das RATs (*Radio Access Techniques*) e usa a classificação de RATGs

(*Radio Access Technique Groups*). Em diversas etapas da metodologia são requeridos parâmetros técnicos de entrada que caracterizam os diferentes RATGs. Esta abordagem proposta pela ITU-R é inovadora, pois permite a utilização de critérios e parâmetros técnicos sem, contudo, haver a necessidade de se definir uma tecnologia específica e sim um grupo de tecnologias de acesso rádio.

Por meio da abordagem de RATGs, os aspectos técnicos considerados para o cálculo de espectro podem ser conduzidos sem se referirem à especificação detalhada da interface aérea dos sistemas móveis atuais e futuros. A classificação dos RATGs, os aspectos tecnológicos de cada um deles e os valores típicos de seus parâmetros, tal como a eficiência espectral, são descritos no Report ITU-R M.2074 [10].

É importante ficar claro que, neste trabalho, o objetivo é estimar a quantidade de espectro requerida para a evolução dos sistemas móveis capaz de suportar a demanda futura do mercado por aplicações móveis. Portanto, o foco não está no dimensionamento de sistemas móveis específicos, sendo este o objetivo das metodologias de planejamento de redes celulares/sem fio auxiliadas pelas ferramentas de simulação de cobertura.

A metodologia leva em consideração a totalidade da demanda do mercado de comunicações terrestres que será atendida pelos vários meios de comunicação envolvendo redes e serviços tal como é descrito na Recomendação ITU-R M.1645 [6]. Para abranger todos esses meios de comunicação, foi necessário identificar os possíveis RATGs que suportarão os serviços demandados. A metodologia presente distribui o tráfego total estimado para o mercado de comunicações terrestres entre os RATGs identificados no Report ITU-R M.2074, a saber:

- RATG 1: Sistemas pré-3G, 3G e seus desenvolvimentos – Este grupo inclui os sistemas móveis celulares digitais 2G e 2.5G, sistemas 3G e seus desenvolvimentos.
- RATG 2: Sistemas pós-3G – Este grupo engloba os sistemas pós-3G tal como é descrito na Recomendação ITU-R M.1645 [6], entre os quais estão os novos sistemas de acesso móvel e de acesso sem fio nômades/de rede local (por exemplo: sistemas Wimax). Contudo, o RATG 2 não abrange sistemas já considerados em outros RATGs.
- RATG 3: Sistemas existentes de Radio LANs e seus desenvolvimentos.

- RATG 4: Sistemas móveis digitais de broadcasting e seus desenvolvimentos – Este grupo abrange os sistemas destinados ao broadcasting para terminais móveis e *handhelds*.

A metodologia que será descrita neste trabalho se aplica aos grupos RATG1 e RATG2. Assim, são englobados os sistemas pré-3G, 3G e sistemas pós-3G. Os procedimentos técnicos usados estão baseados em quatro pontos principais: definição de serviços; demanda ou expectativa do mercado; *framework* técnico e operacional; e algoritmo para cálculo de espectro. Estes pontos são abordados nas respectivas etapas da proposta, cujo fluxograma é mostrado na Figura 2.1. Nas seções seguintes serão apresentados os critérios técnicos dos RATGs considerados.

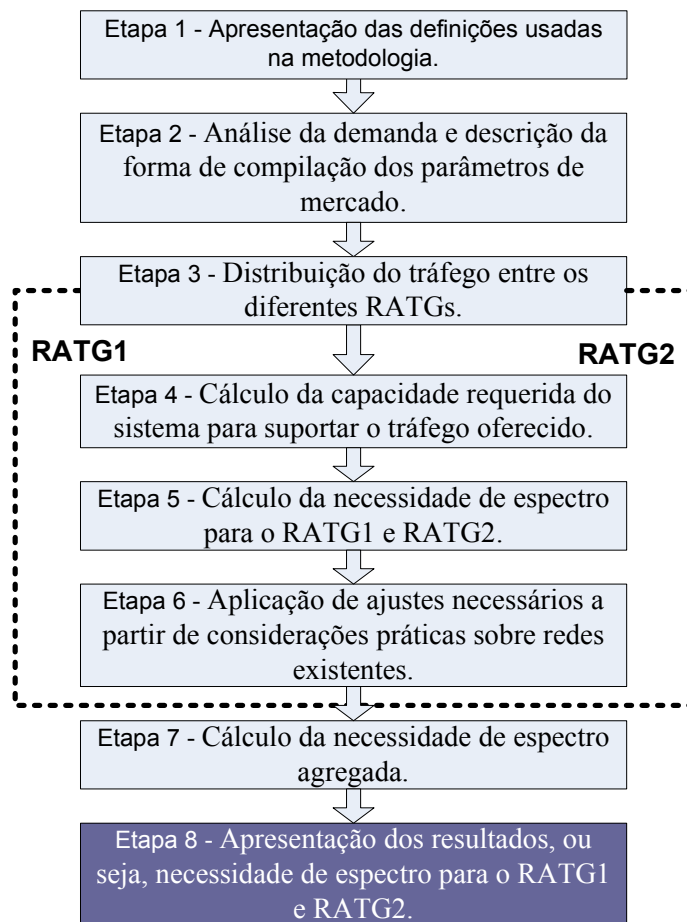


Figura 2.1 – Etapas da metodologia de cálculo de espectro.

## 2.3 – DEFINIÇÕES E ASPECTOS TÉCNICOS

Todos os parâmetros de entrada requeridos e as categorias associadas são definidos nesta seção. Também são apresentadas, em cada uma de suas subseções, tabelas com os valores de entrada sugeridos para os parâmetros.

Primeiramente são introduzidos os tipos de serviço e as classes de tráfego para refletir as taxas de pico de dados e o perfil de tráfego desejado para um serviço. Uma categoria de serviço é composta então pela combinação entre tipo de serviço e classe de tráfego.

Os ambientes de serviço são definidos como uma combinação entre modelo de utilização do serviço e teledensidade. Eles são usados para categorizar o lugar a partir do qual o usuário acessa um serviço e o perfil de tráfego daquela área geográfica.

Os ambientes rádios são utilizados para refletir a infra-estrutura rádio que provê serviços aos usuários em cada ambiente de serviço e abrangem os diferentes conceitos de camadas dentro de uma rede composta por camadas celulares hierárquicas.

Por fim, o conceito de RATG citado na seção 2.2 é novamente abordado de forma mais detalhada.

### 2.3.1 - Tipos de serviço

Uma categoria de serviço (SC – *Service Category*) é uma combinação entre tipo de serviço e classe de tráfego, como mostrado na Tabela 2.1. As taxas de bit (*peak bit rates*) são usadas para categorizar os tipos de serviço. É possível agrupar serviços que demandam taxas similares em 5 categorias comuns como mostrado na Tabela 2.2.

A partir do ano 2010, haverá ainda uma certa demanda para as aplicações de voz do tipo *very low rate data* e serviços de mensagens curtas (SMS). Estas aplicações ou tipos de serviço requerem taxa de até 16 kbit/s. Adicionalmente, espera-se que algumas aplicações no campo de comunicações sensoriais e/ou telemetria a baixas taxas de bit possam ser agregadas a essa categoria, provendo comunicação em qualquer lugar e a qualquer momento.

Tabela 2.1 – Categorização dos serviços.

<b>Classe de tráfego</b> <b>Tipo de serviço</b>	Conversaço	<i>Streaming</i>	Interativo	<i>Background</i>
<i>Super-high multimedia</i>	SC1	SC6	SC11	SC16
<i>High multimedia</i>	SC2	SC7	SC12	SC17
<i>Medium multimedia</i>	SC3	SC8	SC13	SC18
<i>Low rate data and low multimedia</i>	SC4	SC9	SC14	SC19
<i>Very low rate data</i> <sup>(1)</sup>	SC5	SC10	SC15	SC20

<sup>(1)</sup> Inclui voz e SMS.

Tabela 2.2 – Tipos de serviço e suas taxas de bit.

<b>Tipo de Serviço</b>	<b>Taxa de Bit</b>
<i>Very low rate data</i>	< 16 kbit/s
<i>Low rate data and low multimedia</i>	< 144 kbit/s
<i>Medium multimedia</i>	< 2 Mbit/s
<i>High multimedia</i>	< 30 Mbit/s
<i>Super-high multimedia</i>	de 30 Mbit/s a 100 Mbit/s/1 Gbit/s

O serviço do tipo *low rate data and low multimedia* suporta taxas até 144 kbit/s e leva em consideração as aplicações de comunicação de dados pré-3G.

O serviço do tipo *medium multimedia* suporta taxas de bit até 2 Mbit/s e se faz necessário para manter a compatibilidade com as aplicações atuais de 3G.

*High multimedia* é um tipo de serviço que acomoda aplicações de alta taxa de bit, incluindo serviços de *streaming* de vídeo multimídia, que são atualmente providos por meio das tecnologias xDSL sobre redes de par metálico.

O serviço *super-high multimedia* acomoda aplicações multimídia que demandam taxas maiores que as demandadas pelo tipo anterior. As aplicações em *super-high rate data multimedia* são, atualmente, providas através de serviços FTTH (*fiber-to-the-home*) no caso de sistemas de comunicação via cabo.

### 2.3.2 - Classes de tráfego

A metodologia proposta neste trabalho aplica o conceito das classes de tráfego apresentadas na Recomendação ITU-R M.1079 [11]. Para os sistemas 3G, sob a ótica do usuário, são definidas quatro classes de qualidade de serviço (QoS): conversação ou *conversational class*; interativos ou *interactive class*; *streaming*; e *background*.

O principal fator que diferencia essas classes é o nível de sensibilidade da aplicação ao atraso na comunicação. Por exemplo: a classe de serviços de conversação se refere às aplicações bastante sensíveis ao atraso ao passo que a classe de *background* é a classe de serviço menos sensível ao atraso.

Entre as classes incluídas na Recomendação ITU-R M.1079, as classes de conversação e *streaming* são providas via comunicação por comutação de circuito e as classes de *background* e serviços interativos, por comutação de pacotes.

#### 2.3.2.1 - Classe de serviços de conversação

A aplicação mais conhecida dentro desta classe de serviço é a telefonia. Porém, considerando a Internet e dados multimídia, surgem novas aplicações como o VoIP (Voz sobre IP) e ferramentas de videoconferência. De fato, é inegável que sempre está ocorrendo conversação em tempo-real, via distintos sistemas de comunicação, em todo o planeta. A conversação em tempo-real é caracterizada pela necessidade de haver um baixo tempo de transferência de informação devido à natureza conversacional da aplicação e, ao mesmo tempo, pelo fato de que a variação temporal da informação entre as entidades da comunicação deve ser preservada.

O atraso máximo de transferência é determinado pela percepção humana referente aos processos de comunicação de áudio e vídeo. Assim, o limite para um atraso de transferência aceitável é muito restrito, tal como o fracasso de uma tentativa de prover atraso de transferência baixo o suficiente resultará em uma inaceitável falta de qualidade.

Salienta-se, no entanto, que o atraso de transferência aceitável para aplicações de conversação é muito menor e, ao mesmo tempo, mais rigoroso que o *round trip delay* das aplicações interativas.



### 2.3.2.2 - Classe de serviços interativos

Esta classe se aplica em situações onde o usuário final, que pode ser uma pessoa ou uma máquina, está on-line requisitando dados de um equipamento remoto. Aplicações típicas da interação humana com equipamentos remotos são: *Web browsing*, armazenamento remoto de dados e servidor de acesso. Como exemplo de interação entre máquinas e equipamentos remotos pode-se citar o *polling* realizado por servidores de gerência de rede para obter medidas gravadas nos elementos de rede.

O tráfego interativo é um esquema clássico de comunicação de dados que, em geral, é caracterizado pelo envio da requisição de resposta a um servidor ou equipamento remoto e a correspondente resposta deste ao requisitante, ou seja, ao usuário final. Este último, ao enviar uma requisição a um equipamento remoto, espera que a resposta lhe seja encaminhada dentro de intervalo de tempo estabelecido. Dessa forma, o *round-trip delay time* é um dos principais atributos a serem considerados para caracterizar o tráfego interativo.

Outra característica importante nesse tipo de tráfego é que o conteúdo do *payload* dos pacotes deve ser preservado e, para isso, deve ser transparentemente transferido com baixa taxa de erro.

### 2.3.2.3 - Classe de streaming

A classe de *streaming* é utilizada, por exemplo, quando o usuário está assistindo vídeo em tempo real por meio de seu dispositivo de acesso, que pode ser um computador, *palmtop*, celular etc. É importante ressaltar que o fluxo de dados em tempo real caracterizado como *streaming*, seja vídeo ou áudio, é transportado em um único sentido e está sempre apontado para um destino vivo, ou seja, a um usuário humano.

Essa classe é uma das aplicações mais recentes em comunicações de dados e acrescentou aos sistemas de telecomunicações novos requisitos técnicos. Ela é caracterizada pelas relações temporais (variação do tempo) entre as entidades de informação (por exemplo, pacotes de dados) dentro de um fluxo que deve ser preservado, no entanto, ela não tem qualquer requisito de baixo atraso de transferência.

A variação do atraso de fluxo fim-a-fim deve ser limitada para preservar a relação temporal entre as entidades de informação do *stream*. Mas, como o *stream* está normalmente

alinhado com o final da recepção no equipamento do usuário, a maior variação de atraso aceitável sobre a mídia que será transmitida é dada pela capacidade da função de alinhamento de tempo da aplicação. A variação de atraso aceitável é, dessa maneira, muito mais ampla que a variação do atraso dada pelos limites da percepção humana.

As duas características fundamentais para garantir o QoS nos *streams* em tempo real são: *stream* contínuo e unidirecional; e preservar a relação temporal (variação do tempo) entre as entidades de informação do *stream*.

#### **2.3.2.4 - Classe de Background**

Em ambientes operacionais multitarefa, é comum que sejam dadas prioridades aos programas que estejam sendo executados simultaneamente sobre eles. O *foreground* do sistema contém as aplicações acessadas diretamente pelo usuário para a realização de suas tarefas. O *background* do sistema contém as aplicações que estão fora da cena do usuário, como, por exemplo, algumas funções usadas pelo sistema operacional para a impressão de documentos ou acesso à Internet. Na realidade, há uma série de programas sendo executados em *background* sem que a grande maioria dos usuários tenha conhecimento do que se trata.

A classe de *background* se aplica aos esquemas de comunicação nos quais o usuário final, que tipicamente é um computador, envia e recebe arquivos em *background*. Como exemplos, tem-se a entrega de e-mails, SMS e *download* automático de atualização de dados ou medidas gravadas remotamente.

O tráfego do tipo *background* é um dos esquemas clássicos de comunicação de dados que, de uma forma geral, é caracterizado pela falta de um parâmetro no destino espectador para receber os dados dentro de um limite de tempo especificado. Além disso, outra característica desse tipo de tráfego é que o conteúdo do pacote deve ser preservado e, para isso, deve ser transparentemente transferido com baixa taxa de erro (BER – *Bit Error Rate*).

Assim, considerando que aplicações *background* não necessitam de informação sobre o atraso, o único requisito para elas é que os dados sejam entregues ao usuário livre de erros. No entanto, deve ficar claro que há limitação do atraso nos casos em que a informação não pode ser recebida muito tarde para qualquer propósito prático, ou seja, os dados se

tornaram efetivamente impróprios ao uso na aplicação requerida devido ao atraso na entrega. Dessa forma, é comum considerar o tráfego *background* como mais ou menos insensível ao atraso.

As características fundamentais para garantir o QoS no tráfego *background* são: o destino não está esperando que os dados sejam entregues dentro de um tempo estabelecido; e o conteúdo do pacote deve ser preservado.

### 2.3.3 - Parâmetros das categorias de serviço

As categorias de serviço são caracterizadas por parâmetros que são obtidos em estudos de mercado, entre outras fontes. Os parâmetros de categorias de serviços seguintes foram obtidos a partir do Report ITU-R M.2072 [9]:

- Densidade de usuários [usuários/km<sup>2</sup>];
- Taxa de chegada de sessões por usuário [sessões/(s · usuário)];
- Taxa de bit média do serviço [bit/s];
- Duração média da sessão [s/sessão];
- Faixa de mobilidade.

Os quatro primeiros parâmetros caracterizam a demanda das diferentes categorias de serviço, ao passo que o parâmetro de mobilidade é usado na distribuição do tráfego entre os RATGs.

A mobilidade do terminal está estritamente relacionada aos cenários onde a aplicação é usada. A recomendação ITU-R M.1390 divide a mobilidade em três possíveis cenários: *in-building*; *pedestrian*; e *vehicular* [5].

Os requisitos de mobilidade dependem da velocidade das estações móveis. Nos estudos de mercado do Report ITU-R M.2072, as classes de mobilidade estão divididas da seguinte forma: estacionária (0 km/h); baixa (> 0 km/h e < 4 km/h); alta (> 4 km/h e < 100 km/h); e super-alta (>100 km/h e < 250 km/h) [9].

Os limites das categorias podem ser relacionados às características típicas das redes celulares. Por exemplo, o tempo mínimo no qual um usuário permanece em uma célula de tamanho pequeno deve ser significativamente maior que o tempo necessário para a conclusão dos processos de inicialização e de execução do *handover*. Assim, em sistemas com células pequenas o tamanho da célula limita a velocidade máxima suportada pela rede.

Por esta razão, as pico-células são tipicamente limitadas para suportar velocidades de pedestres (até 10 km/h), as micro-células suportam velocidades típicas de veículos em ambiente urbano (até 50 km/h) e as macro-células cobrem a porção remanescente de velocidade dos usuários.

Para a aplicação neste trabalho, os conceitos das classes de mobilidade extraídos dos estudos de mercado foram reclassificados da seguinte forma:

- Estacionária/Pedestriana (0-4 km/h);
- Baixa (> 4 km/h e < 50 km/h);
- Alta (> 50 km/h).

Dessa forma, o tráfego da classe de alta velocidade (alta mobilidade) definida no Report ITU-R M.2072 (>4 km/h e <100 km/h) foi dividido entre as classes baixa e alta mobilidade. Essa divisão levou em conta os atributos dos ambientes de serviço definidos na próxima seção, que podem resultar em diferentes fatores de distribuição de mobilidade (fator  $J_m$ ) em  $m$  ambientes de serviço. O mapeamento do tráfego para as classes de mobilidade é apresentado na Tabela 2.3 e os valores típicos de  $J_m$  por ambiente de serviço são apresentados na Tabela 2.4.

Adicionalmente aos parâmetros das categorias de serviço relacionados ao mercado, a metodologia requer parâmetros não definidos no Report ITU-R M.2072 os quais estão listados na Tabela 2.5 a qual exemplifica valores típicos para algumas categorias de serviço. Esses parâmetros adicionais são necessários para o cálculo da capacidade de transmissão dos sistemas.

Tabela 2.3 – Mapeamento das classes de mobilidade.

<b>Classes de mobilidade definidas no Report ITU-R M.2072</b>	<b>Classes de mobilidade consideradas nesta metodologia</b>
Estacionária	Estacionária/pedestriana
Baixa	
Alta	Baixa $[(J_m) \times \text{Alta}]$
	Alta $[(1 - J_m) \times \text{Alta} + \text{Super-alta}]$
Super-alta	

Tabela 2.4 – Valores típicos de  $J_m$  para o mapeamento das classes de mobilidade em diferentes ambientes de serviço.

Ambiente de serviço ( $m$ )	Fator de distribuição de mobilidade ( $J_m$ )
1	1
2	1
3	1
4	1
5	0,5
6	0

Tabela 2.5 – Parâmetros das categorias de serviço usados como entrada no algoritmo de cálculo de espectro.

Categoria de serviço	SC1	...	SC10	SC11	...	SC20
Tamanho médio do pacote [kbit/pacote]	-	...	-	8,91	...	1,66
Segundo momento <sup>(1)</sup> do tamanho do pacote [(kbit/pacote) <sup>2</sup> ]	0	...	0	99,17	...	11,68
Atraso médio do pacote [s/pacote]	-	...	-	2,97E-04	...	4,45E-02
Taxa de bloqueio permitida [%]	0,01	...	0,01	-	...	-

<sup>(1)</sup> O segundo momento de uma variável randômica é um valor escalar que está relacionado à variância da variável randômica.

### 2.3.4 - Ambiente de Serviço

Um ambiente de serviço (SE – *Service Environment*) é definido como uma combinação entre o modelo de uso do serviço e a teledensidade. Nesta metodologia, os ambientes de serviço são utilizados para caracterizar as condições de uso dos serviços e o volume de usuários que compartilham estes serviços.

Um modelo de uso do serviço é uma combinação entre o comportamento comum de usuários dentro de determinada área de serviço. Para caracterizar um modelo de uso do serviço, deve-se considerar uma área onde os usuários acessam serviços similares e esperam obter condições de QoS análogas. Para o dimensionamento de espectro proposto nesta metodologia, são considerados três modelos de uso do serviço: Casa; Escritório; e Área Pública.

Assim como está definido na recomendação ITU-R M.1390 [5], a densidade populacional e o número de equipamentos por pessoa são também importantes fatores a se considerar para caracterizar um ambiente de serviço. A área geográfica é, dessa forma, dividida de

acordo com esses fatores em três categorias de teledensidade onde cada parâmetro é caracterizado pela densidade populacional e pela densidade de equipamentos de comunicação. Estas três categorias são: Urbano denso; Sub-urbano; e Rural.

Combinando-se as definições de modelo de uso do serviço e teledensidade obtêm-se os ambientes de serviço que serão considerados nesta metodologia os quais são mostrados na Tabela 2.6. Visando prover uma visão mais clara de cada ambiente de serviço, a Tabela 2.7 apresenta exemplos de possíveis grupos de usuários e de aplicações típicas de cada ambiente de serviço.

Tabela 2.6 – Ambientes de serviço.

<b>Teledensidade</b> <b>Modelo de uso do serviço</b>	Urbano denso	Sub-urbano	Rural
Casa	SE1	SE4	SE6
Escritório	SE2	SE5	
Área Pública	SE3		

Tabela 2.7 – Exemplos de grupos de usuários e aplicações típicas do ambiente de serviço (SE).

<b>SE</b>	<b>Grupos de usuário</b>	<b>Aplicações típicas</b>
SE1	Usuário particular e usuário corporativo.	Voz, acesso à Internet, jogos, comércio eletrônico, educação à distância e aplicações multimídia.
SE2	Usuário corporativo, pequenas e médias empresas.	Voz, acesso à Internet, videoconferência, comércio eletrônico e aplicações móveis para empresas.
SE3	Usuário particular, usuário corporativo e usuários prestadores de serviços públicos (motoristas de ônibus, serviços de emergência ao turista, vendedores etc).	Voz, acesso à Internet, videoconferência, aplicações móveis para empresas, informações turísticas e comércio eletrônico.
SE4	Usuário particular e usuário corporativo.	Voz, acesso à Internet, jogos, comércio eletrônico, aplicações multimídia e educação à distância.
SE5	Usuário corporativo e empresas.	Voz, acesso à Internet, comércio eletrônico, videoconferência e aplicações móveis para empresas.
SE6	Usuário particular, fazendeiro e prestadores de serviço público.	Voz e aplicações de informação.

Para que esta metodologia possa ser aplicada, em primeiro lugar o espectro deve ser calculado separadamente para cada categoria de teledensidade. Visando generalizar o resultado para obter a necessidade de espectro em toda a área de prestação de serviço da operadora toma-se, então, o maior valor encontrado entre as três áreas de teledensidade (urbano denso, sub-urbano e rural).

### **2.3.5 - Ambiente Rádio**

Os ambientes rádios (RE – *Radio Environment*) são definidos como as camadas de uma rede hierarquicamente constituída por camadas celulares. Por exemplo, uma rede móvel celular é usualmente constituída por macro-células, micro-células, pico-células e *hot-spots*. O tamanho das camadas de uma rede, ou seja, as áreas de suas células têm um impacto direto sobre o volume de tráfego. Por essa razão, a área da célula de ambientes rádios distintos é usada como parâmetro de entrada para o cálculo do espectro.

Naturalmente, deve haver um equilíbrio entre os custos de desenvolvimento de uma rede e os requisitos de espectro. Além dos limites do tamanho das células, que estão relacionados a esses dois fatores, há também limites técnicos. O limite técnico superior é determinado pelas condições de propagação e por limitações da potência de transmissão do terminal e, em menor escala, pelo atraso de multipercurso. Os limites inferiores para o tamanho das células são determinados pelo aumento das condições de interferência indesejáveis, por exemplo, pelo surgimento muito freqüente de condições de linha de visada direta entre células interferentes. O limite inferior do tamanho de uma célula deve ser desprezível, se comparado ao limite imposto pelos custos de desenvolvimento.

Considerando que o planejamento de micro-células, pico-células e *hot-spots* não apresenta muita variação entre as diferentes áreas de teledensidade, assume-se como premissa que a mesma área máxima de uma célula, para essas camadas celulares, possa ser utilizada na metodologia de cálculo aqui proposta. No entanto, para as macro-células, a situação é diferente, pois a teledensidade tem impacto na área alvo da célula bem como no planejamento das estações base. Assim, a área da macro-célula é adotada como parâmetro de entrada para os cálculos como uma variável dependente da teledensidade. A Tabela 2.8 apresenta exemplos da área máxima de uma célula para cada ambiente rádio e categoria de teledensidade, na qual os valores das áreas das células são típicos para as categorias de

teledensidade consideradas. Os valores ilustrados na Tabela 2.8 não são aplicáveis a cenários com grandes áreas de cobertura e baixa teledensidade populacional.

