

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
MESTRADO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

RAPHAEL RAMOS GALVÃO

DESENVOLVIMENTO TEÓRICO E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM  
MODELO DIRETIVO PARA PREDIÇÃO DOS NÍVEIS DE RADIAÇÃO NÃO  
IONIZANTE GERADA POR SISTEMAS CELULARES EM LOCAIS  
COMPARTILHADOS

NITERÓI  
2009

RAPHAEL RAMOS GALVAO

DESENVOLVIMENTO TEÓRICO E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM  
MODELO DIRETIVO PARA PREDIÇÃO DOS NÍVEIS DE RADIAÇÃO NÃO  
IONIZANTE GERADA POR SISTEMAS CELULARES EM LOCAIS  
COMPARTILHADOS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em  
Engenharia de Telecomunicações da Universidade  
Federal Fluminense, como requisito parcial para  
obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração:  
Sistemas de Comunicações Móveis

Orientador: Prof Julio Cesar Rodrigues Dal Bello, Doutor em Ciências.

Niterói  
2009

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca da Escola de Engenharia e Instituto de Computação da UFF

TXXX Galvão, Raphael Ramos.  
Desenvolvimento teórico e simulação computacional de um modelo diretivo  
para predição dos níveis de radiação não ionizante gerada por sistemas  
celulares em locais compartilhados / Raphael Ramos Galvão. – Niterói, RJ :  
[s.n.], 2009.

XXX X.

Orientador: Julio Cesar Rodrigues Dal Bello.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia de Telecomunicações) - Universidade Federal  
Fluminense, 2009.

1. Introdução. 2. Evolução da telefonia celular. 3. Radiação não ionizante no  
cenário mundial. 4. Aspectos regulatórios no brasil. 5. Análise dos efeitos  
térmicos no ambiente celular. 6. Modelo teórico proposto - ambiente  
multiusuário. 7. Modelo computacional proposto. 8. Realizações de medidas e

RAPHAEL RAMOS GALVÃO

DESENVOLVIMENTO TEÓRICO E SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DE UM  
MODELO DIRETIVO PARA PREDIÇÃO DOS NÍVEIS DE RADIAÇÃO NÃO  
IONIZANTE GERADA POR SISTEMAS CELULARES EM LOCAIS  
COMPARTILHADOS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Sistemas de Comunicações Móveis

Aprovada em 10 de Julho de 2009

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Julio Cesar Rodrigues Dal Bello, Doutor – Orientador.  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Leni Joaquim de Matos, Doutora.  
Universidade Federal Fluminense

---

Prof. Gláucio Lima Siqueira, PhD.  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro

---

Claiton Pereira Colvero, Doutor.  
Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO)

Niterói  
2009

Dedico este trabalho aos meus pais Luiz e Márcia, à minha avó Jayra e à minha namorada Suzana - meus pacientes companheiros do dia-a-dia.

Dedico também aos irmãos e demais parentes e amigos que muito me apoiaram para a conclusão deste projeto.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter-me permitido alcançar meus objetivos com saúde e paz.

À minha família, por todo apoio, amor e compreensão.

Aos meus gestores nas empresas onde trabalhei: Eleanor dos Santos Victor, Enrique Guilherme Herreiro Garcia e Henrique Carlos Aires Mendes, que me deram todo o apoio necessário e foram fundamentais para garantir a presença nas aulas e nas orientações de tese.

Aos amigos do INMETRO, Claiton Pereira Colvero, Rodolfo Saboia Lima de Souza e Marcos Frederico, pela atenção dispensada e a prontidão para ajudar na realização das medições.

Ao meu orientador Julio Cesar Dal Bello, pela paciência, amizade e pelo excelente trabalho como orientador.

Finalmente, gostaria de agradecer ao professor Andrés Pablo Barbero, por toda a ajuda dispensada durante o período em que estive na coordenação do curso de Mestrado em Engenharia de Telecomunicações da UFF.