A disponibilidade dos REs depende do ambiente de serviço. Na prática, a área total de um ambiente de serviço é coberta somente até certo percentual por cada ambiente rádio. A Tabela 2.9 exemplifica valores do percentual de cobertura da população de cada ambiente rádio em cada ambiente de serviço e também apresenta possíveis combinações entre esses ambientes. O percentual de cobertura será usado na distribuição do tráfego entre os ambientes rádio. Esse percentual pode ser zero para algumas combinações significando que o ambiente rádio não é aplicável ao ambiente de serviço, por exemplo, no Brasil não é comum o uso de micro-célula para cobrir ambiente rural.

Tabela 2.8 – Valores típicos da área máxima da célula por ambiente rádio em km<sup>2</sup>.

Ambiente rádio (RE)	Categoria de teledensidade		
	Urbano denso	Sub-urbano	Rural
Macro-célula	0,65	1,5	8,0
Micro-célula <sup>(1)</sup>	0,1	0,1	0,1
Pico-célula <sup>(1)</sup>	1,6E-3	1,6E-3	1,6E-3
Hot-spot <sup>(1)</sup>	6,5E-5	6,5E-5	6,5E-5

<sup>(1)</sup> Neste ambiente rádio, assume-se que o tamanho da célula não é dependente da teledensidade.

Tabela 2.9 – Exemplo do percentual de cobertura da população por ambiente rádio em cada ambiente de serviço.

SE	RE			
	Macro-célula	Micro-célula	Pico-célula	Hot spot
SE1	100	90	0	80
SE2	100	90	20	80
SE3	100	95	20	10
SE4	100	15	0	80
SE5	100	40	35	20
SE6	100	0	10	50



## 2.4 – GRUPOS DE TECNOLOGIA DE ACESSO RÁDIO

Como exposto anteriormente, esta metodologia leva em consideração a totalidade da demanda do mercado de comunicações terrestres que será atendida pelos vários meios de comunicação envolvendo redes e serviços. Ela mantém uma abordagem tecnologicamente neutra, na qual o tráfego total estimado para o mercado de comunicações terrestres é distribuído entre os RATGs identificados na seção 2.2.

Todos os quatro RATGs são considerados até a etapa 4 da metodologia, conforme exibido na Figura 2.1, enquanto, a partir da etapa 5, apenas os RATGs 1 e 2 são considerados. Cada RATG é caracterizado pelos parâmetros apresentados nas Tabelas 2.10, 2.11, 2.12 e 2.13, que são os mesmos para o *uplink* e para o *downlink*.

Algumas categorias de serviço podem obter benefícios adicionais por meio da utilização do modo *multicast* móvel por um RATG específico. *Multicast* móvel deve ser entendido como uma transmissão destinada a um grupo de receptores, como por exemplo, TV Móvel e serviços de mensagens a baixa taxa de dados. Uma vez que a eficiência espectral dos modos de transmissão *multicast* e *unicast* pode ser consideravelmente diferente, é necessário levar em conta valores separados para os dois modos.

O exemplo da Tabela 2.10 não é aplicável a cenários onde predominam grandes áreas com baixa teledensidade.

Tabela 2.10 – Exemplos dos parâmetros rádio para o RATG1 [10].

Atributo	RATG1				
	Valor				
	Unidade	Macro-célula	Micro-célula	Pico-célula	Hot spot <sup>(1)</sup>
Taxa de dados da aplicação	Mbit/s	1	1	2,5	–
Classes de mobilidade suportadas	–	Estacionária /Pedestriana, Baixa e Alta	Estacionária /Pedestriana e Baixa	Estacionária /Pedestriana	–
Largura de banda da portadora (CBW)	MHz	até 5	até 5	até 5	–
Banda de guarda entre operadoras	MHz	0	0	0	–
Banda mínima por operadora/por ambiente rádio (onde n=1 ou n=2)	MHz	n · CBW	n · CBW	n · CBW	–

Atributo	RATG1				
	Valor				
	Unidade	Macro-célula	Micro-célula	Pico-célula	Hot spot <sup>(1)</sup>
Número de operadoras compartilhando a mesma faixa frequência	Nº	5	5	5	–
Possibilidade de uso de esquema FSU	<i>Boolean</i>	Não	Não	Não	–
Margem FSU	Multi-plicador	1	1	1	–
Eficiência espectral da área	bit/s/Hz / célula	1 a 2	2 a 4	2 a 4	–
Eficiência espectral da área para <i>multicasting</i>	bit/s/Hz / célula	0,5 a 1	1 a 2	1 a 2	–
Frequência típica de operação	MHz	< 2 700	< 2 700	< 2 700	–
Suporte para <i>multicast</i>	<i>Boolean</i>	Sim	Sim	Sim	–

<sup>(1)</sup> O ambiente rádio *Hot-spot* não é relevante para o RATG1.

Tabela 2.11 – Exemplos dos parâmetros rádio para o RATG2 [10].

Atributo	RATG2				
	Valor				
	Unidade	Macro-célula	Micro-célula	Pico-célula	Hot spot
Taxa de dados da aplicação	Mbit/s	50	100	1 000	1 000
Classes de mobilidade suportadas	–	Estacionária/ Pedestriana, Baixa e Alta	Estacionária/ Pedestriana e Baixa	Estacionária/ Pedestriana	Estacionária/ Pedestriana
Banda de guarda entre operadoras	MHz	0	0	0	0
Banda mínima por operadora/por ambiente rádio	MHz	50 a 100	50 a 100	100	100
Número de operadoras compartilhando a mesma faixa frequência	Nº	1 a 4	1 a 4	1 a 4	1 a 4
Possibilidade de uso de esquema FSU	<i>Boolean</i>	Sim	Sim	Sim	Sim

Atributo	RATG2				
	Valor				
	Unidade	Macro-célula	Micro-célula	Pico-célula	Hot spot
Margem FSU	Multiplificador	1	1	1	1
Eficiência espectral da área	bit/s/Hz/célula	2 a 4	2 a 5	3 a 6	5 a 10
Eficiência espectral da área para <i>multicast</i>	bit/s/Hz/célula	1 a 1,5	1 a 2,5	1,5 a 3	2,5 a 5
Frequência típica de operação	MHz	< 6 000	< 6 000	< 6 000	< 6 000
Suporte para <i>multicast</i>	<i>Boolean</i>	Sim	Sim	Sim	Sim

Tabela 2.12 – Exemplos dos parâmetros rádio para o RATG3 [10].

Atributo	RATG3				
	Valor				
	Unidade	Macro-célula	Micro-célula	Pico-célula	Hot spot
Taxa de dados da aplicação	Mbit/s	–	–	50	100
Classes de mobilidade suportadas	–	–	–	Estacionária/ Pedestriana	Estacionária/ Pedestriana
Suporte para <i>multicast</i> (Sim = 1, Não = 0)	Nº	1			

Tabela 2.13 – Exemplos dos parâmetros rádio para o RATG4 [10].

Atributo	RATG4 <sup>(1)</sup>	
	Unit	Macro cell
Taxa de dados da aplicação	Mbit/s	2
Classes de mobilidade suportadas	–	Estacionária/Pedestriana, Baixa e Alta

<sup>(1)</sup> Somente macro-célula é considerada para o RATG4.

Essa metodologia considera os valores da eficiência espectral do ambiente celular [bit/(s · Hz · célula)] como entrada para o cálculo do espectro, como exemplificado na Tabela 2.14. Ressalta-se que, para o modo de transmissão *multicast*, a tabela de eficiência espectral possui valores distintos dentro do mesmo RATG, comparando-se com o tráfego *unicast*.

A eficiência espectral do ambiente celular considerada como parâmetro de entrada é calculada a partir do *throughput* médio de dados de todos os usuários. Estes estão homogeneamente distribuídos na área do ambiente rádio, sobre a camada IP para os serviços comutados por pacote e sobre a camada de aplicação para os serviços comutados por circuito, em redes sem fio plenamente carregadas.

A eficiência espectral e a taxa máxima de dados obtida na borda da célula devem ter correspondência com a frequência operacional típica do ambiente considerado. As possíveis retransmissões nos serviços comutados por pacotes são levadas em consideração para o cálculo dos valores da eficiência espectral.

Tabela 2.14 – Exemplo da matriz de eficiência espectral por ambiente rádio para o RATG2.

Teledensidade	RATG2			
	Ambientes Rádio			
	Macro-célula	Micro-célula	Pico-célula	Hot spot
Urbano denso	$\eta_{1, rat, 1} = 2$ [bit/(s·Hz·célula)]	2,5	3	5
Sub-urbano	2	2,5	3	5
Rural	2	2,5	3	5

## 2.5 – RELAÇÃO ENTRE AMBIENTES DE SERVIÇO, RATGS E AMBIENTES RÁDIOS

Ambientes de serviço e ambientes rádio devem ser considerados separadamente no cálculo de espectro uma vez que as demandas de tráfego são previstas apenas para os primeiros. Por outro lado, o espectro total é calculado para uma combinação de diferentes RATGs e seus possíveis ambientes rádio. O espectro é calculado dentro de cada categoria de teledensidade, contudo, o espectro final deve ser escolhido como o valor máximo entre o espectro calculado de todas as categorias. Assim, o tráfego nos ambientes de serviço deve ser primeiramente agregado dentro de suas correspondentes categorias de teledensidade.

A Figura 2.2 exemplifica uma distribuição de tráfego entre seis ambientes de serviço, dois RATGs e três ambientes rádio. A demanda de tráfego em cada ambiente de serviço pode ser distribuída aos RATGs, por exemplo, o tráfego do ambiente de serviço urbano denso casa tem duas componentes, os montantes de tráfego A1 para o RATG1 e B1 para o RATG2. Os ambientes de serviço urbano denso escritório, urbano denso área pública, sub-urbano casa/área pública e rural também possuem porções de tráfego para cada RATG.

Como cada RATG suporta um ou mais ambientes rádio, o montante da demanda de tráfego para cada um deles, em um ambiente de serviço, pode ser distribuído entre os ambientes rádio suportados, como mostrado na terceira etapa da Figura 2.2.

O tráfego distribuído para os ambientes de serviço ao longo das mesmas categorias de teledensidade é agrupado na quarta etapa da distribuição. Cada RATG tem seus próprios cenários de operação para suas componentes dos ambientes rádio, cada qual com sua própria eficiência espectral. Além disso, os cenários de operação, como o tamanho da célula, também impactam na eficiência espectral. Levando isso em consideração, o espectro pode ser calculado separadamente, a partir da demanda de tráfego e coeficientes de eficiência espectral, para cada instância composta pela categoria de teledensidade, RATG e ambiente rádio. Os retângulos mostrados na quinta etapa da Figura 2.2 representam o espectro para os RATGs nas diferentes categorias de teledensidade. Finalmente, o espectro para um RATG será então o maior valor encontrado entre as categorias de teledensidade que o compõem.

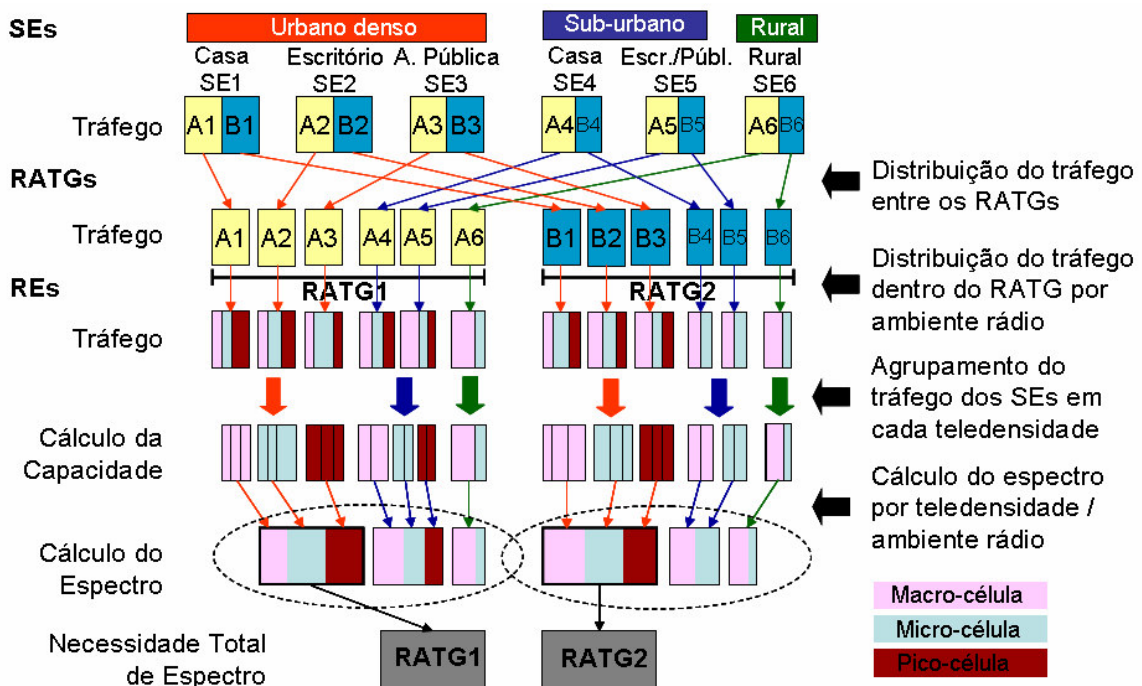


Figura 2.2 – Distribuição da demanda de tráfego entre ambientes de serviço, RATGs e ambientes rádio [8].

### **3 – DEMANDA DE MERCADO, TRÁFEGO, CAPACIDADE DO SISTEMA E NECESSIDADE DE ESPECTRO**

#### **3.1 – INTRODUÇÃO**

O capítulo anterior apresentou o escopo e as etapas da metodologia de cálculo de espectro e descreveu os conceitos técnicos e definições abordadas, abrangendo somente a etapa 1 ilustrada na Figura 2.1. O presente capítulo dará seqüência ao ilustrado na Figura 2.1 abordando cada uma das etapas seguintes.

Primeiramente, será apresentada a sistemática para obtenção da demanda de mercado a partir de parâmetros extraídos do Report M.2072 e a descrição da forma de compilação desses parâmetros juntamente com parâmetros técnicos. Na seqüência, serão mostrados os critérios para a distribuição do tráfego entre os diferentes grupos de tecnologia de acesso e entre os ambientes rádio internos a eles.

Para calcular a quantidade de espectro necessária à operação de um sistema sem fio, deve-se estimar qual a capacidade requerida pelos seus usuários. Para chegar a essa capacidade, é necessário saber qual a demanda dos usuários por serviços e aplicações, ou seja, qual é a demanda do mercado.

A metodologia de cálculo da capacidade requerida pelo sistema para suportar o tráfego oferecido será apresentada na seqüência, na qual serão considerados algoritmos distintos para o cálculo da capacidade de acordo com as categorias de serviço de comutação por circuito e comutação por pacote. Finalmente, será ilustrada a metodologia para cálculo da necessidade de espectro para o RATG1 e RATG2, com a aplicação de ajustes necessários a partir de considerações práticas de redes já em operação.

Os resultados finais para os cenários construídos serão apresentados nos capítulos seguintes.

#### **3.2 – DEMANDA DE MERCADO**

Com o objetivo de estimar a demanda do mercado, no Report ITU-R M.2072 [9] é apresentada a compilação de respostas aos questionários sobre serviços encaminhados pela ITU-R aos seus membros, administrações e fabricantes. As respostas foram compiladas, sumarizadas e analisadas pelo Working Party - 8F e representam a demanda do mercado

por aplicações suportadas pelas redes sem fio. Os questionários sobre serviços buscavam prever o mercado futuro e as tendências das aplicações e incluíam os seguintes itens:

- pesquisa de mercado e serviços nas redes móveis existentes;
- levantamento dos principais parâmetros de mercado; e
- previsão de mercado e serviços para o desenvolvimento dos sistemas 3G e pós-3G, incluindo: aspectos de mercado e serviços; previsão preliminar de tráfego; previsão de mercado e serviços para outros tipos de sistemas rádio; direcionadores do mercado futuro; e qualquer outra visão sobre os serviços futuros.

Os valores dos parâmetros de entrada usados na metodologia de cálculo de espectro estão descritos no capítulo 8 do Report M.2072 e foram providos para três intervalos de tempo: ano 2010; 2015 e 2020. A Figura 3.1 apresenta o processo utilizado para a análise dos dados de mercado.

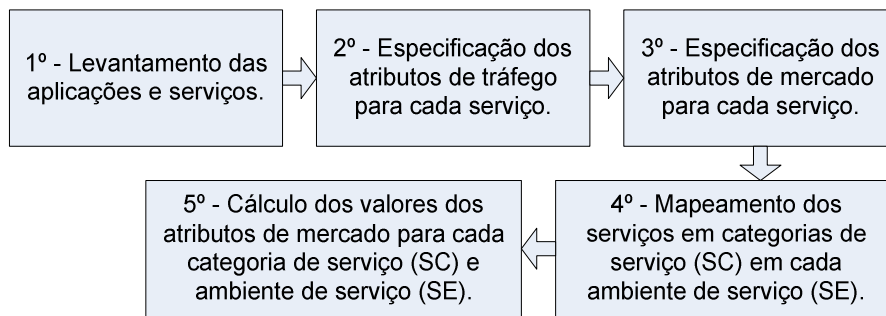


Figura 3.1 – Processo de análise dos dados de mercado.

Para explicar os passos do fluxograma da Figura 3.1, é necessário antes definir a terminologia utilizada na análise dos dados de mercado. É considerada uma aplicação aquela que é comum e essencial o suficiente para categorizar, concisa e apropriadamente, todos os serviços.

Os serviços são os elementos básicos que compõem uma aplicação e supõe-se que os mesmos ocorram independentemente uns dos outros. Por exemplo, usar o serviço VoD (*Voice on Demand*) não depende do uso do serviço AoD (*Audio on Demand*). Uma outra suposição é que todos os serviços mapeados em uma mesma categoria possuem propriedades idênticas e independentes nos atributos de mercado.

Os parâmetros dos atributos de mercado estão relacionados à perspectiva dos usuários e são obtidos a partir de pesquisa sobre o mercado. Os parâmetros dos atributos de tráfego

estão relacionados com as características de tráfego dos serviços e são obtidos por meio da análise das tendências tecnológicas.

### **3.2.1 - Aplicações, serviços e respectivos atributos de tráfego**

Como a lista das aplicações e serviços é um dos fatores mais importantes para calcular a necessidade de espectro, foi levantado o maior número possível de aplicações e serviços esperados para o futuro visando tornar a estimativa mais confiável.

Com a lista de aplicações e serviços mapeada, os valores dos atributos de tráfego, como a taxa de bit média e a duração média da sessão em cada tipo de serviço, podem ser especificados. Uma lista de aplicações e serviços, juntamente com os respectivos valores típicos de seus atributos de tráfego, é exemplificada na Tabela 3.1. Esses valores são usados para a decomposição de dados de mercado das aplicações não especificados na pesquisa da ITU-R.

As naturezas da variação do tempo e da variação regional do tráfego em diferentes RATGs fornecem uma oportunidade para aumentar a eficiência da utilização do espectro por meio do uso de redes coordenadas e esquemas FSU (*Flexible Spectrum Usage*). A idéia básica nesse conceito é não haver faixas fixas de espectro alocadas geograficamente para cada RATG, mas permitir aos RATGs cederem espectro uns aos outros, durante intervalos de tempo nos quais o espectro não está sendo usado. Se um perfeito esquema FSU fosse utilizado, então todo o espectro requerido para suportar a demanda de tráfego poderia ser alocado apenas para a rede de acesso rádio, RAN (*Radio Access Network*), ao invés de ser alocado a cada RATG. Esses modelos de variação de tempo são vistos, na maioria das RATs, como uma consequência da mudança do ambiente do usuário dependendo da hora do dia.

Visando calcular o espectro dinâmico de um RATG, os valores dos atributos de mercado precisam ser providos em um intervalo de tempo. A economia de espectro executável, a partir da aplicação do esquema FSU, aumentará juntamente com a resolução do tempo com que os valores dos atributos de mercado possam ser providos.



Tabela 3.1 – Exemplos de aplicações e de serviços e seus atributos de tráfego [9].

Aplicações	Serviços	Atributos de tráfego		
		Taxa de bit média	Duração média da sessão	
Aplicações existentes	Voz ( <i>low rate data and low multimedia / conversacional</i> )	64 kbit/s	35-610 s	
	Videofone ( <i>medium multimedia/ conversacional</i> )	384 kbit/s	60-210 s	
	Pacote	<i>E-mail (very low rate data/ background)</i>	1 kbit/s	6-10 s
		<i>Video mail (medium multimedia/ background)</i>	512 kbit/s	6-37 s
		<i>Broadcasting móvel (high multimedia/ streaming)</i>	5 Mbit/s	0-659 s
		<i>Acesso à Internet (high multimedia/)</i>	10 Mbit/s	0-700s
Sistemas de monitoramento nas cidades	Voz ( <i>low rate data and low multimedia / conversacional</i> )	64 kbit/s	35-610 s	
	Comunicação de vídeo ( <i>medium multimedia/ conversacional</i> )	384 kbit/s	60-210 s	
	Transmissões à média taxa de dados para sistemas de monitoramento e informação nas cidades ( <i>medium multimedia/ interativo</i> )	384 kbit/s	1-76 s	
	Transmissões à baixa taxa de dados para reserva de restaurantes, etc. ( <i>very low rate data/ interativo</i> )	1 kbit/s	4-24 s	
	Transferência de arquivos ( <i>super-high multimedia/ background</i> )	50 Mbit/s	0-54 s	

### 3.2.2 - Cálculo dos valores dos atributos de mercado

O terceiro passo do processo de análise dos dados coletados do mercado consiste em especificar os valores de densidade de usuários por km<sup>2</sup> e a taxa de chegada de sessões de serviço por usuário, para cada serviço, em cada ambiente de serviço e intervalo de tempo. Adicionalmente, as classes de mobilidade e valores de  $J_m$  apresentados, respectivamente, nas Tabelas 2.3 e 2.4, são também necessários para a distribuição do tráfego e são consideradas atributos de mercado. A Tabela 3.2 exemplifica as respostas aos parâmetros perguntados no questionário sobre mercado e serviços.

Na prática, os parâmetros da Tabela 3.1 são utilizados como entrada na etapa 3. O resultado dessa etapa é então combinado na Tabela 3.2, que já pode incluir alguns resultados das respostas aos questionários.

Tabela 3.2 – Exemplos de respostas ao questionário sobre mercado e serviços [9].

Aplicações	Serviços s: índice	SC n	SE m	Atributos de Mercado							
				Densidade de usuários $U_{m,t,s}$ [usuários/km <sup>2</sup> ]	Taxa de chegada de sessões por usuário $Q_{m,t,s}$ [sessões/(h · usuário)]	Taxa de bit média do serviço $r_s$ [bit/s]	Duração média da sessão $\mu_{m,t,s}$ [s/sessão]	Faixa de mobilidade (%) $MR_{m,s}$			
								Estacionária	Baixa	Alta	Super-alta
Sistemas de monitoramento nas cidades	Serviços de informação e monitoramento s = 1	18	1	600	0,100	574	8	80	80	60	20
			2	1.300	0,996	595	16	20	20	0	0
			3	20	0,100	990	2	20	0	0	0
	Reservas s = 2	15	1	3.000	0,498	2	2	1	1	55	55
			2	3.000	0,996	20	20	0	0	0	0

No quarto passo, cada serviço pode ser mapeado dentro de uma categoria (SC) segundo o seu tipo e a classe de tráfego, como exemplificado na Tabela 3.3. Todos os serviços listados na Tabela 3.2 devem ser mapeados na Tabela 3.3. Essa última tabela é montada para atender cada ambiente de serviço e, assim, são necessárias seis tabelas para cobrir os seis ambientes de serviço.

Finalmente, no quinto e último passo, são calculados os valores dos atributos de mercado para cada categoria de serviço, ambiente de serviço e intervalo de tempo por meio da formulação matemática apresentada a seguir. Nessa etapa, os valores das Tabelas 3.2 e 3.3 são utilizados como parâmetros de entrada. Os resultados são compilados na Tabela 3.4, separadamente para *uplink* e *downlink*.

Tabela 3.3 – Mapeamento dos serviços dentro das categorias.

Classe de tráfego Tipo de serviço	Conversação	<i>Streaming</i>	Interativo	<i>Background</i>
<i>Super-high multimedia</i> (de 30 Mbit/s a 100 Mbit/s / 1 Gbit/s)	SC1 Não se aplica	SC6 - Rádio via Internet; - Transações e monitoramento a média taxa de dados.	SC11 - MMS; - <i>Browsing</i> ; - Serviços de loteria e jogos; - <i>M-payment</i> ; - Serviços baseados em localização /procura localizada, navegação, informação de trânsito, pontos de interesse; - Monitoramento de atividades físicas, <i>uploading</i> de dados biomédicos ou biofísicos; - Trabalho colaborativo incluindo troca de informações multimídia e compartilhamento de arquivos.	SC16 - <i>E-mail</i> de baixa prioridade, SMS, MMS, LBS; - Serviços máquina a máquina.
<i>High multimedia</i> (<30 Mbit/s)	SC2 - Videoconferência de alta qualidade; - Telefone multimídia; - HDTV e vídeo móveis; - <i>Broadcast</i> IP de HDTV e vídeo; - Trabalho colaborativo (compartilhamento de aplicações).	SC7 - Entretenimento/cinema ( <i>streaming</i> de vídeo); - Entretenimento/ <i>broadcasting</i> de programas ( <i>streaming</i> de vídeo); - Aplicações comerciais de grande volume; - Resgate emergencial eletrônico ( <i>e-emergency rescue</i> ), serviços de <i>streaming</i> .	SC12 - Mensagens de vídeo; - <i>Browsing</i> ; - Comércio móvel; - <i>Download</i> de músicas; - <i>Streaming</i> e <i>download</i> de vídeo; - Jogos interativos; - Trabalho colaborativo (compartilhamento de aplicações); - Aplicações comerciais de grande volume; - Notificações e informações de emergência e acidentes, previsão de acidentes.	SC17 - Internet, <i>Intranet</i> e <i>Extranet</i> móveis; - Serviços de navegação; - Cuidados com a saúde, consultas, diagnósticos remotos, informações sobre medicamentos e fornecimento de informações médicas; - Qualidade de vida, educação, controle e monitoramento remoto, serviços de informação, <i>e-learning</i> , notícias e clima; - Transferência de arquivos ( <i>peer-to-peer</i> ); - Aplicações comerciais.

Classe de tráfego / Tipo de serviço	Conversação	Streaming	Interativo	Background
<p><i>Medium multimedia</i> (&lt;2 Mbit/s)</p>	<p>SC3</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vídeo-telefonia;</li> <li>- Vídeo fone de alta qualidade;</li> <li>- Vídeo-conferência;</li> <li>- TV móvel, broadcast de IP TV;</li> <li>- Telemedicina;</li> <li>- Transações seguras;</li> <li>- Rádio IP (Web).</li> </ul>	<p>SC8</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Vídeo interativo e vídeo-conferência;</li> <li>- <i>Streaming</i> de vídeo, áudio e TV;</li> <li>- Jogos interativos;</li> <li>- Monitoramento para o <i>uploading</i> de vídeo;</li> <li>- Instruções e monitoramento para atividades físicas;</li> <li>- Serviços de streaming de vídeo e <i>e-learning</i>;</li> <li>- Observação e inspeção por meio de câmeras de vídeo (câmeras em rede).</li> </ul>	<p>SC13</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Multimídia de taxa alta e vídeo-conferência;</li> <li>- Mensagens com fotografias;</li> <li>- Serviços de mensagens (MMS/ IMS/ SMS);</li> <li>- <i>Web browsing</i>;</li> <li>- Comércio móvel com segurança, transação bancária móvel e aplicações comerciais;</li> <li>- Voto eletrônico e <i>e-government</i>;</li> <li>- Serviços baseados em localização;</li> <li>- <i>Streaming</i> e <i>download</i> de vídeo;</li> <li>- Trabalho colaborativo (compartilhamento de aplicações).</li> </ul>	<p>SC18</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mensagens com fotografias;</li> <li>- <i>Intranet/Extranet</i> comercial;</li> <li>- <i>E-learning</i> e serviços de <i>background</i>;</li> <li>- Internet móvel.</li> </ul>
<p><i>Low rate data and low multimedia</i> (&lt;144 kbit/s)</p>	<p>SC4</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- VoIP;</li> <li>- Vídeo-telefonia;</li> <li>- Vídeo-inspeção com varredura lenta;</li> <li>- Controles industriais;</li> <li>- Resgate emergencial eletrônico;</li> <li>- Serviços de conversação banda larga.</li> </ul>	<p>SC9</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Rádio via Internet;</li> <li>- Transações e monitoramento a média taxa de dados.</li> </ul>	<p>SC14</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- MMS;</li> <li>- <i>Browsing</i>;</li> <li>- Serviços de loteria e jogos;</li> <li>- <i>M-payment</i>;</li> <li>- Serviços baseados em localização /procura localizada, navegação, informação de trânsito, pontos de interesse;</li> <li>- Monitoramento de atividades físicas, <i>uploading</i> de dados biomédicos ou biofísicos;</li> <li>- Trabalho colaborativo incluindo troca de informações multimídia e compartilhamento de arquivos.</li> </ul>	<p>SC19</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>E-mail</i> de baixa prioridade, SMS, MMS, LBS;</li> <li>- Serviços máquina a máquina.</li> </ul>
<p><i>Very low rate data</i> (&lt;16 kbit/s)</p>	<p>SC5</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Telefonia de voz;</li> <li>- VoIP para longa distância;</li> <li>- <i>e-learning</i> e serviços de conversação.</li> </ul>	<p>SC10</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Transações a baixa taxa de dados;</li> <li>- Monitoramento da saúde.</li> </ul>	<p>SC15</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- VoIP;</li> <li>- SMS;</li> <li>- Mensagem de voz;</li> <li>- <i>Web browsing</i>;</li> <li>- Transmissões a baixa taxa de dados (ex.: serviços de monitoramento)</li> </ul>	<p>SC20</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- <i>E-mail</i> de baixa prioridade, SMS, MMS;</li> <li>- Telemetria.</li> </ul>

Tabela 3.4 – Atributos de mercado por categoria/ambiente de serviço.

SC $n$	SE $m$	Atributos de Mercado							
		Densidade de usuários $U_{m,t,s}$ [usuários/km <sup>2</sup> ]	Taxa de chegada de sessões por usuário $Q_{m,t,s}$ [sessões/(h · usuário)]	Taxa de bit média do serviço $r_s$ [bit/s]	Duração média da sessão $\mu_{m,t,s}$ [s/sessão]	Faixa de mobilidade (%) $MR_{m,s}$			
						Estacionária	Baixa	Alta	Super-alta
SC1	SE1	$U_{1,t,1}$	$Q_{1,t,1}$	$r_{1,t,1}$	$\mu_{1,t,1}$	80	20	0	0
	SE2	$U_{2,t,1}$	$Q_{2,t,1}$	$r_{2,t,1}$	$\mu_{2,t,1}$	..	..	..	..
	...	...	...	...	...	...	...	...	...
	SE6	$U_{6,t,1}$	$Q_{6,t,1}$	$r_{6,t,1}$	$\mu_{6,t,1}$	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
SC20	...	...	...	...	...	...	...	...	...

Os valores requeridos para um ambiente de serviço  $SE_m$ , em um intervalo de tempo  $t$ , e para uma categoria de serviço  $SC_n$  são derivados a partir dos valores dos parâmetros de cada serviço.

A densidade de usuários [usuários/km<sup>2</sup>] de uma categoria de serviço é o somatório das densidades de usuários de cada serviço mapeado naquela categoria de serviço. A densidade de usuários é calculada pela expressão:

$$U_{m,t,n} = \sum_{s \in n} U_{m,t,s} \quad (3.1)$$

na qual  $U_{m,t,n}$  e  $U_{m,t,s}$  representam a densidade de usuário de uma categoria de serviço  $n$  e a densidade de usuário de um serviço  $s$  mapeado dentro dessa categoria, respectivamente.

A taxa de chegada de sessões por usuário [sessões/(s·usuário)] de uma categoria de serviço é a média ponderada da taxa de chegada de sessões por usuário de cada serviço mapeado dentro dessa categoria. O peso de cada serviço é a densidade de usuário e a expressão matemática é a seguinte:

$$Q_{m,t,n} = \frac{\sum_{s \in n} U_{m,t,s} Q_{m,t,s}}{U_{m,t,n}} \quad (3.2)$$

na qual  $Q_{m,t,n}$  e  $Q_{m,t,s}$  representam a taxa de chegada de sessões por usuário da categoria de serviço  $n$  e a taxa de chegada de sessões por usuário do serviço  $s$  dentro dessa categoria, respectivamente.

A duração média da sessão [segundo/sessão] de uma categoria de serviço é a média ponderada da duração média da sessão de cada serviço mapeado nessa categoria. O peso é a taxa de chegada de sessões por área. Salienta-se que a unidade de medida de tempo “segundo” usada para a duração da sessão deve ser distinguida da unidade de tempo “s”, usada para medir um intervalo de tempo comum. A duração média da sessão é dada por:

$$\mu_{m,t,n} = \sum_{s \in n} w_{m,t,s} \mu_{m,t,s} \quad (3.3)$$

na qual  $\mu_{m,t,n}$  e  $\mu_{m,t,s}$  representam a duração média da sessão da categoria de serviço  $n$  e a duração média da sessão do serviço  $s$  dentro dessa categoria, respectivamente, e  $w_{m,t,s}$  é obtido pela expressão

$$w_{m,t,s} = \frac{U_{m,t,s} Q_{m,t,s}}{U_{m,t,n} Q_{m,t,n}} \quad (3.4)$$

A taxa de bit média [bits/segundo] de uma categoria de serviço é a média ponderada das taxas de bit médias de cada serviço mapeado nessa categoria. O peso é o volume de tráfego (soma das durações médias de todas as sessões que chegaram durante o mesmo intervalo de tempo) por área. A taxa de bit média é determinada usando-se as expressões:

$$r_{m,t,n} = \sum_{s \in n} \bar{w}_{m,t,s} r_{m,t,s} \quad (3.5)$$

$$\bar{w}_{m,t,s} = \frac{U_{m,t,s} Q_{m,t,s} \mu_{m,t,s}}{U_{m,t,n} Q_{m,t,n} \mu_{m,t,n}} \quad (3.6)$$

em que  $r_{m,t,n}$  e  $r_{m,t,s}$  representam a taxa de dados de uma categoria de serviço  $n$  e a taxa de dados do serviço  $s$  dentro dessa categoria, respectivamente.

A razão de mobilidade de uma categoria de serviço é a média ponderada de cada razão de mobilidade de um usuário de cada serviço mapeado nessa categoria. A ponderação de cada serviço é calculada como a razão entre o tráfego oferecido de um serviço sobre o tráfego

total oferecido da categoria de serviço, dentro do ambiente de serviço, por meio da expressão:

$$MR\_market_{m,t,n} = \sum_{s \in n} w_{m,t,s} MR\_market_{m,s} \quad (3.7)$$

na qual  $MR\_market_{m,t,n}$  e  $MR\_market_{m,s}$  representam a razão de mobilidade da categoria de serviço  $n$  e a razão de mobilidade do serviço  $s$  dentro dessa categoria, respectivamente. Salienta-se que a equação (3.7) pode ser aplicada em todos os casos de mobilidade.

O parâmetro de mercado  $MR\_market$  representa a razão de mobilidade para as quatro classes de mobilidade definidas no Report ITU-R M.2072: estacionária ( $sm$ ); baixa ( $lm$ ); alta ( $hm$ ); e super-alta mobilidade ( $shm$ ) [9].

Conforme abordado anteriormente, os conceitos das classes de mobilidade extraídos dos estudos de mercado foram reclassificados, na metodologia de cálculo de espectro, em apenas 3 classes de mobilidade: estacionária/pedestriana ( $sm$ ), baixa ( $lm$ ) e alta mobilidade ( $hm$ ). Dessa forma, torna-se necessário mapear a razão de mobilidade  $RM\_market$  de acordo com os fatores de distribuição de mobilidade  $J_m$  apresentados na Tabela 2.4. A razão de mobilidade para a classe mobilidade estacionária é obtida a partir da equação:

$$MR\_sm_{m,t,n} = MR\_market\_sm_{m,t,n} + MR\_market\_lm_{m,t,n} \quad (3.8)$$

A razão de mobilidade para a classe baixa mobilidade é dada como:

$$MR\_lm_{m,t,n} = J_m \cdot MR\_market\_hm_{m,t,n} \quad (3.9)$$

E, finalmente, a razão de mobilidade para a classe alta mobilidade é

$$MR\_hm_{m,t,n} = (1 - J_m) \cdot MR\_market\_hm_{m,t,n} + MR\_market\_shm_{m,t,n} \quad (3.10)$$

### 3.3 – DISTRIBUIÇÃO DO TRÁFEGO

Nesta seção, o tráfego obtido anteriormente, por meio da demanda do mercado, para cada ambiente de serviço, intervalo de tempo e categoria de serviço, será distribuído entre os possíveis RATGs e ambientes rádio. Esta tarefa corresponde à etapa 3 da metodologia de dimensionamento de espectro, conforme mostrado na Figura 2.1.

Cada ambiente de serviço é suportado por um ou mais RATGs e, dessa forma, o tráfego por ambiente de serviço pode ser distribuído em parcelas de tráfego por RATG. Os seguintes parâmetros são usados como entrada para a distribuição de tráfego proposta:

- Os valores de tráfego por SC e SE que foram obtidos como saída da etapa 2, da Figura 2.1, da metodologia e apresentados conforme a Tabela 3.4;
- A matriz de definição dos ambientes de serviço de acordo com a etapa 1, da Figura 2.1, da metodologia, incluindo os possíveis REs e os percentuais de cobertura da população para cada SE, conforme exemplificado na Tabela 2.9;
- As matrizes de definição dos RATGs, de acordo com a etapa 1, Figura 2.1, da metodologia, conforme exemplificado nas Tabelas 2.10, 2.11, 2.12 e 2.13;
- Frações de distribuição do tráfego entre os RATGs disponíveis, conforme exemplificado na Tabela 3.6.

Como resultado, o processo gera o tráfego oferecido para cada categoria de serviço  $n$  em cada ambiente de serviço  $m$  e intervalo de tempo  $t$ , dividido entre os RATGs e REs. Se a categoria de serviço é atendida por meio de comutação por circuito, o resultado será a taxa de chegada de sessões média e a taxa de bit média da SC  $n$ , no SE  $m$  e intervalo de tempo  $t$ , por célula ou setor do RATG  $rat$  e RE  $p$ . Se a categoria de serviço é atendida por meio de comutação por pacotes, o resultado será a taxa de bit agrupada da SC  $n$ , no SE  $m$  e intervalo de tempo  $t$ , por célula ou setor do RATG  $rat$  e RE  $p$ . Os valores para ambas as formas de comutação (por circuito e pacote) são calculados mais a frente nessa seção.

### 3.3.1 - Frações de distribuição de tráfego

As taxas de chegada de sessões são distribuídas dentro dos RATGs e REs por meio das frações de distribuição de tráfego  $\xi_{m,t,n,rat,p}$ . As frações de distribuição são obtidas separadamente para as diferentes SCs, em diferentes SEs e intervalos de tempo, para o uplink e downlink devido aos valores distintos de tráfego em cada enlace. As regras seguintes são usadas para o cálculo dos fatores  $\xi_{m,t,n,rat,p}$ . As regras obedecem aos parâmetros de entrada definidos anteriormente.

As frações de distribuição do tráfego são calculadas em três fases. A Fase 1 determina que combinações de RATG e RE não possam suportar uma dada categoria de serviço em um dado ambiente de serviço. As frações de distribuição correspondentes são setadas em 0



enquanto as combinações possíveis são setadas em 1. A Fase 1 seta as frações de distribuição de tráfego em 0:

- No RATG4 para categorias de serviço *unicast*;
- Nos REs que não existem no ambiente de serviço considerado, conforme a definição de ambientes de serviço apresentada na Tabela 2.6;
- Nos REs que não são suportados por um RATG, conforme exemplificado nas Tabelas 2.10, 2.11, 2.12 e 2.13;
- Nas combinações entre RATG e RE em que a taxa de dados da aplicação, conforme exemplificado nas Tabelas 2.10, 2.11, 2.12 e 2.13, é menor que a taxa de dados requerida por uma categoria de serviço, de acordo com o exemplificado na Tabela 3.4; e
- No ambiente rádio do tipo macro-célula para todos aqueles RATGs que não suportam todas as velocidades associadas às classes alta mobilidade conforme exemplificado nas Tabelas 2.10, 2.11, 2.12 e 2.13.

Os resultados da Fase 1 são apresentados em tabelas que contêm as possíveis combinações setadas em zero ou um. A Tabela 3.5 mostra um exemplo limitado a três SEs, seis SCs, um RATG e um intervalo de tempo. A tabela completa foi implementada no Microsoft Excel e contempla todos os seis SEs e vinte SCs.

Tabela 3.5 – Exemplo das possíveis combinações entre SC, SE e RE para cada RATG e intervalo de tempo após a fase 1 da distribuição de tráfego.

Categoria de Serviço	SE1				SE2				SE3			
	Macro	Micro	Pico	Hot spot	Macro	Micro	Pico	Hot spot	Macro	Micro	Pico	Hot spot
SC <sub>1</sub>	1	1	1	0	1	1	1	0	1	1	1	0
SC <sub>2</sub>	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
SC <sub>3</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SC <sub>4</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SC <sub>5</sub>	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0
SC <sub>6</sub>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

A razão de distribuição depende da disponibilidade do RATG em cada RE e SE. Conforme apresentado anteriormente, a Fase 1 exemplifica na Tabela 3.5 que RATGs estão disponíveis em cada RE e SE.

Na Fase 2 é executada a distribuição do tráfego entre os RATGs, por meio dos valores exemplificados na Tabela 3.6. Esses valores são parâmetros de entrada usados na metodologia de cálculo de espectro. Para cada combinação entre categoria de serviço, ambiente rádio, ambiente de serviço e intervalo de tempo, as frações de distribuição são lidas a partir da Tabela 3.6, de acordo com a linha que corresponde à disponibilidade dos RATGs, para cada combinação dada na Tabela 3.5.

Tabela 3.6 – Exemplo das frações de distribuição do tráfego entre os RATGs disponíveis.

RATGs disponíveis	Razão de distribuição (%)			
	RATG1	RATG2	RATG3	RATG4
1	100	–	–	–
2	–	100	–	–
3	–	–	100	–
4	–	–	–	100
1, 2	20	80	–	–
1, 3	20	–	80	–
1, 4	10	–	–	90
2, 3	–	20	80	–
2, 4	–	10	–	90
3, 4	–	–	10	90
1, 2, 3	20	20	60	–
1, 2, 4	10	10	–	80
1, 3, 4	10	–	10	80
2, 3, 4	–	10	10	80
1, 2, 3, 4	10	10	10	70

A Fase 3 distribui o tráfego entre os ambientes rádio com base nas faixas de mobilidade e percentuais de cobertura. De acordo com o definido anteriormente, a metodologia de cálculo de espectro considera três classes de mobilidade: estacionária/pedestriana (*sm*), baixa (*lm*) e alta mobilidade (*hm*). O mapeamento das classes de mobilidade nos ambientes rádio é feito de acordo com a Tabela 3.7. Assume-se que esse mapeamento é o mesmo para todos os RATGs. As faixas de velocidade para cada classe de mobilidade e o parâmetro velocidade máxima suportada de cada ambiente rádio devem ser escolhidos adequadamente.

Tabela 3.7 – Mapeamento das classes de mobilidade de acordo com o ambiente rádio.

<b>Classe de mobilidade</b>	<b>Ambiente Rádio</b>
Alta mobilidade	Apenas macro-célula
Baixa mobilidade	Macro e micro-célula
Estacionária/ pedestriana	Todos os ambientes rádio

A distribuição de tráfego segue o princípio de usar o ambiente rádio com a menor mobilidade possível que satisfaça aos requerimentos da aplicação. A razão é que as células *hot-spot* e as pico-células estão geralmente oferecendo capacidades maiores e são mais eficientes espectralmente que as micro-células. O mesmo se aplica à relação entre micro e macro-células. Considerando-se apenas esse princípio, basicamente todo o tráfego da classe estacionária/pedestriana deveria ser direcionado para os ambientes rádio do tipo *hot-spot* e pico-células, o tráfego da classe baixa mobilidade para as micro-células e o tráfego da classe alta mobilidade para as macro-células (sempre considerando que os respectivos ambientes rádio estão disponíveis, senão o tráfego deveria ser direcionado para o próximo ambiente rádio com suporte a maior mobilidade). Entretanto, na prática a área total de um ambiente de serviço particular é coberta somente até determinado percentual  $X$  por cada ambiente rádio, por exemplo, por pico-células.

A Tabela 2.9 exemplifica o percentual de cobertura da população de cada ambiente rádio, em cada ambiente de serviço. Os percentuais de cobertura são independentes do RATG. No entanto, se um dado RATG não suporta um dado ambiente rádio, então a correspondente taxa de dados na borda da célula, dessa combinação RATG/ambiente rádio, deve ser setada em zero, e assim a Fase 1 da distribuição de tráfego também forçará ao valor zero a correspondente razão de distribuição.

O percentual de cobertura da população estabelece um limite à porção do tráfego, em termos de densidade de tráfego, que pode ser distribuída a esse ambiente rádio. Por meio dos percentuais de cobertura da população  $X_{hs}$ ,  $X_{pico}$ ,  $X_{micro}$  e  $X_{macro}$ , respectivamente, dos ambientes rádio *hot-spot*, pico-célula, micro-célula e macro-célula, o algoritmo distribui as seguintes proporções de tráfego:

$$\xi_{pico\&hs} = \min(X_{pico} + X_{hs}, MR_{sm}) \quad (3.11)$$

$$\xi_{micro} = \min(X_{micro}, (MR_{sm} + MR_{lm}) - \xi_{pico\&hs}) \quad (3.12)$$

$$\xi_{macro} = 1 - \xi_{pico\&hs} - \xi_{micro} \quad (3.13)$$

Os parâmetros  $MR_{sm}$  e  $MR_{lm}$  são as frações do tráfego oferecido nas classes de mobilidade *stationary* e baixa mobilidade, respectivamente. Nas equações de (3.11) a (3.13), assume-se que:

$$MR_{sm} + MR_{lm} + MR_{hm} = 1 \quad (3.14)$$

Entre os ambientes hot-spot e pico-célula, o tráfego é distribuído de acordo com a relação entre as suas respectivas frações de cobertura da população:

$$\xi_{hs} = \xi_{pico\&hs} \cdot X_{hs} / (X_{pico} + X_{hs}) \quad (3.15)$$

$$\xi_{pico} = \xi_{pico\&hs} \cdot X_{pico} / (X_{pico} + X_{hs}) \quad (3.16)$$

As categorias de serviço que podem ser providas por *multicasting* são tratadas diferentemente. Elas sempre são distribuídas aos RATGs que oferecem suporte ao modo de transmissão *multicast*, a determinada categoria de serviço e ao ambiente rádio com as maiores células disponíveis. Por exemplo, as razões de distribuição são setadas na maior célula desses RATGs. Isso corresponde aos casos nos quais o serviço *multicasting* é provido simultaneamente por todos esses RATGs. A razão de cobertura da população não é considerada no caso *multicasting*, pois esse tipo de tráfego não considera a densidade de usuários. Nota-se que, como resultado dessa premissa, uma categoria de serviço pode ser distribuída a múltiplos RATGs e a soma resultante das frações de distribuição sobre os RATGs pode exceder 100%.

Salienta-se que a metodologia de cálculo de espectro não leva em consideração se é entregue um mesmo conteúdo ou conteúdos distintos de serviço de dados *multicast*, a diferentes ambientes de serviço dentro de uma mesma célula. Nos casos onde o *multicasting* entrega os mesmos dados, a necessidade de espectro é menor que nos casos onde são entregues conteúdos distintos.

### 3.3.2 - Distribuição das taxas de chegada de sessões

A taxa de chegada de sessões por área [sessões/(s · km<sup>2</sup>)] de uma categoria de serviço  $n$ , em um ambiente de serviço  $m$ , distribuída no RATG  $rat$ , dentro do ambiente de rádio  $p$ , no intervalo de tempo  $t$  —  $P_{m,t,n,rat,p}$  — é calculada a partir da razão de distribuição  $\xi_{m,t,n,rat,p}$ ,

densidade de usuário  $U_{m,t,n}$  e taxa de chegada de sessões por usuário  $Q_{m,t,n}$  (parâmetros esses apresentados anteriormente) pela seguinte equação:

$$P_{m,t,n,rat,p} = \xi_{m,t,n,rat,p} \cdot U_{m,t,n} \cdot Q_{m,t,n} \quad (3.17)$$

O somatório das frações de distribuição sobre o RATG índice  $rat$  e ambiente de rádio índice  $p$  é igual a 1:

$$\sum_{rat} \sum_p \xi_{m,t,n,rat,p} = 1 \quad (3.18)$$

Conseqüentemente:

$$\sum_{rat} \sum_p P_{m,t,n,rat,p} = U_{m,t,n} \cdot Q_{m,t,n} \quad (3.19)$$

O tráfego gerado por todos os usuários dentro de uma célula precisa ser acumulado. A taxa de chegada de sessões por célula [sessões/(s · célula)] é calculada como:

$$P'_{m,t,n,rat,p} = P_{m,t,n,rat,p} \cdot A_{d,p} \quad (3.20)$$

em que  $A_{d,p}$  é a área da célula [km<sup>2</sup>] do RATG  $rat$ , com teledensidade  $d$  e no ambiente rádio  $p$ . A teledensidade  $d$  é determinada unicamente por meio do ambiente de serviço  $m$ , conforme a Tabela 2.6.  $P'_{m,t,n,rat,p}$  representa a taxa de chegada de sessões por célula de uma categoria de serviço  $n$ , em um RATG  $rat$ , ambiente de serviço  $m$ , ambiente de rádio  $p$  e em um intervalo de tempo  $t$ .

Para o modo de transmissão móvel *multicast*, é definida uma outra equação. Presume-se que as categorias de serviço *multicast* são providas, simultaneamente, a múltiplos usuários, por meio de um recurso rádio compartilhado. Dessa maneira, a densidade de usuário tem um efeito desprezível. A distribuição do tráfego nos ambientes rádio dos grupos RATs que suportam *multicast* móvel é, então, implementada pela taxa de chegada de sessões dada pela equação (3.17), fazendo  $U_{m,t,n}=1$  e, portanto, tem-se:

$$P'_{m,t,n,rat,p} = \xi_{m,n,rat,p} \cdot Q_{m,t,n} \quad (3.21)$$

### 3.3.3 - Cálculo do tráfego oferecido

Para o cálculo do espectro, é necessário antes calcular o tráfego oferecido para cada categoria de serviço. As classes de tráfego conversacional e *streaming* (categorias de serviço de 1 a 10) são atendidas por meio de comutação por circuito, enquanto que as

classes *background* e interativo (categorias de serviço de 11 a 20) são atendidas via comutação por pacotes. Dessa forma, o tráfego oferecido é calculado de acordo com os parâmetros de entrada requeridos nos métodos de cálculo aplicáveis a comutação por circuito ou por pacotes. O tráfego também deve ser acumulado dentro dos ambientes de serviço que estejam na mesma teledensidade vista na Tabela 2.6.