## SUMÁRIO

<b>ÍNDICE DE TABELAS .....</b>	<b>4</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>5</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS .....</b>	<b>7</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
1.1. Histórico .....	11
1.2. Ambientação .....	13
1.3. Revisão Bibliográfica .....	15
1.4. Objetivos.....	18
1.5. Roteiro .....	18
<b>2. EVOLUÇÃO DA TELEFONIA CELULAR .....</b>	<b>20</b>
2.1. Evolução da Telefonia Celular no mundo .....	21
2.2. Evolução da Telefonia Celular no Brasil.....	24
2.3. Arquitetura dos sistemas celulares .....	27
2.4. Setorização e redução das células.....	29
2.5. Considerações sobre as estações terminais portáteis.....	31
<b>3. RADIAÇÃO NÃO IONIZANTE NO CENÁRIO MUNDIAL .....</b>	<b>37</b>
3.1. Entidades Envolvidas nos estudos relativos às RNI.....	37
3.1.1. <i>IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> .....	37
3.1.2. <i>ICNIRP - International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i> 38	
3.1.3. <i>WHO (OMS) – World Health Organization</i> .....	39
3.1.4. <i>ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações</i> .....	40
3.2. Controle adotado por alguns países .....	41
3.2.1. <i>Austrália</i> .....	41
3.2.2. <i>Estados Unidos</i> .....	42
3.2.3. <i>Canadá</i> .....	43
3.2.4. <i>China</i> .....	43
3.2.5. <i>Itália</i> .....	43
3.2.6. <i>Rússia</i> .....	44
3.2.7. <i>Comparação entre os níveis de referência adotados</i> .....	45
<b>4. ASPECTOS REGULATÓRIOS NO BRASIL .....</b>	<b>46</b>
4.1. A Resolução 303/02 da ANATEL.....	46
4.2. Procedimentos de avaliação de estações terminais portáteis.....	50
4.2.1. <i>Medidas de SAR</i> .....	51
4.3. Níveis de exposição praticados no Brasil .....	53
4.3.1. <i>Cálculo de distâncias mínimas permitidas</i> .....	54
4.3.2. <i>Faixas de frequência e níveis recomendados</i> .....	55
4.4. Condições para operação em ambientes multiusuários .....	58
4.4.1. <i>Campos de frequências múltiplas</i> .....	58
4.4.2. <i>Considerações acerca dos aspectos regulatórios</i> .....	59
<b>5. CARACTERÍSTICAS E COMPONENTES DAS ESTAÇÕES RÁDIO BASE</b> <b>61</b>	
5.1. Antenas .....	62
5.1.1. <i>Diagrama de irradiação das antenas</i> .....	63
5.1.2. <i>Ganho</i> .....	64
5.1.3. <i>Relação Frente-costas</i> .....	65
5.1.4. <i>Ângulo de meia potência</i> .....	66
5.1.5. <i>Ângulo de elevação</i> .....	66
5.2. Transceptores.....	72