Para comutação por circuito, a taxa de chegada de sessões  $P'_{m,t,n,rat,p}$ , obtida a partir da funcionalidade de distribuição, e a duração média da sessão  $\mu_{m,t,n}$  são usadas como parâmetros de entrada para o cálculo da capacidade. Em termos matemáticos, o produto entre esses dois parâmetros é equivalente ao tráfego oferecido em Erlangs.

Os valores agregados da taxa de chegada de sessões por célula e a duração média da sessão para diferentes teledensidades  $d$  são coletadas para o tráfego oferecido  $\rho_{d,t,n,rat,p}$  [s/(s · célula)] que é, então, obtido a partir da expressão:

$$\rho_{d,t,n,rat,p} = \sum_{m \in d} P'_{m,t,n,rat,p} \mu_{m,t,n} \quad (3.22)$$

A equação (3.22) representa o somatório das durações médias de todas as sessões de uma categoria de serviço  $n$ , que chegam por unidade de tempo em uma célula com teledensidade  $d$ , RATG  $rat$ , ambiente rádio  $p$  e em um intervalo de tempo  $t$ . A unidade de medida do tráfego oferecido é o Erlang/célula.

Os valores acumulados da taxa média de bit do serviço  $r_{d,t,n,rat,p}$  [bit/s], por teledensidade  $d$ , são obtidos da expressão:

$$r_{d,t,n,rat,p} = \frac{\sum_{m \in d} P'_{m,t,n,rat,p} \mu_{m,t,n} r_{m,t,n}}{\rho_{d,t,n,rat,p}} \quad (3.23)$$

Para as categorias de serviço comutadas por pacotes, o cálculo da capacidade requer o tráfego oferecido expressado em [bit/(s · célula)], que é dado como o tráfego oferecido acumulado nos ambientes de serviço que estão contidos na mesma classe de teledensidade.  $T_{d,t,n,rat,p}$  representa o tráfego oferecido à categoria de serviço  $n$ , no RATG  $rat$ , ambiente rádio  $p$ , teledensidade  $d$  e diferente intervalo de tempo  $t$ . Ele é obtido a partir da equação:

$$T_{d,t,n,rat,p} = \sum_{m \in d} P'_{m,t,n,rat,p} \mu_{m,t,n} r_{m,t,n} \quad (3.24)$$

A equação (3.24) representa o somatório do número de bits incluídos em todas as sessões de uma categoria de serviço  $n$ , que chegam por unidade de tempo em uma célula com teledensidade  $d$ , RATG  $rat$ , ambiente rádio  $p$  e em um intervalo de tempo  $t$ .

### 3.4 – CÁLCULO DA CAPACIDADE REQUERIDA PELO SISTEMA

Na etapa 4 da Figura 2.1 a capacidade requerida do sistema deve atender ao tráfego base oferecido e ao mesmo tempo satisfazer aos requisitos de QoS de cada categoria de serviço  $n$  determinada para cada RATG  $rat$ , ambiente rádio  $p$ , em cada teledensidade  $d$  e intervalo de tempo  $t$ . A capacidade requerida do sistema, dada em bit/s, é determinada separadamente para comutação por circuito e por pacotes. O número de categorias de serviço comutadas por circuito é denotado por  $N_{cs}$ , ao passo que o número de categorias de serviço comutadas por pacote é denotado por  $N_{ps}$ . O número total de categorias de serviço é, então,  $N = N_{cs} + N_{ps}$ .

Os resultados dessa etapa do cálculo são a capacidade requerida do sistema  $C_{d,t,rat,p,cs}$  e  $C_{d,t,rat,p,ps}$  [bit/(s·célula)] para tráfego comutado por circuito e por pacotes, respectivamente.  $C_{d,t,rat,p,cs}$  representa a capacidade requerida pelo sistema para satisfazer os requisitos de QoS de todas as categorias de serviço comutadas por circuito na teledensidade  $d$ , intervalo de tempo  $t$ , RATG  $rat$  e ambiente rádio  $p$ .  $C_{d,t,rat,p,ps}$  é a capacidade requerida pelo sistema para satisfazer os requisitos de QoS de todas as categorias de serviço comutadas por pacote na teledensidade  $d$ , intervalo de tempo  $t$ , RATG  $rat$  e ambiente rádio  $p$ .

#### 3.4.1 - Cálculo da capacidade requerida pelo sistema para o tráfego comutado por circuito

A capacidade requerida do sistema pelas categorias de serviço que utilizam comutação por circuito é determinada pelo número de canais de serviço necessários para atender a uma probabilidade de bloqueio definida e a taxa de dados do canal. A teoria de Erlang é apropriada para calcular a capacidade necessária para obter uma probabilidade de bloqueio menor ou igual ao valor especificado [12]. Os parâmetros de entrada para determinar o número requerido de canais de serviço para sessões comutadas por circuito são os seguintes:

- Tráfego oferecido em Erlangs por célula ou por setor  $\rho_{d,t,n,rat,p}$ ;
- Taxa de dados do canal de serviço  $r_{d,t,n,rat,p}$  para a categoria de serviço  $n$ ; e

- Probabilidade de bloqueio máxima admissível  $\pi_n$ , cujos valores são exemplificados na Tabela 2.5.

A partir deste ponto, os parâmetros  $\rho_{d,t,n,rat,p}$  e  $r_{d,t,n,rat,p}$  serão representados por  $\rho_n$  e  $r_n$ , respectivamente, para facilitar a leitura.

Levando em consideração os ganhos de tronco (*trunking gain*), a fórmula de Erlang-B pode ser estendida para o caso multidimensional que também permite ocupação simultânea de vários canais por uma mesma chamada. Assume-se que as chamadas das  $N_{cs}$  classes compartilham o set de  $v$  [ $v \equiv (v_1, v_2, \dots, v_{N_{cs}})$ ] canais e que cada chamada da classe  $n$  requer  $v_n$  canais simultaneamente ( $1 \leq n \leq N_{cs}$ ). Se uma chamada entrante da classe  $n$  encontra menos que  $v_n$  canais desocupados, então ela é bloqueada e perdida. As chamadas da classe  $n$  chegam por meio de um processo de Poisson de taxa  $P_n$ , independente de outras classes, e possuem tempos de ocupação distribuídos exponencialmente com média  $\mu_n$ . Assim sendo, o tráfego oferecido da classe  $n$  é  $\rho_n$ . Todos os canais utilizados por uma chamada são desocupados ao final do tempo de ocupação.

Fazendo o estado do sistema igual a  $i \equiv (i_1, i_2, \dots, i_{N_{cs}})$ , onde  $i_m$  é o número de chamadas da classe  $m$  ocupando os canais, então a função de distribuição da probabilidade de ocorrer o estado de equilíbrio (*steady-state probability mass function*) tem a forma de um produtório simples:

$$P(i) = G(v)^{-1} \prod_{m=1}^{N_{cs}} \frac{(\rho_m)^{i_m}}{i_m!} \quad (3.25)$$

com:

$$G(k) = \sum_{\{i: 0 \leq v \cdot i \leq k\}} \prod_{m=1}^{N_{cs}} \frac{(\rho_m)^{i_m}}{i_m!}, \quad 1 \leq k \leq v \quad (3.26)$$

na qual  $v \cdot i \equiv \sum_{m=1}^{N_{cs}} v_m i_m$  é o número de canais sendo utilizados quando o sistema está no estado  $i$ .

A probabilidade de bloqueio para as chamadas da classe  $n$  é então dada por:

$$B_n(v) = \sum_{\{i: v \cdot i > v - v_n\}} P(i) = 1 - \frac{G(v - v_n)}{G(v)} \quad (3.27)$$



O cálculo de  $G(k)$  pela Equação (3.26) envolve um esforço computacional muito grande e em razão dessa dificuldade, uma série de algoritmos mais eficientes foi desenvolvida. Entre esses, tem sido preferido computacionalmente o algoritmo recursivo unidimensional de Kaufman [13] e Roberts [14], dada a sua simplicidade. Esse algoritmo recursivo foi adaptado por Takagi [15] para se adequar ao cálculo repetitivo no problema inverso da determinação da capacidade do sistema para satisfazer os requisitos dos usuários quanto a probabilidade de bloqueio.

A partir de  $G(0) = 1$ ,  $G(k)$  é calculado recursivamente para  $k = 1, 2, \dots, v$ , pela expressão:

$$G(k) = \frac{1}{k} \left[ \sum_{j=0}^{k-1} G(j) + \sum_{m=1}^{N_{cs}} v_m \rho_m G(k - v_m) \right] \quad (3.28)$$

na qual  $G(k) = 0$  for  $k < 0$ . Esse algoritmo determina as probabilidades de bloqueio para sistemas com até  $v$  canais, todas ao mesmo tempo, com um intervalo de tempo computacional  $O(N_{cs}v)$  e requisito de memória  $O(v)$ .

O modelo e algoritmo acima são usados para computar a probabilidade de bloqueio para cada uma das  $N_{cs}$  categorias de serviço ao passo que o número total de canais,  $v$ , é dado. Por meio do método inverso, o número total de canais é calculado visando encontrar a condição dentro da probabilidade de bloqueio para cada categoria requerida pelo usuário. A capacidade do sistema é obtida por meio da multiplicação do número total de canais requeridos pela taxa de bit por canal.

Por motivo de conveniência, adota-se  $r$  [bit/s] como taxa de dados unitária, do serviço, por canal. Enquanto a taxa de bit do serviço para a categoria  $n$  é  $r_n$ , o parâmetro  $v_n$  a ser usado equação (3.28) é dado por:

$$v_n = \lceil r_n / r \rceil, \quad 1 \leq n \leq N_{cs} \quad (3.29)$$

na qual  $\lceil x \rceil$  denota o menor número inteiro maior ou igual a  $x$ . Isso significa que o número de canais é contado usando  $r$  como a taxa de dados unitária para cada categoria de serviço.

Adotando-se  $\pi_n$  como a probabilidade de bloqueio da categoria de serviço  $n$  requerida pelo usuário, então o número de canais requeridos por célula,  $\kappa$ , é obtido como o menor valor de  $v$  que satisfaz, simultaneamente, as condições:

$$B_n(v) < \pi_n, \quad 1 \leq n \leq N_{cs} \quad (3.30)$$

Finalmente, a capacidade requerida do sistema  $C_{d,t,rat,p,cs}$  [bit/(s · célula)] para todas as categorias de serviço atendidas por comutação por circuito é dada por:

$$C_{d,t,rat,p,cs} = \kappa \times r \quad (3.31)$$

### 3.4.2 - Cálculo da capacidade requerida pelo sistema para o tráfego comutado por pacotes

A capacidade do sistema necessária para atender a cada requerimento de atraso médio da categoria de serviço é determinada por meio de um modelo, da teoria das filas, aplicável quando os tempos de chegada dos pacotes são independentes e a distribuição do tamanho dos pacotes é aleatória. Na teoria das filas, o modelo é conhecido como sistema M/G/1 com prioridades *non-preemptive priorities*, ou um sistema de filas *head-of-the-line* [16].

Pela notação simplificada de Kendall, o sistema M/G/1 é um sistema com distribuição exponencial do tempo entre as chegadas dos clientes (M/.../...), distribuição aleatória do tempo de serviço (... /G/...) e com apenas um servidor (... /.../1). Neste caso, assume-se que não há limite para o tamanho da fila, a fonte de clientes é infinita, e a disciplina de tratamento é *first-in-first-out*. A prioridade *non-preemptive* significa que mesmo com a chegada de uma chamada com prioridade maior que a da chamada corrente, o serviço da chamada corrente não é interrompido. Ele é completado antes que o serviço da chamada com maior prioridade, recém chegada, seja iniciado. Salienta-se que um nível de prioridade é utilizado para cada categoria de serviço baseada em comutação por pacotes, porém, é também possível agrupar múltiplas categorias de serviço em uma única prioridade. Para cada nível de prioridade, os pacotes entrantes são armazenados em uma fila separada. Dentro de cada fila de nível de prioridade, aplica-se a disciplina *first-come-first-served* (FCFS).

Neste trabalho, uma RAT é modelada de tal forma que possua apenas um canal de pacotes, independentemente do número de canais utilizados em paralelo em uma RAT real, desde que não haja um possível ganho de tronco (*trunking gain*) na multiplexação dos pacotes armazenados no buffer de uma fila para ser transmitidos por meio de um ou mais canais paralelos. Salienta-se que os pequenos *overheads* resultantes da fragmentação e preenchimento são desprezíveis quando são utilizados canais múltiplos paralelos com taxa de bit média ao invés de um único canal com taxa de bit mais alta. A duração do serviço no

sistema de filas é determinada por meio do tamanho do pacote e da taxa de transmissão de dados.

O cálculo da capacidade requerida pelo sistema para tráfego comutado por pacotes demanda os seguintes parâmetros:

- O tráfego base oferecido para cada categoria de serviço, por ambiente de serviço e por célula,  $T_{d,t,n,rat,p}$  [bit/(s·célula)], obtido por meio da equação (3.24);
- A média,  $s_n$  [bit/pacote], e o segundo momento da distribuição,  $s_n^{(2)}$  [bit<sup>2</sup>/pacote], do tamanho do pacote IP, de cada categoria de serviço, de acordo com o exemplificado na Tabela 2.5;
- O atraso médio requerido  $D_n$  de cada categoria de serviço  $n$  dado conforme a Tabela 2.5;
- O ranking de prioridades de todas as categorias de serviço  $n$  com  $n = 1, 2, \dots, N_{ps}$ . Assume-se que a categoria de serviço  $n = 1$  possui a maior prioridade, por exemplo, os pacotes da categoria de serviço  $n = 1$  são atendidos primeiro. A categoria de serviço  $n = N_{ps}$  possui a menor prioridade. A ordenação da prioridade das categorias de serviço é equivalente à numeração das categorias de serviço.

A taxa de chegada de pacotes IP por célula,  $\lambda_n$  [pacotes/(s·célula)], da categoria de serviço  $n$  é obtida por meio da divisão do tráfego base oferecido pelo tamanho médio do pacote:

$$\lambda_{d,t,n,rat,p} = \frac{T_{d,t,n,rat,p}}{s_n} \quad (3.32)$$

Visando aumentar a facilidade de leitura, os índices  $d,t,rat$  e  $p$  serão omitidos a partir deste ponto e, assim,  $\lambda_{d,t,n,rat,p}$  será denotado simplesmente por  $\lambda_n$  até o final desta seção.

A taxa de chegada agrupada para todas as categorias de serviço é denotada por:

$$\lambda_{\leq N_{ps}} = \sum_{n=1}^{N_{ps}} \lambda_n \quad (3.33)$$

A capacidade do sistema,  $C_n$ , que é necessária para obter o atraso médio requerido pela categoria de serviço  $n$  pode ser calculada por meio do procedimento descrito a seguir. O nível de prioridade que requer a maior capacidade determina a capacidade total requerida pelo sistema. Em outras palavras, desde que os requisitos de QoS da categoria de serviço mais demandada sejam atendidos, os requisitos das outras categorias de serviço estarão

supra-atendidos. Dessa forma, a capacidade total requerida pelo sistema é determinada pela expressão:

$$C_{d,t,rat,p,ps} = \max (C_1, C_1, \dots, C_{N_{ps}}) \quad (3.34)$$

Um pacote IP pode ser definido como uma chamada atendida por um sistema de filas. Assim, por meio do uso de prioridades do tipo *non-preemptive* assume-se que cada pacote IP é completamente atendido antes que a alocação do corrente recurso rádio seja mudada para o atendimento a outro pacote. Essa é uma suposição válida, pois, em muitos casos interromper o serviço de um pacote IP causa a perda da capacidade já ocupada por aquele pacote.

O atraso médio do pacote IP ( $D_n$ ), por exemplo, a soma do tempo de espera médio mais a duração média do serviço, para a categoria de serviço  $n$  em um sistema com capacidade  $C$  é dado por:

$$D_n(C) = \frac{\sum_{i=1}^{N_{ps}} \lambda_i s_i^{(2)}}{2 \left( C - \sum_{i=1}^n \lambda_i s_i \right) \left( C - \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i s_i \right)} + \frac{s_n}{C} \quad (3.35)$$

A equação (3.35) foi derivada, por Irnich e Walke [17], a partir da fórmula de Cobham [18] e é aplicável para o cálculo do tempo médio de espera em um sistema de filas M/G/1 com uma única chegada e com prioridade do tipo *non-preemptive*. Essa expressão é utilizada para determinar a capacidade do sistema,  $C_n$ , requerida para satisfazer a condição de QoS:  $D_n(C_n) = D_n$ . Assim,  $C_n$  é calculado por meio da solução da equação cúbica:

$$a_n x^3 + b_n x^2 + c_n x + d_n = 0 \quad (3.36)$$

com coeficientes  $a_n$ ,  $b_n$ ,  $c_n$  e  $d_n$  dados por:

$$\begin{aligned} a_n &= 2D_n \\ b_n &= 2 \left( D_n \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i s_i + \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i s_i \right) + s_n \right) \\ c_n &= 2 \left( D_n \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i s_i \right) \left( \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i s_i \right) + s_n \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i s_i + \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i s_i \right) \right) - \sum_{i=1}^{N_{ps}} \lambda_i s_i^{(2)} \\ d_n &= -2s_n \left( \sum_{i=1}^n \lambda_i s_i \right) \left( \sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i s_i \right) \end{aligned} \quad (3.37)$$

Existem várias alternativas para a resolução de equações cúbicas e entre elas, uma boa prática é a aplicação da fórmula de Cardano [19]. Matematicamente, a equação (3.36) possui três soluções ou raízes. E, para determinar a solução correta, entre essas três raízes, o limite da estabilidade do sistema de filas deve ser considerado, satisfazendo a seguinte condição:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i s_i < C_n \quad (3.38)$$

A condição da equação (3.38) significa que, com o propósito de entregar os pacotes com atraso finito, a capacidade do sistema não pode ser menor que a taxa de chegada agrupada.

### 3.5 – CÁLCULO DA NECESSIDADE DE ESPECTRO

Uma vez determinada a capacidade requerida pelo sistema para atender a demanda de mercado, para as categorias de serviço comutadas por pacotes e por circuitos, passa-se então ao cálculo da necessidade de espectro, objetivo principal deste trabalho.

Primeiramente, levando em consideração que a capacidade do sistema foi calculada separadamente para o uplink e downlink, há a necessidade de agrupar essa capacidade para cada natureza de tráfego, ou seja, para comutação por circuito e por pacotes, respectivamente:

$$C_{d,t,rat,p,cs} = C_{d,t,rat,p,cs,UL} + C_{d,t,rat,p,cs,DL} \quad (3.39)$$

$$C_{d,t,rat,p,pcs} = C_{d,t,rat,p,ps,UL} + C_{d,t,rat,p,ps,DL} \quad (3.40)$$

As equações (3.39) e (3.40) são então combinadas para representar a capacidade do sistema requerida por ambas as formas de tráfego:

$$C_{d,t,rat,p} = C_{d,t,rat,p,cs} + C_{d,t,rat,p,ps} \quad (3.41)$$

em que  $C_{d,t,rat,p,cs}$  [bit/(s · célula)] representa a capacidade requerida pelo tráfego comutado por circuito, em uma área com teledensidade  $d$ , intervalo de tempo  $t$ , RATG  $rat$  e ambiente rádio  $p$ , e  $C_{d,t,rat,p,ps}$  [bit/(s · célula)] representa a correspondente capacidade requerida pelo tráfego comutado por pacotes.

A necessidade de espectro para um RATG  $rat$ , em uma área com teledensidade  $d$ , intervalo de tempo  $t$  e ambiente rádio  $p$  é calculada pela divisão do resultado da equação (3.41) pela eficiência espectral do ambiente rádio, cuja representação matemática é dada por:

$$F_{d,t,rat,p} = \frac{C_{d,t,rat,p}}{\eta_{d,rat,p}} \quad (3.42)$$

em que  $\eta_{d,rat,p}$  [bits/(s · Hz · célula)] é a eficiência espectral do ambiente na teledensidade  $d$ , RATG  $rat$  e ambiente rádio  $p$ , cujos valores são exemplificados na Tabela 2.14.

Se for considerada a existência de tráfego do tipo *mobile multicast*, a capacidade requerida é calculada de forma similar, ou seja, como a soma da capacidade requerida pelo tráfego *multicast* comutado por pacotes e por circuito. De igual forma, a correspondente necessidade de espectro  $F_{d,rat,p,mm}$  é calculada separadamente, por meio dos valores apropriados de eficiência espectral.

Assim, considerando a existência de tráfego *unicast* e *multicast*, a necessidade de espectro é dada, então, pela soma:

$$F_{d,t,rat,p} = F_{d,t,rat,p,(unicast)} + F_{d,t,rat,p,mm} \quad (3.43)$$

### 3.5.1 - Aplicação de ajustes a partir de considerações práticas

Na etapa 6 da metodologia, ilustrada na Figura 2.1, são aplicados ajustes sobre o espectro calculado na etapa anterior. Esses ajustes levam em consideração a demanda mínima de espectro para a operação de uma rede, a necessidade de bandas de guarda e o impacto do número de operadoras. O procedimento para aplicação dos ajustes consiste em quatro etapas descritas a seguir.

Na primeira etapa assume-se que não há, entre operadores, o compartilhamento de espectro no tempo, o que foi definido anteriormente como FSU dentro de um mesmo RATG. Isso porque não é esperada grande variação da carga total de tráfego entre os operadores, a menos que eles estejam focando segmentos de mercado expressivamente distintos. Conseqüentemente, assume-se que a distribuição de espectro entre os operadores de um RATG é fixa. Adicionalmente, assume-se que cada operador tenha disponível a mesma alocação de espectro. Logo, o espectro não ajustado por operador é dado por:

$$F'_{d,t,rat,p} = F_{d,t,rat,p}/N_o \quad (3.44)$$

na qual  $N_o$  é o número de operadores das Tabelas 2.10 e 2.11.

Na segunda etapa, o espectro pode, geralmente, ser usado apenas com a mínima largura de banda requerida,  $MinSpec$ , capaz de alocar uma única portadora a cada célula de uma rede, levando-se em consideração o fator de reuso. A necessidade de espectro deve então ser ajustada de acordo com a expressão:

$$F_{d,t,rat,p} = MinSpec_{rat,p} \cdot \lceil F_{d,t,rat,p} / MinSpec_{rat,p} \rceil \quad (3.45)$$

na qual  $\lceil \rceil$  significa arredondamento para o próximo maior número inteiro e  $MinSpec_{rat,p}$  é obtido a partir das Tabelas 2.10 e 2.11. Salienta-se ainda que para os futuros RATGs, haverá uma mínima largura de banda da portadora que será determinada por meio da necessidade de suportar a almejada taxa de dados usuário (taxa de pico).

Considerando-se que o espectro calculado pode ser particularmente sensível a certos parâmetros, recomenda-se ter cuidado na seleção dos parâmetros de entrada que serão utilizados nos cálculos. Em particular, o impacto da largura de banda mínima por operador (parâmetro *minimum spectrum deployment*), no RATG2, deve ser considerado cuidadosamente. Um valor muito grande para esse parâmetro pode resultar em uma necessidade total de espectro muito maior em relação a que seria requerida se canais de menor largura de banda fossem selecionados. A escolha do tamanho da célula ou setor também deve estar coerente com a taxa de dados, largura de banda do canal e outros parâmetros que afetam o *link budget*. Adicionalmente, a largura de banda mínima por operador também deve estar apropriada às taxas de bit médias do serviço utilizadas nos cálculos.

Na terceira etapa, assume-se que os ambientes rádio pico-célula e hot-spot não podem coexistir em um mesmo cenário. Dessa forma, deve ser considerado o valor máximo da necessidade de espectro encontrado para esses ambientes. Os ambientes macro e micro-célula podem coexistir em um mesmo cenário. Eles também podem coexistir juntamente com o ambiente rádio pico-célula ou hot-spot, respectivamente. Assim, a necessidade de espectro calculada para atender os ambientes macro e micro-célula devem ser somadas ao máximo valor encontrado para os ambientes pico-célula ou hot-spot:

$$F_{d,t,rat} = F_{d,rat,macro} + F_{d,t,rat,micro} + \max(F_{d,t,rat,pico}, F_{d,t,rat,hotspot}) \quad (3.46)$$

Logo, a necessidade total de espectro para todos os operadores é:

$$F'_{d,t,rat} = F_{d,t,rat} \cdot N_o \quad (3.47)$$

Finalmente, na quarta e última etapa de ajustes, são consideradas bandas de guarda. Assume-se que as informações de eficiência espectral já levam em consideração a banda de guarda necessária entre portadoras de um mesmo operador. Isso significa que os valores da eficiência espectral também estão baseados na suposição que ambas as portadoras adjacentes não têm influência, ou essa influência já está inclusa na eficiência espectral. A banda de guarda entre operadores gera uma necessidade adicional de espectro, que passa então a ser dado por:

$$F'_{d,t,rat} = F_{d,t,rat} + (N_o - 1) \cdot G_{rat} \quad (3.48)$$

em que os valores de banda de guarda entre operadores  $G_{rat}$  são parâmetros de entrada dados pelas Tabelas 2.10 e 2.11.

### 3.5.2 - Cálculo da necessidade total de espectro

O cálculo final da necessidade de espectro consiste em agrupar a necessidade calculada para todos os intervalos de tempo e teledensidades. Esse processo é realizado em quatro etapas. Em cada etapa, há duas opções a considerar: cálculo da necessidade de espectro sem a possibilidade de FSU; e cálculo da necessidade de espectro com a possibilidade de FSU. A primeira opção permite o cálculo da necessidade de espectro para qualquer RATG ao passo que a segunda opção possibilita calcular apenas a necessidade de espectro para todos os RATGs conjuntamente, considerando que todos estão aptos ao uso de esquemas FSU.

**Etapa 1** – Nessa etapa, é considerada a dependência temporal da necessidade de espectro.

a1) O espectro necessário para um RATG  $rat$  com teledensidade  $d$ , sem o uso de esquema FSU, é igual ao valor máximo obtido entre todos os intervalos de tempo  $t$ :

$$F_{d,rat} = \max_t (F_{d,t,rat}) \quad (3.49)$$

b1) Com o uso de esquema FSU entre RATGs, a demanda de espectro agrupada para os RATGs que suportam FSU é calculada por meio da soma das demandas de espectro para cada RAT, separadamente para cada teledensidade. Levando em consideração eventuais imperfeições do esquema FSU, é incluído nos cálculos o fator de imperfeição do FSU, Tabelas 2.10 a 2.13. Esse fator aumenta a demanda de espectro, que passa a ser dada pela expressão:



$$F_{d,t,FSU} = FSU_{marg} \cdot \sum_{rat \in \{FSU \ RATs\}} F_{d,t,rat} \quad (3.50)$$

Assim, a necessidade de espectro para os RATGs que utilizam esquema FSU é dada pela máxima demanda de espectro entre todos os intervalos de tempo.

$$F_{d,FSU} = \max_t (F_{d,t,FSU}) \quad (3.51)$$

A necessidade de espectro para os RATGs que não compartilham o esquema FSU é dada por:

$$F_{d,rat,nonFSU} = \max_t (F_{d,t,rat}); \quad rat \notin \{FSU \ RATs\} \quad (3.52)$$

**Etapa 2** – Aqui, considera-se que os ambientes com categorias de teledensidade distintas não sobrepõem as mesmas áreas. Logo, o ambiente com uma categoria de teledensidade, que possuir a maior demanda de espectro, determina a necessidade de espectro para o RATG.

a2) Sem o uso de esquema FSU, a necessidade de espectro para o RATG *rat* é dada por:

$$F_{rat} \max_d = (F_{d,rat}) \quad (3.53)$$

b2) Com FSU, a necessidade de espectro é:

$$F_{rat,nonFSU} = \max_d (F_{d,rat,nonFSU}) \quad e \quad F_{FSU} = \max_d (F_{d,FSU}) \quad (3.54)$$

**Etapa 3** – Sabe-se que o cálculo dentro da região de alocação de espectro foi feito a partir de diferentes estudos de mercado em diferentes regiões geográficas. Onde existe demanda comum para alocação de espectro para um grupo de países ou regiões, deve ser considerada a maior demanda de espectro encontrada para o pior caso, ou seja, para a região com a maior demanda de mercado.

a3) Sem FSU, a necessidade de espectro para o RATG *rat* é dada pelo valor máximo entre os valores encontrados para todas as diferentes regiões consideradas (regiões com demandas de mercado distintas e cuja alocação de espectro é única):

$$F_{rat} = \max(F_{rat}) \quad (3.55)$$

b3) Com FSU, a necessidade de espectro para o RATG *rat* também é dada pelo valor máximo entre os valores encontrados para todas as diferentes regiões consideradas:

$$F_{rat,nonFSU} = \max(F_{rat,nonFSU}) \text{ e } F_{FSU} = \max(F_{FSU}) \quad (3.56)$$

**Etapa 4** – Como etapa final de cálculo, a necessidade de espectro total é representada na Figura 2.1 pela etapa 8 da metodologia.

a4) Sem possibilidade de FSU todas as demandas dos RATGs são somadas:

$$F = \sum_{rat} F_{rat} \quad (3.57)$$

b4) Com a possibilidade de FSU o espectro para os RATGs habilitados ao uso do esquema e dos RATGs não habilitados são somados para dar a demanda total de espectro:

$$F = F_{FSU} + \sum_{rat \notin \{FSU \text{ RATs}\}} F_{rat,nonFSU} \quad (3.58)$$

## **4 – FERRAMENTA PARA SIMULAÇÃO DA METODOLOGIA**

### **4.1 – INTRODUÇÃO**

A metodologia de cálculo de espectro e seus parâmetros de entrada foram descritos nos capítulos anteriores. No presente capítulo, será apresentada, sucintamente, a ferramenta utilizada para aplicar a metodologia na simulação de cenários sobre a rede móvel da Brasil Telecom (BrT). A seguir, será abordada a forma que adotou-se para validar essa ferramenta.

A aplicação da metodologia será realizada a partir de uma ferramenta desenvolvida, em Microsoft Excel, pelo *Working Party* 8F [20]-[21]. Essa ferramenta contém várias planilhas dentro de um mesmo arquivo Excel que incluem tabelas para acomodar os parâmetros de entrada e os resultados calculados nas etapas intermediárias e final. A planilha principal, *Main*, ilustrada na Figura 4.1 e a planilha *RATGEff-Input* contém os parâmetros majoritários, ou seja, aqueles que possuem o maior peso no cálculo do espectro.

Executar a ferramenta significa executar as fórmulas matemáticas implementadas nas planilhas Excel juntamente com as respectivas macros. As fórmulas matemáticas estão configuradas para execução automática e as macros só são executadas a partir de comando acionado pelo usuário. Considerando que a ferramenta já foi validada pelo *Working Party* 8F e que o foco deste trabalho é somente a metodologia e sua aplicação ao ambiente de uma operadora móvel, não serão abordados os aspectos computacionais da implementação da ferramenta. Maiores detalhes estão disponíveis no documento 8F/660 [20], 8F/900 [21] e na própria ferramenta.

### **4.2 – EXEMPLO DE APLICAÇÃO DA FERRAMENTA**

Antes de partir para a simulação de cenários e visando exemplificar a aplicação prática da ferramenta, optou-se pela simulação do cenário atual do ambiente operacional da Brasil Telecom. Essa opção foi motivada pela necessidade de utilizar a ferramenta em uma situação conhecida, tal que fosse possível entender o seu funcionamento, a relação entre suas tabelas, fórmulas, parâmetros de entrada e resultados parciais e final. Outra motivação foi a de obter percepção da sensibilidade dos parâmetros no cálculo do espectro.

SPEctrum requirement calcULATOR for future developments of  
 IMT-2000 and systems beyond IMT-2000  
 "SPECULATOR"  
 Tool Version: v2.26; Date: 12. May 2006



The tool calculates estimates of spectrum requirements. The general flow chart of the methodology is shown below. In the Methodology flow chart the steps 1 to 3 are partly done in other sub working groups and the result are provided as input tables to this tool, which reads the input values and calculates the steps 4 to 9. The tool works by running EXCEL sheet calculations and macros. The EXCEL sheet calculations are done automatically and macros are run by clicking the buttons collected in this work sheet. The order of executing macros from top to bottom is important. The main outcome results are collected to this work sheet. More results can be found in the other sheets.

This tool has been developed within research activity IST-2003-507501-WINNER, which is partly funded by the European Union. More information about the project and the partners is available at [www.ist-winner.org](http://www.ist-winner.org). After the release of the initial version a number of organisations active in ITU-R WP5F have contributed to the work. Especially the contributions from mITF, Japan are highly appreciated. More information about the mITF can be found at [www.mitf.org](http://www.mitf.org).

Major parameters						
Number of network deployments for RATG1		1				
Number of network deployments for RATG2		1				
SECTOR AREA [km²]						
Radio environment	Teledensity					
	DU	SU	RU	w/o penetration loss		
Macro cell	0.1	0.15	0.22	0.65	0.65	0.65
Micro cell	0.07	0.1	0.15	0.1	0.1	0.1
Pico cell	1.60E-03	1.60E-03	1.60E-03	1.60E-03	1.60E-03	1.60E-03
Hot spot	6.50E-05	6.50E-05	6.50E-05	6.50E-05	6.50E-05	6.50E-05

with penetration loss			
0.1	0.15	0.22	
0.07	0.1	0.15	
1.60E-03	1.60E-03	1.60E-03	
6.50E-05	6.50E-05	6.50E-05	

**Calculate the spectrum requirement**

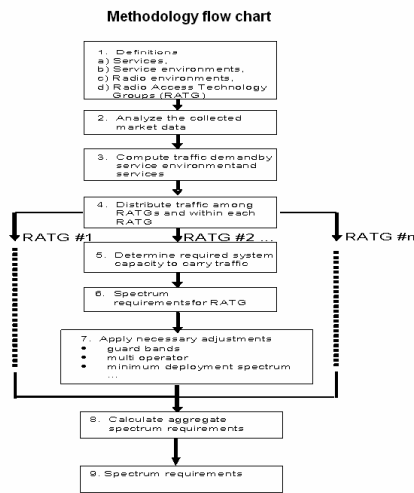
processing step, in brackets corresponding steps in flow chart

Reset the current results	Reset	Run All	OK
Read Input Values (Steps 1-2)	Read Input values		OK
Compute traffic demand and Distribute the Traffic (Step 3-4)	Distribute Traffic		OK
Determine the required system capacity for RATG1 and RATG2 (Step 5)	PS-Capacity		OK
Spectrum requirement and apply necessary adjustment (Step 6-7)	CS-Capacity		OK
Calculate aggregate spectrum requirement (Step 8)	Spectrum req.		OK

**Output**

Spectrum requirement in MHz				
Spectrum for	year 2010	year 2015	year 2020	
RAT Group #1	-	-	-	-
RAT Group #2	-	-	-	-

Output legend:  
 bold font: results from selected years in last calculation  
 normal font: results from previous calculations where this year has been selected



**Warnings**

Part of traffic cannot be distributed - click to jump to details

Time-shifted Spectrum requirement in MHz				
Spectrum for	Shift Index	year 2010	year 2015	year 2020
RAT Group #1	fast	-	-	-
	medium	-	-	-
	slow	-	-	-
RAT Group #2	fast	-	-	-
	medium	-	-	-
	slow	-	-	-

Unadjusted spectrum requirement for RATG #1 in MHz												
Teledensity	Radio Environments									Hot Spot		
	Macro			Micro			Pico			year 2010	year 2015	year 2020
Dense Urban	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sub Urban	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rural	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Unadjusted spectrum requirement for RATG #2 in MHz												
Teledensity	Radio Environments									Hot Spot		
	Macro			Micro			Pico			year 2010	year 2015	year 2020
Dense Urban	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Sub Urban	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Rural	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

Figura 4.1 – Planilha principal da ferramenta de cálculo de espectro.

Visando focar a aplicação, optou-se por restringir a abordagem à ANUF 41, no estado do Paraná. Houve a necessidade de ajustar alguns dos parâmetros de entrada sugeridos pela ITU-R para refletir as particularidades daquele ambiente. Por outro lado, dada a indisponibilidade de informações, foram adotados os valores sugeridos pela ITU-R para alguns parâmetros como: o tamanho médio do pacote por categoria de serviço; o segundo

momento do tamanho médio do pacote; a taxa de chegada de sessões por categoria de serviço; e a duração média dessas sessões. Esses parâmetros foram obtidos a partir dos Reports M.2072 [9] e M.2074 [10] e estão preenchidos nas tabelas da ferramenta, a qual será designada, a partir deste ponto, de *speculator*.

As subseções seguintes apresentarão os parâmetros de entrada escolhidos para a simulação da rede GSM da BrT, que utiliza a tecnologia EDGE para transmissão de dados. Assim, considerando que o sistema móvel da BrT se enquadra no RATG1, serão desconsiderados os parâmetros para os outros RATGs.

#### 4.2.1 - Área da célula ou setor

O parâmetro *sector area* ou área do setor, dado em km<sup>2</sup>, foi calculado a partir do raio médio das células da rede móvel da BrT, considerando células de 3 setores. Foi utilizada predição teórica, com perda de penetração, para determinar o raio médio das células, considerando-as com os *tilt's* e potências atuais e com intensidade de corte do sinal igual a -98dBm. A Tabela 4.1 mostra o raio médio encontrado, por classe de teledensidade e ambiente rádio.

Tabela 4.1 – Raio médio das células da rede móvel da BrT GSM.

Ambiente Rádio	Raio médio, em km, por classe de teledensidade		
	Denso-urbano	Sub-urbano	Rural
Macro-célula	0,91	2,81	9,93
Micro-célula	0,54	2,27	-
Pico-célula	-	-	-
Hot spot	-	-	-

A partir da Tabela 4.1 foi calculada a área do setor, que é o parâmetro requerido pelo *speculator*, cujos valores e forma de apresentação na ferramenta estão ilustrados na Tabela 4.2. Salienta-se que, na rede móvel da BrT, não há presença de pico-células e tampouco *hot spots* e que as áreas rurais são cobertas apenas por macro-células com raio médio em torno de 10 km.

Tabela 4.2 – Área do setor da célula, em km<sup>2</sup>, da rede móvel da BrT GSM.

Ambiente Rádio	Teledensidade		
	DU	SU	RU
Macro-célula	1,61	15,40	192,28
Micro-célula	0,57	10,05	-

#### 4.2.2 - Parâmetros rádio para o RATG1

Os parâmetros rádio para o RATG1, ilustrados na Tabela 2.10, foram propostos pela ITU-R no Report M.2074 [10] e representam a média dos valores para os sistemas móveis celulares digitais 2G e 2.5G, sistemas 3G e seus desenvolvimentos. Portanto, foi necessário rever esses valores para refletir a situação da rede móvel da BrT. A Tabela 4.3 ilustra esses valores, cujas justificativas para a escolha serão dadas a seguir.

Tabela 4.3 – Parâmetros rádio para a rede móvel da BrT GSM.

Atributo	Unidade	Valor			
		Macro-célula	Micro-célula	Pico-célula	Hot spot
Taxa de dados da aplicação	[kbit/s]	236,8	236,8	0	0
Velocidade máxima suportada	[km/h]	120	50	0	0
Banda de guarda entre operadoras	[MHz]	0			
Banda mínima por operadora/por ambiente rádio	[MHz]	0,4	0,4	0	0
Número de operadoras compartilhando a mesma faixa frequência	#	1			
Suporte para <i>multicast</i> (sim=1, não=0)		0			

O parâmetro taxa de dados da aplicação é utilizado para a distribuição do tráfego e representa a taxa de bit disponibilizada para as aplicações em um ambiente rádio particular. Essa taxa pode ser menor que a taxa de pico e pode não estar disponível em toda a área de cobertura da célula. No caso da BrT, foi considerada como taxa de dados teórica disponível para a aplicação a taxa de dados da tecnologia EDGE, com esquema de codificação MCS-9, modulação 8-PSK, com a utilização de 4 *timeslots*. Como a taxa de dados por *timeslot* é 59,2 kbps, com 4 *timeslots* tem-se 236,8 kbps.

A máxima velocidade suportada por um sistema sem fio é limitada pela frequência *Doppler* e pelos tempos de inicialização e execução de *handover*. Em ambientes do tipo macro-célula, a frequência *Doppler* limita a velocidade e a taxa de bit na borda da célula será reduzida somente se a velocidade exceder o limite de 120 km/h [10].

O menor tempo em que um usuário permanece dentro de uma célula de raio pequeno deve ser consideravelmente maior que o tempo de inicialização e execução do *handover*. Assim, considera-se que o tamanho limita a máxima velocidade suportada em células pequenas.

Conforme mapeado na Tabela 3.7, o ambiente micro-célula suporta as classes de mobilidade estacionária/pedestriana (sm) e baixa (lm). Considerando a classificação proposta pela Recomendação ITU-R M.1768 [8], conclui-se que a velocidade máxima suportada em uma micro-célula é de 50 km/h.

Nos sistemas GSM, a banda de guarda entre operadores está sempre intrínseca à largura de banda mínima alocada a um operador. Desta forma, assume-se que o parâmetro banda de guarda entre operadoras seja igual a zero.

Assume-se, ainda, que o parâmetro banda mínima por operadora/por ambiente rádio é igual a duas vezes a largura de banda da portadora e, considerando que no GSM a largura de banda da portadora é 200 kHz, tem-se 400 kHz como parâmetro de entrada.

O parâmetro número de operadoras compartilhando a mesma faixa frequência foi fixado em 1, pois a simulação proposta se aplica somente à rede móvel da BrT. Não há tráfego *multicast* e, portanto, o parâmetro suporte para *multicast* foi setado em 0.

Além dos parâmetros listados na Tabela 4.3, a eficiência espectral também é considerada um parâmetro dependente do RATG. A Tabela 4.4 mostra valores propostos, no Report M.2074, para a eficiência espectral dentro dos ambientes celulares do RATG1 envolvendo sistemas pré-3G.

Tabela 4.4 – Eficiência espectral por ambiente rádio para o RATG1 [bit/(s · Hz · célula)].

Teledensidade	Ambiente Rádio			
	Macro-célula	Micro-célula	Pico-célula	Hot spot
Urbano denso	0,4	0,4	-	-
Sub-urbano	0,4	0,4	-	-
Rural	0,4	-	-	-

#### 4.2.3 - Parâmetros das categorias de serviço

Na metodologia de cálculo de espectro, as aplicações demandas pelo usuário são agrupadas em vinte categorias de serviço conforme a taxa de dados e classe de tráfego a que pertence. Na Tabela 4.3, adotou-se como taxa de dados, disponível para as aplicações na rede da BrT, o limite de 236,8 kbps. Daí explica-se a escolha pelas categorias de serviço mapeadas na Tabela 4.5 para a simulação dessa rede.

Tabela 4.5 – Categorias de serviço consideradas na simulação.

<b>Classe de tráfego</b> <b>Tipo de serviço</b>	Conversacional	<i>Streaming</i>	Interativo	<i>Background</i>
<i>Super-high multimedia</i> (de 30 Mbit/s a 100 Mbit/s/1 Gbit/s)				
<i>High multimedia</i> (< 30 Mbit/s)				
<i>Medium multimedia</i> (< 2 Mbit/s)	SC3	SC8		
<i>Low rate data and low multimedia</i> (< 144 kbit/s)	SC4	SC9	SC14	SC19
<i>Very low rate data</i> (< 16 kbit/s)	SC5	SC10	SC15	SC20

Conforme citado no início deste capítulo, considerando a indisponibilidade de informações nos sistemas da BrT, que atendam ao formato requerido pela metodologia, os valores de entrada para alguns parâmetros tiveram que ser escolhidos entre as faixas sugeridas no capítulo 8 do Report ITU-R M.2072 [9]. Entre esses parâmetros estão: taxa de chegada de sessões por usuário [sessões/(s-usuário)]; taxa de bit média do serviço [bit/s]; duração média da sessão [s/sessão]; e faixas de mobilidade. Para os três primeiros, adotou-se o menor valor dentro do intervalo sugerido pela ITU-R e, para as faixas de mobilidade, adotou-se o valor médio, conforme sugestão do *Working Party* 8F. O parâmetro densidade de usuários [usuários/km<sup>2</sup>], por ambiente de serviço, foi estimado a partir da capacidade instalada na rede da BrT GSM, considerando um tráfego de 0,01 Erlang por usuário. Eram variáveis conhecidas o tráfego médio por célula e o raio médio das células. Dividindo-se o tráfego médio por célula pelo tráfego estimado por usuário, chegou-se ao número médio de usuários por célula. Dividindo-se o número de usuários por célula pela área média da célula, obteve-se a densidade de usuários por km<sup>2</sup>. Salienta-se que foi adotada a mesma densidade de usuário, por ambiente de serviço, para todas as classes de serviço consideradas na simulação.

O parâmetro de mobilidade é usado na distribuição do tráfego entre as classes SM, LM e HM e os valores usados na simulação estão representados na Tabela 4.6, já considerando a distribuição pelo fator *Jm*.

Os outros quatro parâmetros citados caracterizam a demanda das diferentes categorias de serviço selecionadas para a simulação e estão representados na Tabela 4.7.



Tabela 4.6 – Faixas de mobilidade para distribuição do tráfego.

SC	SE	<i>Downlink</i>			<i>Uplink</i>		
		SM	LM	HM	SM	LM	HM
3	1	90,0%	10,0%	0,0%	90,0%	10,0%	0,0%
3	2	95,0%	5,0%	0,0%	95,0%	5,0%	0,0%
3	3	90,0%	10,0%	0,0%	90,0%	10,0%	0,0%
3	4	87,5%	12,5%	0,0%	87,5%	12,5%	0,0%
3	5	65,0%	15,0%	20,0%	65,0%	15,0%	20,0%
3	6	57,5%	0,0%	42,5%	57,5%	0,0%	42,5%
4	1	85,7%	9,5%	4,8%	85,7%	9,5%	4,8%
4	2	89,6%	5,7%	4,7%	89,6%	5,7%	4,7%
4	3	82,4%	13,0%	4,6%	82,4%	13,0%	4,6%
4	4	83,3%	11,9%	4,8%	83,3%	11,9%	4,8%
4	5	62,3%	16,6%	21,1%	62,3%	16,6%	21,1%
4	6	58,3%	0,0%	41,7%	58,3%	0,0%	41,7%
5	1	85,0%	9,3%	5,6%	85,0%	9,3%	5,6%
5	2	87,5%	6,9%	5,6%	87,5%	6,9%	5,6%
5	3	80,2%	14,2%	5,7%	80,2%	14,2%	5,7%
5	4	82,5%	11,8%	5,7%	82,5%	11,8%	5,7%
5	5	57,6%	18,3%	24,1%	57,6%	18,3%	24,1%
5	6	54,3%	0,0%	45,7%	54,3%	0,0%	45,7%
8	1	90,0%	10,0%	0,0%	90,0%	10,0%	0,0%
8	2	84,4%	8,4%	7,1%	94,5%	5,0%	0,5%
8	3	82,9%	9,2%	7,8%	89,6%	10,0%	0,5%
8	4	87,5%	12,5%	0,0%	87,5%	12,5%	0,0%
8	5	64,4%	13,9%	21,8%	65,0%	15,0%	20,0%
8	6	55,5%	0,0%	44,5%	52,5%	0,0%	47,5%
9	1	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
9	2	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
9	3	90,0%	10,0%	0,0%	90,0%	10,0%	0,0%
9	4	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
9	5	80,0%	10,0%	10,0%	80,0%	10,0%	10,0%
9	6	90,0%	0,0%	10,0%	90,0%	0,0%	10,0%
10	1	100,0%	0,0%	0,0%	90,0%	10,0%	0,0%
10	2	100,0%	0,0%	0,0%	95,0%	5,0%	0,0%
10	3	90,0%	10,0%	0,0%	85,0%	15,0%	0,0%
10	4	100,0%	0,0%	0,0%	87,5%	12,5%	0,0%
10	5	80,0%	10,0%	10,0%	55,0%	20,0%	25,0%
10	6	85,0%	0,0%	15,0%	50,0%	0,0%	50,0%
14	1	89,6%	10,0%	0,5%	89,6%	10,0%	0,5%
14	2	94,5%	5,0%	0,5%	94,5%	5,0%	0,5%
14	3	89,1%	10,4%	0,5%	89,1%	10,4%	0,5%
14	4	83,3%	12,3%	4,4%	85,4%	12,2%	2,4%
14	5	95,0%	2,5%	2,5%	95,0%	2,5%	2,5%
14	6	92,5%	0,0%	7,5%	92,5%	0,0%	7,5%
15	1	89,6%	10,0%	0,5%	90,0%	10,0%	0,0%
15	2	95,0%	5,0%	0,0%	95,0%	5,0%	0,0%
15	3	72,4%	26,6%	1,0%	79,6%	19,9%	0,5%

SC	SE	Downlink			Uplink		
		SM	LM	HM	SM	LM	HM
15	4	87,5%	12,5%	0,0%	87,5%	12,5%	0,0%
15	5	57,7%	18,9%	23,4%	60,0%	17,5%	22,5%
15	6	49,0%	0,0%	51,0%	50,0%	0,0%	50,0%
19	1	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
19	2	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
19	3	80,0%	15,0%	5,0%	80,0%	15,0%	5,0%
19	4	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
19	5	80,0%	10,0%	10,0%	80,0%	10,0%	10,0%
19	6	80,0%	0,0%	20,0%	80,0%	0,0%	20,0%
20	1	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
20	2	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
20	3	80,0%	20,0%	0,0%	80,0%	20,0%	0,0%
20	4	100,0%	0,0%	0,0%	100,0%	0,0%	0,0%
20	5	80,0%	10,0%	10,0%	55,0%	20,0%	25,0%
20	6	80,0%	0,0%	20,0%	47,5%	0,0%	52,5%

Tabela 4.7 – Parâmetros das categorias de serviço.

SC	SE	Downlink				Uplink			
		Densidade de usuários [usuários/km <sup>2</sup> ]	Taxa de chegada de sessões por usuário [sessões/(h · usuário)]	Taxa de bit média do serviço [kbit/s]	Duração média da sessão [s/sessão]	Densidade de usuários [usuários/km <sup>2</sup> ]	Taxa de chegada de sessões por usuário [sessões/(h · usuário)]	Taxa de bit média do serviço [kbit/s]	Duração média da sessão [s/sessão]
3	1	557	0,1	236,8	73	557	0,1	236,8	90
3	2	743	0,16	236,8	106	743	0,159	236,8	111
3	3	743	0,1	236,8	51	743	0,1	236,8	79
3	4	43	0,234	64	66	43	0,228	64	79
3	5	43	0,35	64	71	43	0,35	64	91
3	6	3	0,055	16	62	3	0,055	16	74
4	1	557	0,1	64	100	557	0,1	64	100
4	2	743	0,1	64	100	743	0,1	64	100
4	3	743	0,1	64	127	743	0,1	144	127
4	4	43	0,1	64	100	43	0,1	64	100
4	5	43	0,1	64	138	43	0,1	144	138
4	6	3	0,1	64	115	3	0,1	144	115
5	1	557	0,129	15	60	557	0,129	15	60
5	2	743	0,103	15	71	743	0,103	15	71
5	3	743	0,139	15	50	743	0,139	15	50
5	4	43	0,491	14	37	43	0,491	14	37

SC	SE	Downlink				Uplink			
		Densidade de usuários [usuários/km <sup>2</sup> ]	Taxa de chegada de sessões por usuário [sessões/(h · usuário)]	Taxa de bit média do serviço [kbit/s]	Duração média da sessão [s/sessão]	Densidade de usuários [usuários/km <sup>2</sup> ]	Taxa de chegada de sessões por usuário [sessões/(h · usuário)]	Taxa de bit média do serviço [kbit/s]	Duração média da sessão [s/sessão]
5	5	43	0,8	10	60	43	0,8	10	60
5	6	3	0,446	15	35	3	0,446	15	35
8	1	557	0,065	236,8	38	557	0,1	236,8	10
8	2	743	0,019	236,8	38	743	0,299	236,8	10
8	3	743	0,1	236,8	38	743	0,1	236,8	10
8	4	43	0,1	64	38	43	0,1	64	10
8	5	43	0,199	64	38	43	0,199	64	10
8	6	3	0,085	16	38	3	0,1	16	10
9	1	557	0,199	144	5	557	0,199	144	7
9	2	743	0,299	144	19	743	0,299	144	29
9	3	743	0,1	144	19	743	0,1	144	29
9	4	43	0,199	144	5	43	0,199	144	7
9	5	43	0,299	144	19	43	0,299	144	29
9	6	3	0,1	144	5	3	0,1	144	7
10	1	557	0,199	16	1	557	0,199	3	2
10	2	743	0,299	16	1	743	0,299	3	2
10	3	743	0,1	16	1	743	0,1	3	2
10	4	43	0,199	16	1	43	0,199	3	2
10	5	43	0,299	16	1	43	0,299	3	2
10	6	3	0,1	16	1	3	0,1	3	2
14	1	557	0,1	125,1	4	557	0,1	125,1	1
14	2	743	0,1	126,5	4	743	0,1	126,5	2
14	3	743	0,1	144	4	743	0,1	144	2
14	4	43	0,1	48,8	4	43	0,1	48,8	0
14	5	43	0,1	144	4	43	0,1	144	2
14	6	3	0,1	144	4	3	0,1	144	2
15	1	557	0,498	8,3	4	557	0,498	8,3	1
15	2	743	0,996	7,6	4	743	0,996	7,6	1
15	3	743	0,299	16	6	743	0,299	3	1
15	4	43	0,598	7,6	4	43	0,598	7,6	1
15	5	43	0,996	16	5	43	0,996	2	1
15	6	3	0,598	16	5	3	0,598	2	1
19	1	557	0,1	144	5	557	0,1	144	5
19	2	743	0,299	144	5	743	0,299	144	5
19	3	743	0,1	144	5	743	0,1	144	5

SC	SE	Downlink				Uplink			
		Densidade de usuários [usuários/km <sup>2</sup> ]	Taxa de chegada de sessões por usuário [sessões/(h · usuário)]	Taxa de bit média do serviço [kbit/s]	Duração média da sessão [s/sessão]	Densidade de usuários [usuários/km <sup>2</sup> ]	Taxa de chegada de sessões por usuário [sessões/(h · usuário)]	Taxa de bit média do serviço [kbit/s]	Duração média da sessão [s/sessão]
19	4	43	0,1	144	5	43	0,1	144	5
19	5	43	0,1	144	5	43	0,1	144	5
19	6	3	0,1	144	5	3	0,1	144	5
20	1	557	0,1	16	6	557	0,1	16	6
20	2	743	0,299	16	10	743	0,299	16	10
20	3	743	0,1	16	6	743	0,1	12	1
20	4	43	0,1	16	6	43	0,1	16	6
20	5	43	0,299	16	10	43	0,299	12	1
20	6	3	0,1	16	6	3	0,1	12	1

Conforme exposto anteriormente a metodologia de cálculo de espectro trata separadamente as categorias de serviço comutadas por circuito e por pacotes. Para as categorias de serviço comutadas por pacotes, somente a probabilidade de bloqueio é requerida como parâmetro de entrada adicional aos parâmetros de mercado. Na simulação executada, adotou-se uma probabilidade de bloqueio  $P_b = 1\%$  para as categorias de serviço SC3, SC4, SC5, SC8, SC9 e SC10, que são as comutadas por circuito. Para as categorias SC14, SC15, SC19 e SC20, comutadas por pacotes, os parâmetros requeridos são: o tamanho médio do pacote por categoria de serviço; o segundo momento do tamanho médio do pacote; e o atraso médio do pacote. Considerando a indisponibilidade de informações com tal abertura nos sistemas da BrT, esses parâmetros foram obtidos a partir do Report ITU-R M.2072 [9], e estão representados na Tabela 4.8 para as categorias de serviço selecionadas para a simulação.

#### 4.2.4 - Distribuição do tráfego entre RATGs e percentual de cobertura da população

Além dos parâmetros atribuídos nas subseções anteriores, a metodologia requer a definição dos percentuais de distribuição do tráfego entre os RATGs disponíveis e dos percentuais de cobertura da população em cada combinação de ambiente de serviço e rádio.

Conforme mostra a Tabela 4.9 adotou-se que 100% do tráfego demandado pelas categorias de serviço da simulação é distribuído ao RATG1. Salienta-se que os valores constantes nas

combinações de RATGs das linhas com plano de fundo cinza são relevantes somente para tráfego *multicast*, pois o RATG4 suporta apenas esse tipo de tráfego. Portanto, nessas combinações todo o tráfego é atribuído a cada RATG.

Tabela 4.8 – Parâmetros adicionais das categorias de serviço comutadas por pacotes.

Atributos das Categorias de Serviço	Tamanho médio do pacote $S_n$ [kbit/pacote]	Segundo momento do tamanho médio do pacote $S_n^2$ [(kbit/pacote) <sup>2</sup> ]	Atraso médio do pacote [s/pacote]
SC <sub>11</sub>	8,91	99,17	2,97E-04
SC <sub>12</sub>	10,77	127,26	8,67E-05
SC <sub>13</sub>	6,32	65,27	9,33E-04
SC <sub>14</sub>	0,74	1,14	2,78E-03
SC <sub>15</sub>	0,36	0,41	4,22E-04
SC <sub>16</sub>	6,83	72,49	6,48E-05
SC <sub>17</sub>	8,89	98,91	2,13E-04
SC <sub>18</sub>	8,91	99,17	8,91E-03
SC <sub>19</sub>	1,66	11,68	4,94E-03
SC <sub>20</sub>	1,66	11,68	4,45E-02

Tabela 4.9 – Percentuais de distribuição do tráfego entre RATGs da simulação.

Grupos RAT disponíveis	Percentuais de distribuição [%]			
	RATG1	RATG2	RATG3	RATG4
1	100	-	-	-
1; 2	100	-	-	-
1; 3	100	-	-	-
1; 4	100	-	-	100
1; 2; 3	100	-	-	-
1; 2; 4	100	100	-	100
1; 3; 4	100	-	100	100
1; 2; 3; 4	100	100	100	100

Conforme exposto anteriormente, a área total de um ambiente de serviço é coberta somente até certo percentual por cada ambiente rádio. A Tabela 4.10 apresenta as combinações entre ambiente rádio e ambiente de serviço com os respectivos percentuais de cobertura da população adotados para simular a rede da BrT. Como o percentual de cobertura será usado na distribuição do tráfego entre os ambientes rádio, adotou-se o valor zero para os ambientes não aplicáveis à rede simulada.

Tabela 4.10 – Percentual de cobertura da população na rede simulada.

SE	RE			
	Macro-célula	Micro-célula	Pico-célula	Hot spot
SE1	95	95	0	0
SE2	95	95	0	0
SE3	95	95	0	0
SE4	95	95	0	0
SE5	95	95	0	0
SE6	95	0	0	0

#### 4.2.5 - Necessidade de espectro resultante da simulação

Os resultados da simulação da rede da BrT GSM com os parâmetros de entrada explicados nas subseções anteriores serão apresentados neste item. A capacidade total calculada para as categorias de serviço comutadas por pacote e por circuitos e a necessidade de espectro resultante após a divisão dessa capacidade pela respectiva eficiência espectral do ambiente rádio são dadas na Tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Capacidade calculada para a rede GSM da BrT.

Capacidade do sistema para tráfego unicast RATG1	Urbano Denso		Sub-urbano		Rural	
	Macro	Micro	Macro	Micro	Macro	Micro
<i>CS System capacity</i> ( $C_{m,l,p}$ ) (kbit/s/cell)	2.112,00	5.888,00	1.424,00	3.088,00	1.632,00	0,00
<i>PS System capacity</i> ( $C_{m,l,p}$ ) (kbit/s/cell)	1.827,46	2.384,87	1.752,89	2.057,14	1.949,23	0,00
<b><i>Spectrum Requirement</i></b> ( $f_{m,l,p}$ ) (kHz)	<b>9.848,66</b>	<b>20.682,17</b>	<b>7.942,22</b>	<b>12.862,85</b>	<b>8.953,08</b>	<b>0,00</b>

Os valores da necessidade de espectro apresentados na Tabela 4.11 são valores não ajustados para múltiplo inteiro que atenda ao parâmetro banda mínima por operadora/por ambiente rádio. A Figura 4.2 apresenta a necessidade de espectro calculada por classe de teledensidade em cada ambiente rádio, cujos valores foram obtidos a partir da Tabela 4.11. A necessidade de espectro para cada classe de teledensidade, ilustrada na Figura 4.3, é obtida somando-se o espectro calculado para cada ambiente dentro de uma mesma classe. Ela é, portanto, calculada a partir dos valores apresentados na Figura 4.2.

Finalmente, o espectro total requerido pela rede é igual ao maior valor entre os valores calculados para as classes de teledensidade. Portanto, a partir da Figura 4.3, conclui-se que

a necessidade final de espectro da rede simulada é igual a 30,53 MHz. Considerando que o espectro atualmente alocado à BrT GSM, na faixa de 1,8 GHz, é de 2 x 15 MHz e considerando, ainda, a forma de obtenção dos parâmetros comentados neste capítulo, pode-se afirmar que o resultado apresentado com a simulação está totalmente coerente com o esperado. Dessa forma, tanto a metodologia quanto a ferramenta utilizadas para o cálculo de espectro foram validadas.

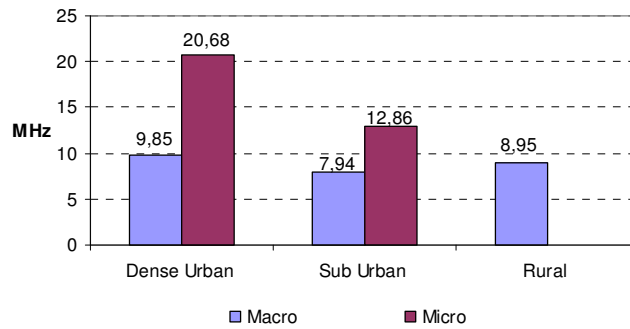


Figura 4.2 – Necessidade de espectro GSM por ambiente rádio e classe de teledensidade.

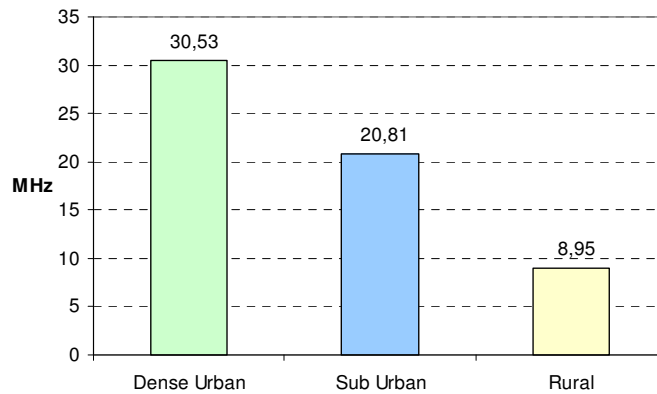


Figura 4.3 – Necessidade de espectro GSM por classe de teledensidade.

## 5 – SIMULAÇÃO DE CENÁRIOS COM TECNOLOGIA 3G

### 5.1 – INTRODUÇÃO

No capítulo anterior, por meio da simulação do cenário atual da rede GSM/EDGE na ANUF41, mostrou-se que a ferramenta *speculator* pode ser utilizada para aplicação da metodologia de cálculo de espectro. O presente capítulo abordará a aplicação da metodologia, apresentando resultados obtidos a partir da simulação de cenários. O objetivo principal é avaliar o comportamento da necessidade de espectro com a variação de alguns parâmetros de entrada.

Considerando todos os parâmetros utilizados na metodologia, percebe-se que é possível construir uma infinidade de cenários por meio da variação de um, dois ou mais desses parâmetros individualmente ou conjuntamente. Salienta-se, entretanto, que deve-se tomar cuidado com a variação de parâmetros que possam impactar os valores de outros.

Para ilustrar as vantagens de partir para uma rede 3G, com todos os seus desenvolvimentos, independentemente dos aspectos econômico-financeiros, inicialmente serão mantidos todos os parâmetros simulados no capítulo anterior, porém, aumentando-se a eficiência espectral de 0,4 para 1 bit/(s·Hz·célula), ver Tabela 4.4. Entretanto, o parâmetro banda mínima por operadora/por ambiente rádio, definido como sendo igual a duas vezes a largura de banda da portadora, passa a ser 10 MHz, considerando o uso de tecnologia WCDMA no RATG1. Todavia, esse parâmetro não interfere nos resultados do espectro não ajustado à largura de banda da portadora, que é o foco da análise dos cenários.

Após simulação, obtiveram-se os resultados apresentados na Figura 5.1. Comparando-se a necessidade de espectro, por ambiente rádio e classe de teledensidade, da Figura 4.2 com os resultados mostrados na Figura 5.1, percebe-se uma redução do valor. Essa redução era esperada uma vez que manteve-se a capacidade do sistema e aumentou-se a sua eficiência espectral. De maneira análoga à apresentada anteriormente, chega-se a Figura 5.2, da qual percebe-se uma redução da necessidade de espectro de 30,53 MHz para 12,21 MHz, o que significa um decréscimo de 60%. Esse resultado ilustra os ganhos de capacidade que o sistema 3G pode trazer não somente para o tráfego de dados, como também para o tráfego de voz, dada a sua maior eficiência espectral.



Nas subseções seguintes, será analisado o comportamento da necessidade de espectro por meio da construção de cenários distintos, a partir da variação de alguns dos principais parâmetros da metodologia. Visando manter um referencial comparativo, adotou-se, como referência, o cenário simulado na subseção atual.

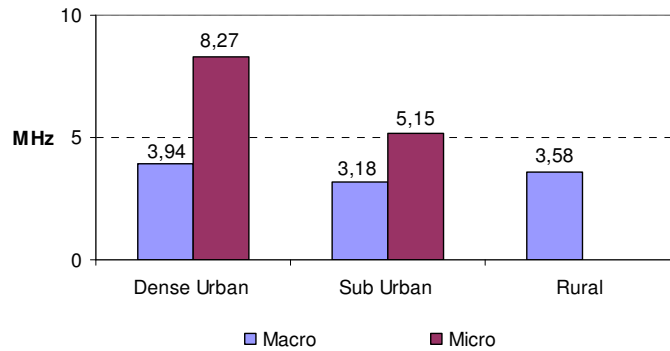


Figura 5.1 – Necessidade de espectro 3G por ambiente rádio e classe de teledensidade.

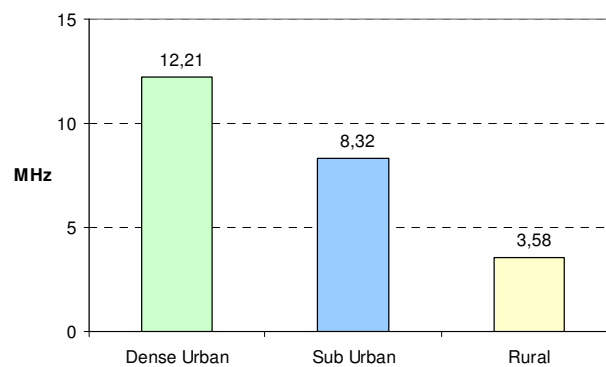


Figura 5.2 – Necessidade de espectro 3G por classe de teledensidade.

## 5.2 – VARIAÇÃO DA EFICIÊNCIA ESPECTRAL

Nesta subseção serão avaliados os efeitos da variação da eficiência espectral no cálculo da necessidade de espectro. A variação da eficiência espectral implica na variação da quantidade de espectro necessária para prover a capacidade requerida pelo sistema. Como citado anteriormente, em termos gerais, espera-se que a necessidade de espectro diminua com o aumento da eficiência espectral e vice-versa.

A Figura 5.3 ilustra os efeitos da variação da eficiência espectral no cálculo de espectro para o RATG1, na rede simulada. A Figura 5.3 (a) mostra as curvas para o ambiente rádio macro-célula, por classe de teledensidade. Nela, observa-se que a classe de teledensidade urbano denso apresenta maior necessidade de espectro, o que se justifica pela maior

demanda por serviços observada nesse ambiente. Observa-se, ainda, que a teledensidade rural apresenta maior necessidade de espectro que a classe sub-urbana. Isso pode ser explicado pela distribuição de tráfego que é totalmente influenciada pela área da célula e pelo percentual de cobertura da população de cada ambiente rádio, em cada ambiente de serviço. No ambiente de serviço com teledensidade rural, há presença apenas do ambiente rádio macro-célula. Portanto, todo o tráfego estimado para o ambiente rural é distribuído ao ambiente rádio macro-célula. Esse fato também explica porquê na Figura 5.3 (b) observa-se que a necessidade de espectro para o ambiente rural está zerada.

A Figura 5.3 (c) mostra a necessidade total de espectro, por classe de teledensidade. Nela a curva que ilustra a necessidade de espectro para uma classe de teledensidade é igual a soma, em cada ponto, do espectro apresentado nas Figuras 5.3 (a) e 5.3 (b), para essa mesma classe. Nessa figura, verifica-se que a demanda por espectro é maior para os ambientes de maior teledensidade, invertendo a falsa impressão mostrada na Figura 5.3 (a), na qual a teledensidade rural demanda mais espectro que a teledensidade sub-urbano.

Para entender melhor os efeitos dessa simulação, a eficiência espectral de 1 bit/(s·Hz·célula) é considerada como referência de 100%, e adotou-se uma variação em frações de 20%, abrangendo desde 40% até 400% desse ponto, ou seja, de 0,4 bit/(s·Hz·célula) a 4 bit/(s·Hz·célula). A variação percentual da eficiência espectral é mostrada na Figura 5.4.

Na Figura 5.4 confirmam-se os resultados anteriores onde obteve-se uma necessidade de espectro de aproximadamente 12 MHz com eficiência espectral de 1 bit/(s·Hz·célula), no ponto de referência igual a 100%. Reduzindo a eficiência espectral para 40% do valor desse ponto, a necessidade de espectro aumentou para aproximadamente 31 MHz. No outro extremo da Figura 5.4, a eficiência espectral foi aumentada para 400% da referência, passando para 4 bits/(s·Hz·célula), onde a correspondente necessidade de espectro foi reduzida para aproximadamente 3 MHz.

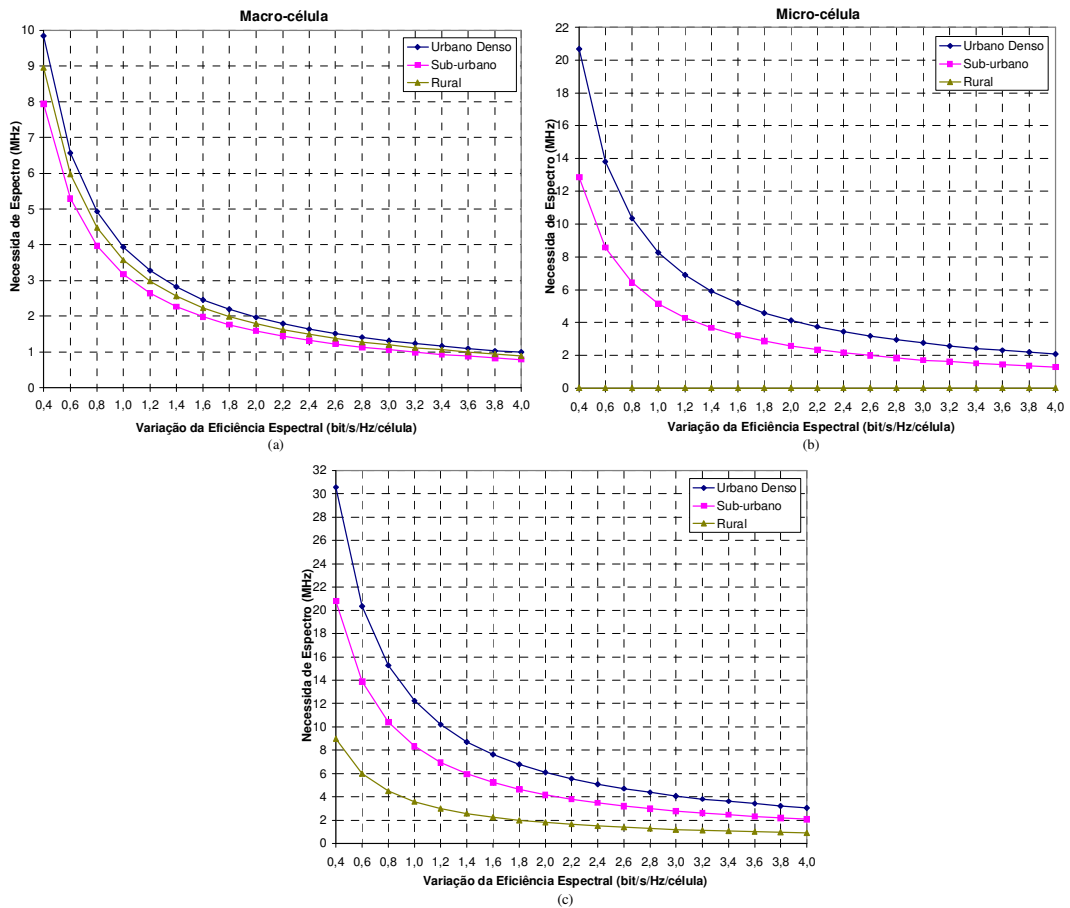


Figura 5.3 – Necessidade de espectro versus variação da eficiência espectral em bit/(s·Hz·célula). (a) Macro-célula. (b) Micro-célula. (c) Total

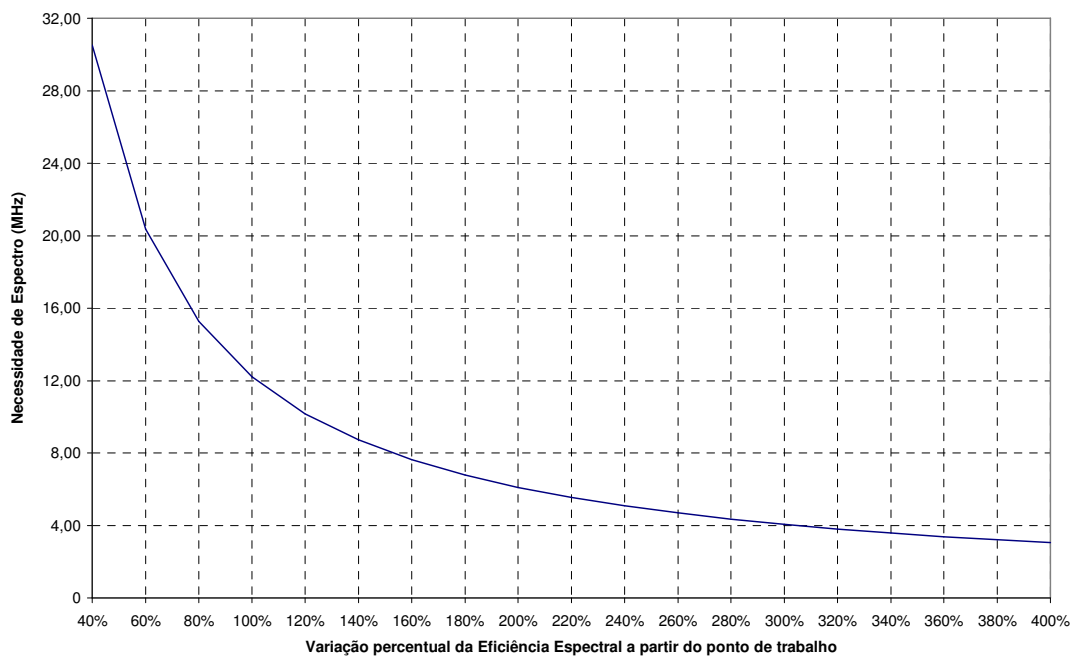


Figura 5.4 – Necessidade de espectro versus variação percentual da eficiência espectral.

O gráfico da Figura 5.5 ilustra que a necessidade de espectro varia inversamente à variação da eficiência espectral. A curva azul ilustra os valores calculados e a curva de cor vermelha mostra uma aproximação por uma função potência do tipo  $f(x) = Ax^n$ . Em outras palavras, significa que se a eficiência espectral for aumentada em um dado percentual, então a necessidade de espectro decairá inversamente a esse percentual e vice-versa. Pelo gráfico da Figura 5.5, percebe-se que, ao variar a eficiência espectral para 1.000% do ponto de referência, ou seja, para 10 bits/(s·Hz·célula), tem-se uma redução do espectro para 10% do valor correspondente a esse ponto. Entretanto, salienta-se que, na prática, não existe sistema 3G capaz de prover tal eficiência. O WP-8F, da ITU-R, no documento 8F/900-E [21], estima que os sistemas pertencentes ao RATG1, tal como o sistema 3G e seus desenvolvimentos, como o HSDPA (*High Speed Downlink Packet Access*) e o HSUPA (*High Speed Uplink Packet Access*), atingirão em 2020 uma eficiência espectral teórica de 4 bits/(s·Hz·célula), nos ambientes rádio pico e micro-célula. Eficiência espectral maior é esperada para os sistemas do RATG2, nos ambientes pico-célula e *hot spot*, com previsão para 10 bits/(s·Hz·célula). A Figura 5.6 ilustra essa estimativa [21].

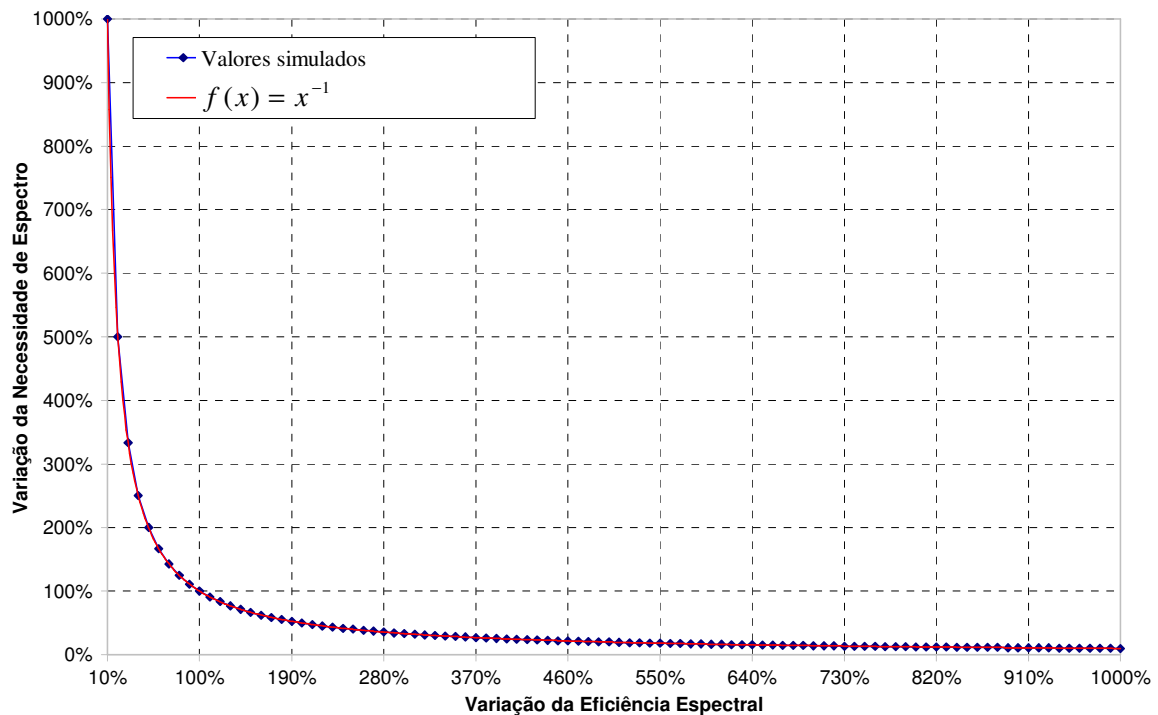


Figura 5.5 – Efeitos da variação da eficiência espectral no cálculo do espectro.

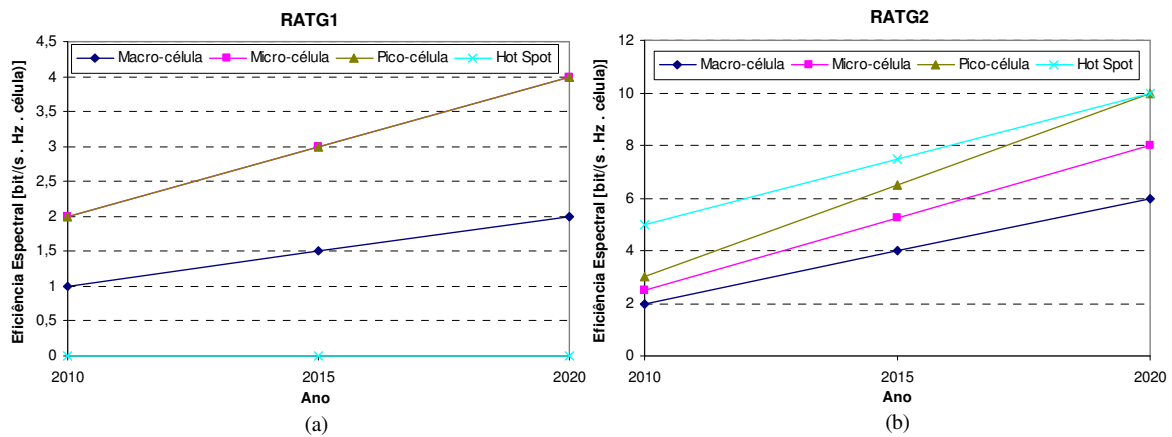


Figura 5.6 – Estimativa do aumento da eficiência espectral. (a) RATG1. (b) RATG2.

Aumentar a eficiência espectral da tecnologia não é a única forma de reduzir a necessidade de espectro. Adicionalmente, os equipamentos de tecnologias com maior eficiência espectral tendem a ser mais caros, o que pode aumentar o custo de capital para implantação de uma nova rede. Portanto, recomenda-se o emprego desses equipamentos somente em áreas de grande densidade populacional, com demanda por maiores taxas de dados.

### 5.3 – VARIAÇÃO DO RAIÃO DA CÉLULA

Nesta subseção serão avaliados os efeitos da variação do tamanho da célula no cálculo da necessidade de espectro. O tamanho da célula influencia o número de usuários presentes em seu interior. Assim, alterar o tamanho da célula implica na alteração do montante de tráfego oferecido por célula. Novamente, foram adotados os parâmetros simulados na seção 4.2, mantendo-os fixos, com exceção do raio da célula, que sofreu variação de 50% a 150% do ponto de referência, representado na Tabela 4.1. Salienta-se que, embora seja conhecido que em células de menor tamanho há um ganho de eficiência espectral para algumas tecnologias, esse parâmetro também foi mantido fixo.

A Figura 5.7 ilustra a variação da necessidade de espectro com a variação percentual do raio da célula, nos ambientes rádio macro e micro-célula, para cada uma das classes de teledensidade. Conforme definido anteriormente, o ambiente *hot spot* não é utilizado em nenhuma das três classes de teledensidade e o ambiente micro-célula não se aplica à teledensidade rural. A Figura 5.8 ilustra a necessidade total de espectro por classe de teledensidade. Conforme definido na metodologia, a necessidade total de espectro é igual ao maior valor obtido entre as três classes de teledensidade.

Nos gráficos das Figuras 5.7 e 5.8, percebe-se que o aumento do raio da célula faz com que a necessidade de espectro também aumente, em função do aumento do tráfego oferecido no interior da célula. Quanto maior é a densidade de usuário, maior é a inclinação da curva que ilustra necessidade de espectro por classe de teledensidade. Em outras palavras, o efeito sobre a necessidade de espectro é pior quando se aumenta o raio da célula no ambiente urbano denso.

Pela Figura 5.8, observa-se que, no ponto de referência, a necessidade total de espectro, não ajustado à largura de banda da portadora, é 12,21 MHz. Aumentando o raio da célula para 150% desse ponto, a necessidade de espectro aumenta para 18,51 MHz, o que representa aproximadamente 51,5% de aumento. No outro extremo da Figura 5.8, reduzindo o raio da célula para a metade do seu tamanho, a necessidade de espectro cai cerca de 37%, indo para 7,72 MHz.

Se, por um lado, o aumento do raio da célula aumenta a necessidade de espectro, por outro, ele reduz a necessidade de infra-estrutura, ou seja, é uma solução de compromisso. Cabe, portanto, à equipe de planejamento e projeto optar pela melhor estratégia para o dimensionamento da rede, levando em consideração a otimização do uso do espectro e também da infra-estrutura, sempre focando no balanço econômico-financeiro dos custos de implantação e operação da rede.

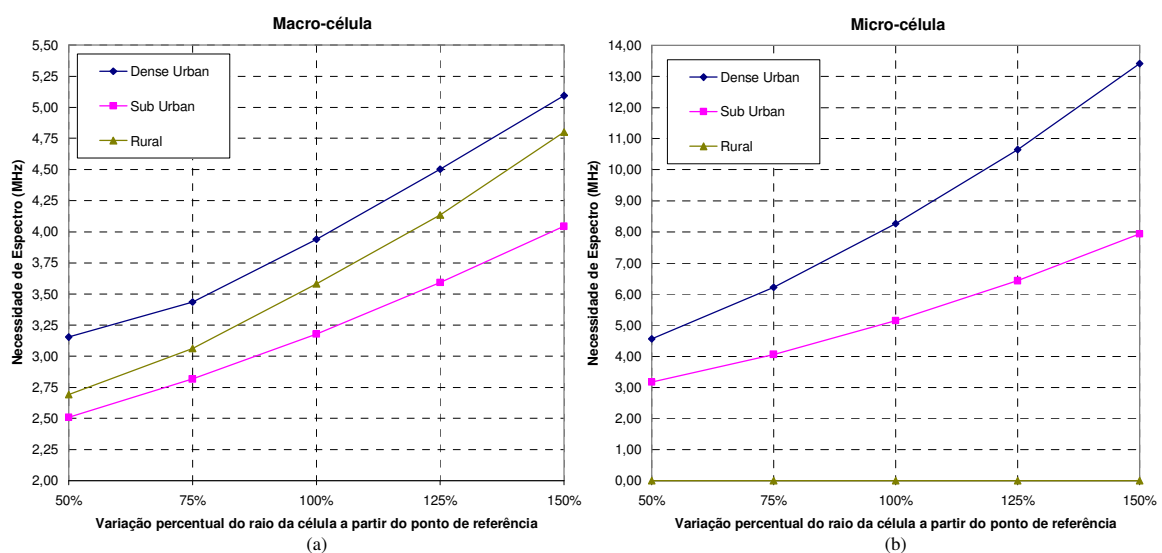


Figura 5.7 – Efeitos da variação do tamanho da célula no cálculo do espectro, por ambiente rádio. (a) Macro-célula. (b) Micro-célula.

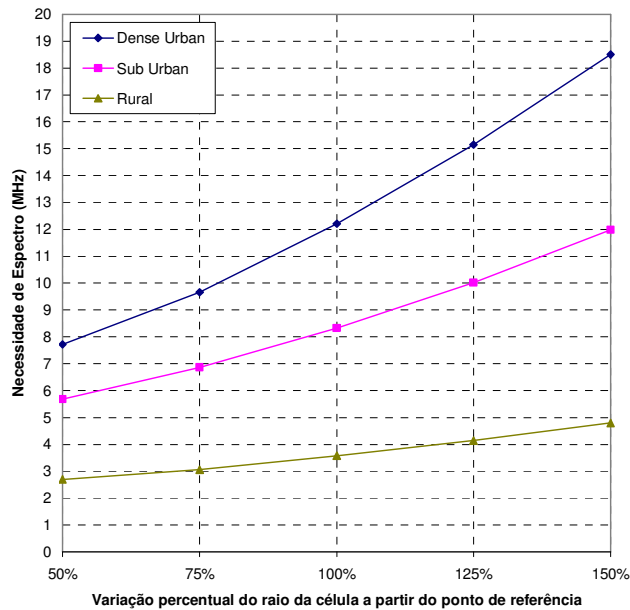


Figura 5.8 – Efeitos da variação do tamanho da célula no cálculo do espectro.

#### 5.4 – VARIACÃO DA TAXA DE BIT MÉDIA

Conforme apresentado anteriormente, a taxa de dados de uma categoria de serviço  $n$  –  $r_{m,t,n}$  – e a taxa de dados do serviço  $s$  dentro dessa categoria –  $r_{m,t,s}$  – foram obtidas a partir do Report M.2072 [9]. O parâmetro de entrada na ferramenta é a taxa de bit média da categoria de serviço  $n$ , no ambiente de serviço  $m$ , cujos valores do ponto de referência são dados conforme a Tabela 4.7. Nesta seção, serão apresentados os efeitos da variação desse parâmetro, em frações de 25%, a partir do ponto de referência.

Na Tabela 4.7, a maior taxa de bit por categoria de serviço é igual à taxa de dados do EDGE – 236,8 kbps – apresentada na Tabela 4.3. Essa taxa representa o parâmetro taxa de dados da aplicação, para o RATG1, e determina que combinação de RATG e RE pode suportar uma dada categoria de serviço, em um dado ambiente de serviço. As combinações nas quais a taxa de dados da aplicação é menor que a taxa de dados requerida por uma categoria de serviço são consideradas não aplicáveis à distribuição do tráfego. Por essa razão, ao variar a taxa de bit média da categoria de serviço, optou-se também por variar o parâmetro taxa de dados da aplicação, fazendo-o igual ao maior valor dentre todas as taxas de bit das categorias de serviço.

A Figura 5.9 ilustra a variação da necessidade de espectro em função da variação percentual da taxa de bit média da categoria de serviço, por classe de teledensidade, nos

ambientes rádio macro e micro-célula. Na Figura 5.10, os efeitos dessa variação, em kbps, estão representados sobre a necessidade total de espectro, por classe de teledensidade. Nela, observa-se que, no referencial, a necessidade total de espectro, não ajustado à largura de banda da portadora, é 12,21 MHz, para uma taxa de dados igual a 236,8 kbps.

Nos gráficos das Figuras 5.9 e 5.10, percebe-se o aumento linear da necessidade de espectro em função da taxa de bit média das categorias de serviço. Percebe-se, ainda, que quanto maior é a densidade de usuário, maior é a inclinação da reta que ilustra necessidade de espectro por classe de teledensidade.

Com os resultados obtidos até agora, observou-se que os efeitos da variação dos parâmetros de entrada são maiores na classe de maior teledensidade, ou seja, no ambiente urbano denso. Recomenda-se então cuidado especial ao tratar esse ambiente, pois é ele que determinará a quantidade de espectro necessária para a prestação do serviço na rede, considerando que os blocos de frequência são licitados pela Anatel e alocados por região. Partindo desse princípio, foi isolada, na Figura 5.11, a necessidade total de espectro, que é igual à necessidade de espectro para o ambiente urbano denso, em função da taxa de bit média. A reta de cor azul representa os valores calculados pela ferramenta, ao passo que a reta de cor vermelha é uma aproximação linear obtida por meio do método dos mínimos quadrados.

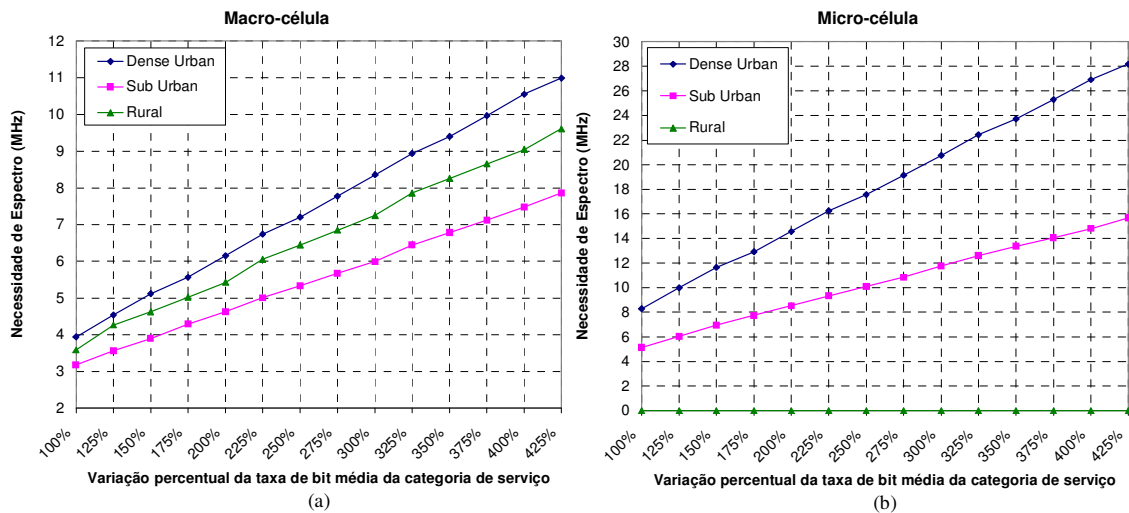


Figura 5.9 – Efeitos da variação percentual da taxa de bit média da categoria de serviço, por ambiente rádio. (a) Macro-célula. (b) Micro-célula.



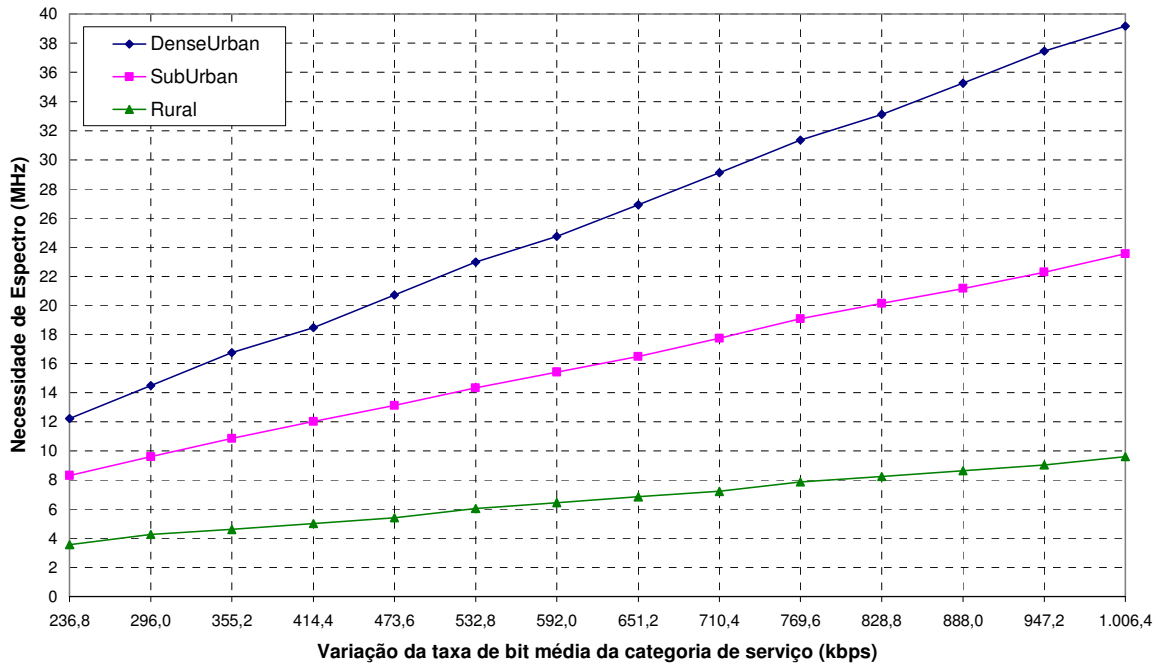


Figura 5.10 – Efeitos da variação da taxa de bit média da categoria de serviço.

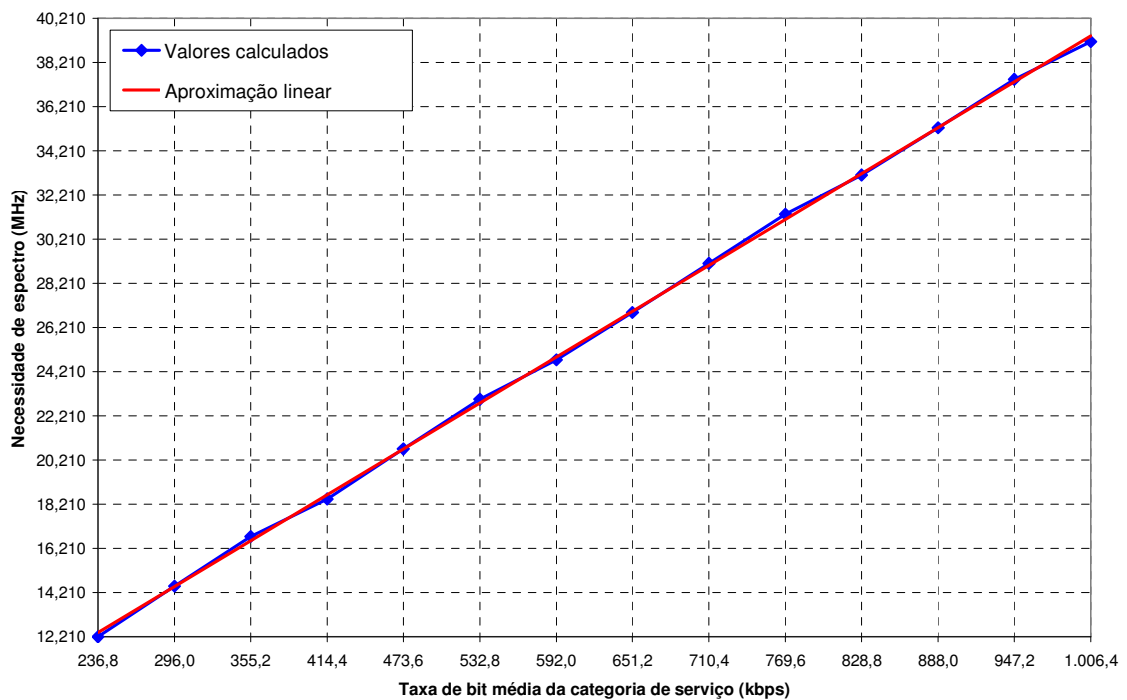


Figura 5.11 – Necessidade de espectro em função da taxa de bit média.

Pela aproximação, a equação da reta que representa a necessidade espectro ( $F$ ) em função da taxa de bit média ( $r$ ) é  $F = 0,035r + 4,081$ . Comparando-se os valores da necessidade de espectro calculados por meio dessa equação com aqueles calculados por meio da speculator, observou-se um erro médio de  $\pm 0,54\%$ . Portanto, para o cálculo rápido da

necessidade de espectro em função da variação da taxa de bit média da categoria de serviço, pode-se adotar essa equação, desde que sejam mantidos os demais parâmetros de entrada simulados aqui.

Nos gráficos anteriores, observa-se que para uma taxa de aproximadamente 1 Gbps, tem-se uma necessidade de quase 40 MHz de espectro. Essa banda é elevada, contudo deve ser considerado que utilizou-se taxas de bit, para todas as categorias de serviço, simétricas nos enlaces de subida e descida. Outro fato importante, que contribui para a grande demanda por espectro é a forma com que foi obtida a densidade de usuários, por ambiente de serviço e a sua extrapolação para todas as classes de serviço consideradas na simulação. Para um cálculo mais apropriado à necessidade da BrT, é necessário conhecer parâmetros como a taxa média de bit e a densidade de usuários, por categoria de serviço, separadamente para *uplink* e *downlink*. Portanto, para se concretizar o uso da metodologia de cálculo de espectro na empresa, recomenda-se que a equipe de Marketing da BrT esteja atenta à previsão da demanda do mercado por comunicações móveis, conforme os parâmetros definidos no Report M.2072 [9] e explicados neste trabalho.

Aumentar a taxa de dados disponível para a aplicação no interior das células significa aumentar a possibilidade de prestar serviços que demandam mais banda. Isso implica cada vez mais numa maior necessidade de espectro e no uso de sistemas espectralmente mais eficientes. Maior eficiência espectral é obtida nos ambientes rádio de menor raio e, conforme comentado anteriormente, isso implica no aumento da necessidade de infraestrutura. Todo esse contexto mostra o quão interdependentes são os parâmetros de entrada e confirmam a abordagem de se estabelecer uma solução de compromisso no dimensionamento da rede móvel. A operadora deve sempre estar atenta à demanda do mercado, buscando atender às necessidades dos clientes com o uso otimizado do espectro e da infra-estrutura, sempre focando no balanço econômico-financeiro dos custos de implantação e operação de sua rede.

## 5.5 – VARIAÇÃO DA DENSIDADE DE USUÁRIOS

Na seção 3.3.2 foi mostrado que o parâmetro densidade de usuário  $U_{m,t,n}$  é utilizado para calcular a taxa de chegada de sessões por área [sessões/(s·km<sup>2</sup>)] de uma categoria de serviço  $n$ , em um ambiente de serviço  $m$ , distribuída no RATG  $rat$ , dentro do ambiente de rádio  $p$ , no intervalo de tempo  $t$ .  $U_{m,t,n}$  é um dos fatores do produto representado pela

equação (3.17). A taxa de chegada de sessões por área é usada para calcular a taxa de chegada de sessões por célula [sessões/(s-célula)], por meio da equação (3.20). Multiplicando-se esse parâmetro pela duração média da sessão tem-se o tráfego oferecido por célula, conforme equação (3.22). Portanto, variar a densidade de usuário significa variar o tráfego oferecido por célula, nos diferentes ambientes considerados.

Novamente, adotou-se os resultados simulados na primeira seção desse capítulo como ponto de referência igual a 100%. A partir desse ponto, o parâmetro densidade de usuários sofreu variação, em parcelas de 25%, abrangendo desde 25% até 400% do valor de referência. Como nas simulações anteriores, os demais parâmetros foram mantidos fixos. A Figura 5.12 ilustra a variação da necessidade de espectro, por ambiente rádio e teledensidade. Na Figura 5.12 (a) estão ilustrados os valores para o ambiente rádio macro-célula e na Figura 5.12 (b), para micro-célula. Mantendo-se a sistemática explicada anteriormente, a Figura 5.13 representa a necessidade total de espectro, por classe de teledensidade. Nela, observa-se a tendência já observada nas simulações anteriores, ou seja, os efeitos da variação dos parâmetros são maiores sobre as classes de teledensidade maior. No ponto de referência, para 100% da densidade de usuários considerada, há uma necessidade total de espectro de 12,21 MHz. Se a densidade de usuários for quadruplicada, ou seja, passar para 400%, a necessidade de espectro aumenta para pouco mais de duas vezes do valor de referência, passando para 26,47 MHz.

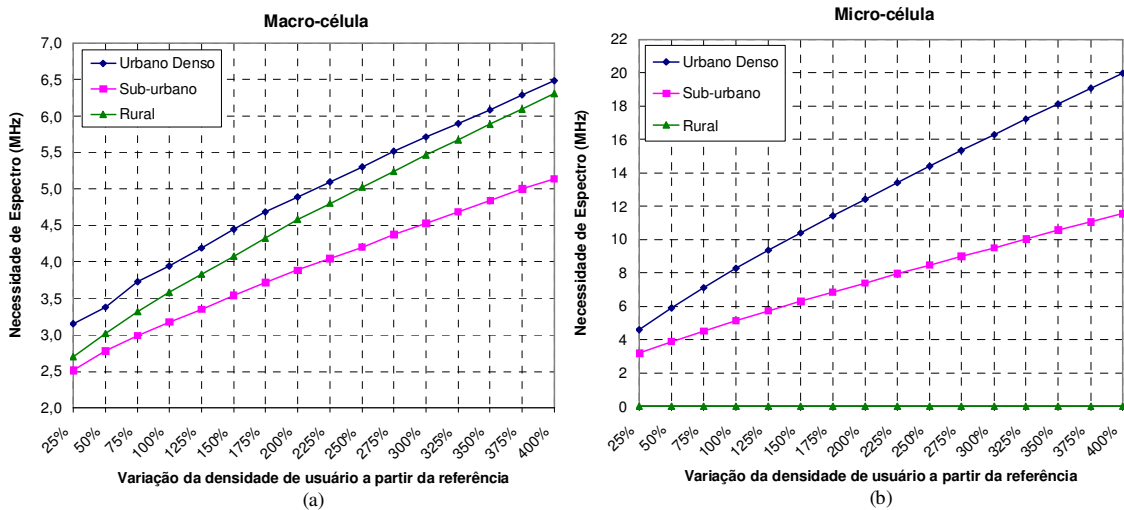


Figura 5.12 – Necessidade de espectro versus densidade de usuário por classe de teledensidade e ambiente rádio. (a) Macro-célula. (b) Micro-célula.

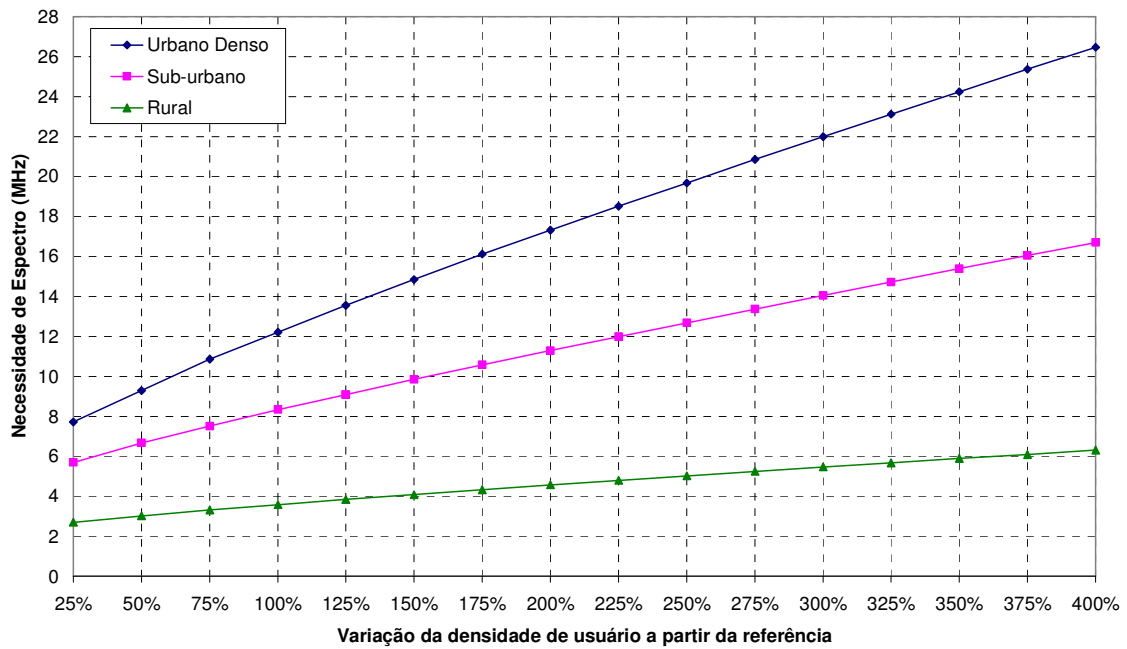


Figura 5.13 – Necessidade de espectro versus densidade de usuário por classe de teledensidade.

Na Figura 5.14 estão ilustradas as curvas da necessidade total de espectro calculada pela ferramenta e os valores de uma aproximação linear, obtida por meio do método dos mínimos quadrados. A equação da reta que ilustra a aproximação é  $F = 4,920 U + 7,175$ , em que ( $F$ ) representa a necessidade espectro em função da densidade de usuário ( $U$ ). Calculando-se os valores de espectro por meio dessa equação, obteve-se um erro médio de  $\pm 1,74\%$  em relação aos valores calculados pela ferramenta, com desvio padrão de 2,11%.

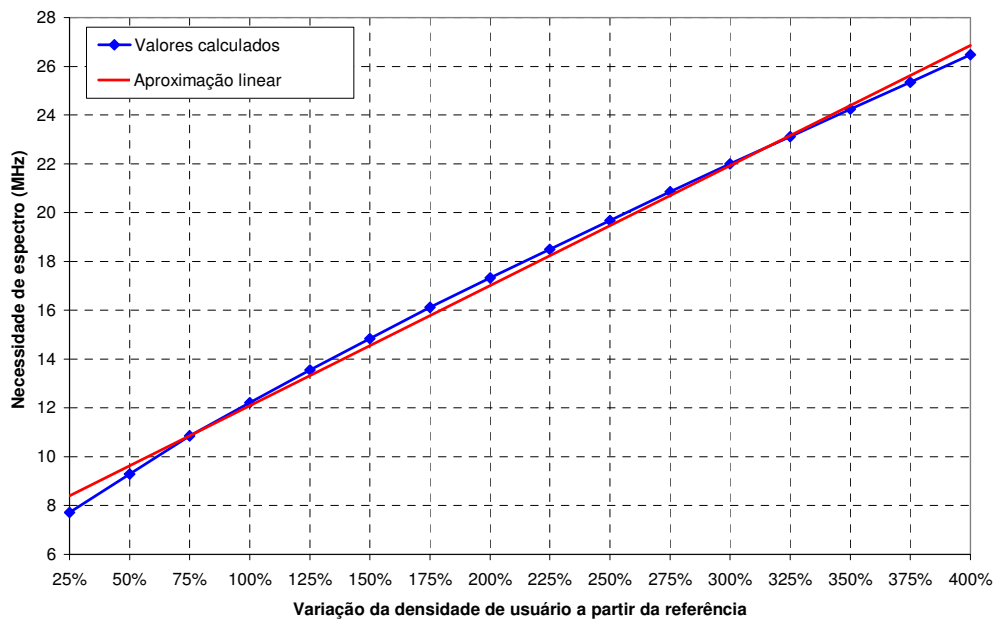


Figura 5.14 – Necessidade total de espectro em função da densidade de usuário.

O aumento da necessidade de espectro com a variação percentual da densidade de usuários era esperado. Contudo, observou-se que a influência dessa variação foi menor que a dos parâmetros simulados nas sub-seções anteriores. Isso significa que os efeitos da variação percentual da densidade de usuários sobre a necessidade de espectro foram menores que aqueles da variação percentual dos demais parâmetros simulados.

Os resultados simulados mostraram que o incremento dos parâmetros raio da célula, taxa de bit média da categoria de serviço e densidade de usuários provoca o aumento da necessidade de espectro. Por outro lado, o incremento da eficiência espectral provoca a redução do espectro demandado pelo sistema. O aumento da demanda por serviços móveis é crescente e a todo instante surgem novas aplicações que exigem cada vez mais banda. Os usuários de serviços tipicamente prestados sobre redes fixas tendem a migrar para as redes sem fio à medida que maiores taxas estiverem disponíveis. Percebe-se então que a densidade de usuário e a taxa de bit média só tendem a aumentar. Portanto, para que seja possível atender a todo esse tráfego crescente, é necessário que os sistemas sejam mais eficientes espectralmente, pois o espectro é um recurso escasso. O raio da célula, por sua vez, tende a diminuir o que contribui para o aumento da eficiência espectral.

## 6 – CONCLUSÕES

Neste trabalho, descreveu-se uma metodologia para calcular a quantidade estimada de espectro requerido para a evolução dos sistemas 3G e pós-3G baseados nas recomendações da ITU-R. Apresentou-se, inicialmente, um breve histórico dos sistemas móveis, mostrando o domínio mundial do sistema GSM no *market share* dos sistemas celulares de segunda geração. Foi também apresentado o domínio do sistema UMTS no *market share* dos sistemas celulares 3G. Comentou-se a respeito da crescente demanda do mercado por comunicações móveis e da mudança do perfil de tráfego, que está migrando de comunicação de voz para comunicação multimídia. Foi apresentada a importância do espectro radioelétrico, um recurso natural escasso e basilar ao desenvolvimento das comunicações sem fio. Na seqüência, ficou evidenciado o problema a ser resolvido neste trabalho: o de mensurar a necessidade de espectro capaz de suportar a demanda futura do mercado. Ainda em sua fase introdutória, apresentou-se o documento 8/BL/34-E e a recomendação ITU-R M.1768 como principais referências bibliográficas adotadas para o desenvolvimento do trabalho. A apresentação da metodologia de cálculo de espectro seguiu a abordagem sistemática da recomendação ITU-R M.1768.

A capacidade do sistema requerida pelas categorias de serviço que utilizam comutação por circuito é determinada pelo número de canais de serviço necessários para atender a uma probabilidade de bloqueio definida e à taxa de dados do canal. Foi demonstrado que os parâmetros de entrada necessários a esse cálculo são: o tráfego oferecido, em Erlangs, por célula ou por setor; a taxa de dados do canal de serviço; e a probabilidade de bloqueio máxima admissível. A fórmula de Erlang-B, estendida para o caso multidimensional, que permite a ocupação simultânea de vários canais por uma mesma chamada, é apropriada para calcular a capacidade necessária para obter uma probabilidade de bloqueio menor ou igual a um valor especificado. Assumiu-se que as chamadas da classe  $n$  chegam por meio de um processo de Poisson de taxa  $P_n$ , independente de outras classes, e possuem tempos de ocupação distribuídos exponencialmente com média  $\mu_n$ . Assumiu-se também que todos os canais utilizados por uma chamada são desocupados ao final do tempo de ocupação. A partir da teoria de Erlang, foi apresentada a função de distribuição da probabilidade de bloqueio e a formulação matemática para o cálculo recursivo de  $G(k)$ . Adotou-se o algoritmo recursivo adaptado por Takagi [15], uma extensão do algoritmo recursivo unidimensional de Kaufman [13] e Roberts [14], para calcular a probabilidade de bloqueio para cada uma das categorias de serviço. Nesse algoritmo, o número total de canais é dado

e assim, por meio do método inverso, o número total de canais é calculado visando encontrar a condição dentro da probabilidade de bloqueio para cada categoria requerida pelo usuário. Finalmente, a capacidade do sistema, para as categorias comutadas por circuito, é obtida por meio da multiplicação do número total de canais requeridos pela taxa de bit por canal.

Para o cálculo da capacidade requerida para atender o tráfego das categorias de serviço comutadas por pacote, assumiu-se o modelo de sistema M/G/1 com prioridades do tipo *non-preemptive*. De acordo com a teoria das filas, o M/G/1 é um sistema com distribuição exponencial do tempo entre as chegadas dos clientes, distribuição aleatória do tempo de serviço e com apenas um servidor. Não há limite para o tamanho da fila, a fonte de clientes é infinita, e a disciplina de tratamento é *first-in-first-out*. A prioridade *non-preemptive* significa que mesmo com a chegada de uma chamada com prioridade maior que a da chamada corrente, o serviço da chamada corrente não é interrompido. Ele é completado antes que o serviço da chamada com maior prioridade, recém chegada, seja iniciado. Nessa etapa da metodologia, foram introduzidos novos parâmetros vinculados ao tráfego comutado por pacote: tráfego base oferecido para cada categoria de serviço, por ambiente de serviço e por célula; a média e o segundo momento da distribuição do tamanho do pacote IP, de cada categoria de serviço; o atraso médio requerido de cada categoria de serviço; e o ranking de prioridades de todas as categorias de serviço. Mostrou-se que a ordenação da prioridade das categorias de serviço é equivalente à numeração das categorias de serviço e que a capacidade total requerida pelo sistema é determinada pelo nível de prioridade que requer a maior capacidade. Assim, desde que os requisitos de QoS da categoria de serviço mais demandada sejam atendidos, pode-se afirmar que os requisitos das outras categorias de serviço estarão supra-atendidos. A derivada da formulação matemática para o cálculo do atraso médio do pacote IP, realizada por Irnich e Walke [17], a partir da fórmula de Cobham [18], é utilizada para determinar a capacidade do sistema requerida para satisfazer a condição de QoS.

A partir de parâmetros disponíveis na rede da BrT, como o raio médio das células e a taxa de dados da aplicação, foram executadas simulações e analisados os resultados, planilha por planilha da ferramenta proposta, para se entender a relação entre os parâmetros de entrada e os resultados obtidos. A simulação do cenário foi realizada dezenas de vezes de forma a permitir o controle e entendimento da ferramenta, tendo sido necessário fazer algumas adaptações para facilitar a forma de entrada e saída de dados. Como resultado

final da simulação esperava-se a obtenção da necessidade total de espectro para comparação com a banda alocada atualmente. O resultado encontrado foi 30,53 MHz, que mostrou-se coerente com a banda atualmente alocada à BrT GSM, 2 x 15 MHz, na faixa de 1,8 GHz. Embora o resultado tenha se mostrado dentro do esperado, salienta-se que os valores poderiam ter sido muito maiores ou menores, dependendo dos parâmetros e premissas adotadas. Por exemplo, adotou-se a premissa de fazer alguns parâmetros de mercado com valores iguais para ambos os enlaces de subida e de descida, situação que na prática não é verdadeira.

Uma vez confirmada a aplicabilidade da ferramenta para simular o cálculo de espectro por meio da metodologia proposta, passou-se ao cálculo da necessidade de espectro para uma rede 3G. O resultado dessa simulação foi a redução da necessidade de espectro de 30,53 MHz para 12,21 MHz, mantendo-se as mesmas condições anteriores. Essa simulação foi adotada como referência de 100% para as demais simulações realizadas no trabalho, cujo principal objetivo foi o de avaliar o comportamento da necessidade de espectro e a sensibilidade da metodologia à variação dos parâmetros principais.

A eficiência espectral foi o primeiro parâmetro variado a partir da referência, em frações de 20%, abrangendo desde 40% até 400% deste ponto. Em outras palavras, isso significa que a eficiência espectral foi variada de 0,4 até 4 bit/(s·Hz·célula). Os resultados para 0,4 e 1 bit/(s·Hz·célula) já eram conhecidos e, a partir da simulação, foi possível traçar as curvas para os demais pontos simulados. No ponto de 400% da referência, que significa uma eficiência espectral de 4 bits/(s·Hz·célula), a correspondente necessidade de espectro foi reduzida para aproximadamente 3 MHz. Utilizando-se da aproximação por uma função de potência do tipo  $f(x) = Ax^n$ , chegou-se a conclusão que o espectro varia, em termos percentuais, inversamente com a eficiência espectral e vice-versa. A equação da curva pode ser representada por  $f(x) = x^{-1}$ , em que  $x$  é a eficiência espectral e  $f(x)$  é a necessidade de espectro. Foi visto que o limite superior da eficiência espectral para o RATG1, de acordo com estimativa do WP-8F, é de 4 bits/(s·Hz·célula), valor esse a ser atingido por volta do ano 2020. Embora o aumento da eficiência espectral tenha enorme influência na quantidade de espectro demandada por um sistema, salientou-se que essa não é a única forma de reduzir a necessidade de espectro. Ademais, os equipamentos de tecnologias que apresentam maior eficiência espectral tendem a ser mais complexos e, conseqüentemente, mais caros. Portanto, para otimizar o uso do espectro e ao mesmo



tempo maximizar o retorno sobre os investimentos na rede, recomenda-se avaliar cuidadosamente a demanda do mercado e as faixas de frequência disponíveis para então optar pela tecnologia a ser implantada. Recomenda-se, ainda, o uso de tecnologias de maior eficiência espectral nos ambientes do tipo urbano denso, onde há maior demanda de tráfego.

Os efeitos da variação do tamanho da célula no cálculo da necessidade de espectro também foram avaliados, pois alterar o tamanho da célula implica na alteração do montante de tráfego oferecido por célula. Nessa simulação, o raio da célula sofreu variação em frações de 25%, ficando os valores mínimo e máximo limitados a 50% e 150% do ponto de referência, respectivamente. Esse limite foi imposto levando-se em conta considerações práticas sobre a rede. Se o aumento do raio da célula implica no aumento do tráfego em seu interior, esperava-se também um aumento na necessidade de espectro, o que foi confirmado ao final das simulações. Pelos resultados apresentados, concluiu-se que o efeito sobre a necessidade de espectro é pior quando se aumenta o raio da célula no ambiente urbano denso. Se o raio da célula for reduzido, conseqüentemente haverá um aumento na necessidade de infra-estrutura e vice-versa. E, embora células menores apresentem maior eficiência espectral, a necessidade de infra-estrutura deve ser levada em consideração no dimensionamento das redes. Trata-se, portanto, de uma solução de compromisso. Recomenda-se então, à equipe de planejamento e projeto de rede, optar pela melhor estratégia para o dimensionamento, levando em consideração a otimização do uso do espectro e também a redução da infra-estrutura, sempre focando no balanço econômico-financeiro dos custos de implantação e operação da rede.

Outro parâmetro de grande importância para o cálculo do espectro é a taxa de bit média da categoria de serviço, daí a importância de avaliar os efeitos da sua variação. No ponto de referência, a maior taxa de bit por categoria de serviço é igual à taxa de dados teórica do EDGE, 236,8 kbps. Foi mostrado que, na distribuição do tráfego, as combinações nas quais a taxa de dados da aplicação é menor que a taxa de dados requerida por uma categoria de serviço são desconsideradas. Isso explica porquê ao variar a taxa de bit média da categoria de serviço, optou-se também por variar a taxa de dados da aplicação, fazendo-a igual ao maior valor dentre todas as taxas de bit das categorias de serviço. Como resultado da simulação, verificou-se o aumento quase linear da necessidade de espectro em função da taxa de bit média das categorias de serviço e que quanto maior é a densidade de usuário, maior é o efeito da variação da taxa de bit sobre a necessidade de espectro.

O resultado da variação da taxa de bit chama a atenção para o aumento crescente da demanda por serviços e aplicações que requerem cada vez mais banda. Os usuários estão se acostumando às altas taxas de dados disponíveis nas redes a cabo, por exemplo, redes xDSL. Por outro lado, os usuários desejam também mobilidade. A combinação desses dois fatores demanda uma rede móvel capaz de oferecer serviços com taxas e qualidade semelhante às da rede fixa. Sugere-se, então, que a operadora esteja sempre atenta ao aumento da demanda, por aplicações mais pesadas, de forma a avaliar se o espectro disponível será capaz ou não de suportar o tráfego por ela gerado.

O último cenário simulado levou em consideração o parâmetro densidade de usuário. Esse parâmetro é utilizado para calcular a taxa de chegada de sessões por área de uma categoria de serviço. Multiplicando-se essa taxa pela duração média da sessão, tem-se o tráfego oferecido por célula. Portanto, variar a densidade de usuário significa variar o tráfego oferecido por célula, nos diferentes ambientes considerados. No cenário simulado, optou-se pela variação da densidade de usuário em parcelas de 25%, abrangendo desde 25% até 400% do valor de referência. Como observado nas simulações anteriores, os efeitos da variação desse parâmetro foi maior sobre as classes de teledensidade maior. Contudo, observou-se que a influência dessa variação foi menor que a influência dos parâmetros simulados anteriormente.

Os resultados obtidos por meio da simulação dos cenários mostraram que o incremento dos parâmetros raio da célula, taxa de bit média da categoria de serviço e densidade de usuários provocou o aumento da necessidade de espectro, principalmente nas classes de teledensidade urbano denso. Em contrapartida, o aumento da eficiência espectral provoca a redução do espectro demandado pelo sistema. Ficou evidenciado que muitos são os fatores que influenciam na quantidade de espectro requerida por um sistema sem fio, todos eles com implicações sobre os custos de licenças de uso de radiofrequência, implantação e operação da rede. Conforme citado anteriormente, considerando o constante surgimento de novas aplicações, que demandam cada vez mais banda, aliado ao aumento da demanda por serviços móveis espera-se que as redes sem fio deverão estar capacitadas a oferecer taxas e qualidade semelhantes as das redes fixa. Portanto, para que seja possível atender a todo esse tráfego, é necessário que os sistemas sejam mais eficientes espectralmente, pois o espectro é um recurso escasso. O raio da célula, por sua vez, tende a diminuir o que contribui para o aumento da eficiência espectral. Aumentar a eficiência espectral e diminuir o raio das células significa aumentar o custo das operadoras na aquisição de infra-

estrutura. Logo, é necessário que as operadoras primem pela melhor estratégia para o dimensionamento da rede, levando em consideração a otimização do uso do espectro e da infra-estrutura, sempre focando no balanço econômico-financeiro dos custos de implantação e operação da rede.

Considerando a dificuldade de acumular resultados simulados com a ferramenta, optou-se por não simular outros cenários, como a variação da probabilidade de bloqueio, do tamanho médio do pacote IP, do atraso desse pacote, do percentual de cobertura do ambiente rádio micro-célula, dentre outros. Todos esses cenários certamente apresentarão influência na necessidade de espectro. Portanto, sugere-se, para trabalhos futuros, a implantação da metodologia em uma ferramenta computacional mais robusta e flexível que o Microsoft Excel, capaz de simular mais facilmente diversos cenários, inclusive com a possibilidade de variar, de forma mais amigável, vários parâmetros simultaneamente. Sugere-se, ainda, que a operadora trabalhe na obtenção de parâmetros de mercado e de rede, nos formatos recomendados pela ITU-R, de forma que seja possível simular o seu ambiente mais realisticamente.

Finalmente, conclui-se que a metodologia aqui proposta é uma importante ferramenta para a avaliação da necessidade de espectro necessária para atender o mercado, com o diferencial de poder ser usada para diversas arquiteturas de sistemas celulares em diferentes mercados. As possibilidades de uso são enormes, pois pode-se, por exemplo, estimar pelo método recursivo, qual o limite de capacidade que pode ser atendido dentro de uma determinada banda de espectro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.gsmworld.com/>, acessado em setembro/2007.
- [2] ITU-R Recommendation M.1457-6: Detailed specifications of the radio interfaces of International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000).
- [3] <http://www.umts-forum.org/>, acessado em setembro/2007.
- [4] ITU-R Report M.2023: Spectrum requirements for International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000).
- [5] ITU-R Recommendation M.1390: Methodology for the calculation of IMT-2000 terrestrial spectrum requirements.
- [6] ITU-R Recommendation M.1645: Framework and overall objectives of the future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000.
- [7] Document 8/BL/34-E: Draft new Recommendation ITU-R M.[IMT.METH] - Methodology for calculation of spectrum requirements for the future development of the terrestrial component of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000.
- [8] ITU-R Recommendation M.1768: Methodology for calculation of spectrum requirements for the future development of the terrestrial component of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000.
- [9] ITU-R Report M.2072: World mobile telecommunication market forecast (Question ITU-R 229/8).
- [10] ITU-R Report M.2074: Radio aspects for the terrestrial component of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000.
- [11] ITU-R Recommendation M.1079-2: Performance and quality of service requirements for International Mobile Telecommunications-2000 (IMT-2000) access networks.

- [12] Kleinrock, L., *Queueing Systems. Volume 1: Theory*. John Wiley & Sons, New York, 1975. 417 p.
- [13] Kaufman, J. S., “Blocking in a shared resource environment”, *IEEE Trans. Commun.*, vol.COM-29, no.10, pp.1474-1481, Oct. 1981.
- [14] Roberts, J. W., A service system with heterogeneous user requirements. *Perf. of Data Commun. Sys. and their Applications*, G. Pujolle (ed.), pp.423-431, North-Holland, 1981.
- [15] Takagi, H., Yoshino, H., Matoba, N. and Azuma, M., Methodology for calculation of spectrum requirements for the next generation mobile communication systems. Submitted to the *IEICE Trans.*, 2005.
- [16] L. Kleinrock. *Queueing Systems. Volume 2: Computer Applications*. John Wiley & Sons, New York, United States of America, 1976.
- [17] Irnich, T. and Walke, B., *Spectrum estimation methodology for next generation wireless systems*. PIMRC Barcelona, Spain, 5-8 September 2004.
- [18] Cobham, A., Priority assignments in waiting line problems. *Operations Research*, Vol. 2, pp. 70-76, Febr. 1954.
- [19] Cardano, G., *Artis magnae, sive de regulis algebraicis. (also known as Ars Magna, from Latin: “Great Work”)*, Nuremberg, 1545 (on algebra).
- [20] ITU-R WP 8F Document 8F/660(Rev.2)-E: Tool for estimating the spectrum requirements for future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000 and the user guide to the tool, 16 January 2006.
- [21] ITU-R WP 8F Document 8F/900-E: Tool for estimating the spectrum requirements for future development of IMT-2000 and systems beyond IMT-2000 and the user guide to the tool, 17 May 2006.