5.3.	Combinadores .....	74
5.4.	<i>Diplexers</i> .....	75
5.5.	Cabos e Conectores .....	76
5.6.	Duplexadores .....	76
5.7.	Filtros .....	77
<b>6.</b>	<b>MODELO TEÓRICO PROPOSTO - AMBIENTE MULTIUSUÁRIO.....</b>	<b>78</b>
6.1.	Cálculo da EIRP por setor .....	78
6.1.1.	<i>Determinação do ângulo horizontal</i> .....	79
6.1.2.	<i>Determinação do ângulo vertical</i> .....	80
6.2.	Cálculo da distância mínima segura .....	82
6.3.	Verificação do atendimento aos níveis de referência para exposição .....	86
<b>7.</b>	<b>MODELO COMPUTACIONAL PROPOSTO .....</b>	<b>88</b>
7.1.	Entradas de dados .....	88
7.1.1.	<i>ANATEL – Sistemas Interativos</i> .....	89
7.1.2.	<i>Informações adicionais</i> .....	90
7.2.	Programa Principal .....	91
7.3.	Módulos Auxiliares .....	93
7.3.1.	<i>Módulo 1</i> .....	93
7.3.2.	<i>Módulo 2</i> .....	95
7.3.3.	<i>Módulo 3</i> .....	96
7.3.4.	<i>Módulo 4</i> .....	97
7.3.5.	<i>Módulo 5</i> .....	97
7.3.6.	<i>Módulo 6</i> .....	98
7.3.7.	<i>Módulo 7</i> .....	98
7.3.8.	<i>Módulo 8</i> .....	98
7.3.9.	<i>Módulo 9</i> .....	99
7.4.	Relatório Técnico .....	100
<b>8.</b>	<b>REALIZAÇÕES DE MEDIÇÕES E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>106</b>
8.1.	Resultados teóricos .....	108
8.1.1.	<i>Cenário 1 – Campus do Gragoatá da UFF</i> .....	108
	<i>Cenário 2 – Campus Praia Vermelha da UFF</i> .....	117
8.1.2.	<i>Cenário 3 - Charitas</i> .....	121
8.1.3.	<i>Cenário 4 - Piratininga</i> .....	125
8.2.	Campanha de medições de campo.....	130
8.3.	Processamento das medições.....	134
8.4.	Análise comparativa entre o modelo teórico e as medições realizadas.....	140
8.4.1.	<i>Cenário 1 – Campus do Gragoatá da UFF</i> .....	140
8.4.2.	<i>Cenário 2 – Campus Praia Vermelha da UFF</i> .....	142
8.4.3.	<i>Cenário 3 – Charitas</i> .....	143
8.4.4.	<i>Cenário 4 – Piratininga</i> .....	145
<b>9.</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>147</b>
9.1.	Sugestões para trabalhos futuros .....	149

## ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 2.1 - Equivalência entre sistemas de primeira e terceira geração.....</i>	<i>29</i>
<i>Tabela 2.2 - Níveis de referência de acordo com ICNIRP e IEEE C95.1.....</i>	<i>32</i>
<i>Tabela 2.3 - Níveis de controle de potência de acordo com o 3GPP TS 05.05. ....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 4.1 - Restrições Básicas para exposição a CEMRF, na faixa de radiofrequências entre 9 kHz e 10 GHz. ....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 4.2 - Restrições Básicas para densidade de potência, para radiofrequências entre 10 GHz e 300 GHz. ....</i>	<i>48</i>
<i>Tabela 4.3 - Níveis de referência para a exposição ocupacional. ....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 4.4 - Níveis de referência para a exposição da população em geral.....</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 4.5 - Blocos e subfaixas de radiofrequência do SMP (Resolução 454/2006 da ANATEL). ....</i>	<i>55</i>
<i>Tabela 4.6 - Valores de ERP máximos por estação (Resolução 454/2006 da ANATEL). ....</i>	<i>56</i>
<i>Tabela 4.7 - Valores de referência para as subfaixas de radiofrequência. ....</i>	<i>57</i>
<i>Tabela 5.1 - Amplitudes e fases de alimentação de um arranjo linear de dipolos de <math>\lambda/2</math>, para obtenção de 7° de inclinação abaixo da horizontal.....</i>	<i>69</i>
<i>Tabela 5.2 - Classes de potência para transceptores GSM. ....</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 5.3 - Tipos de cabos e aplicações típicas. ....</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 5.4 - Valores de atenuação típicos nos cabos. ....</i>	<i>76</i>
<i>Tabela 7.1 - Valores default para número de transceptores por setor ....</i>	<i>92</i>
<i>Tabela 7.2 - Campos do arquivo exportado pelo SITAR.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 7.3 - Campos dos equipamentos transceptores no SGCH.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabela 7.4 - Tecnologias e larguras de banda da portadora utilizada.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 7.5 - Campos das antenas no SGCH. ....</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 8.1 – Dados técnicos das estações 667979077 (Oi) e 684126605 (TIM). ....</i>	<i>111</i>
<i>Tabela 8.2 - Dados técnicos das estações 683934171 (Claro), 667984020 (Oi) e 683016687 (TIM). ....</i>	<i>118</i>
<i>Tabela 8.3 - Dados técnicos das estações 683135589 (Oi), 674669452 (TIM) e 683934481 (Claro). ....</i>	<i>122</i>
<i>Tabela 8.4 - Dados técnicos da estação 665611676 (Oi). ....</i>	<i>126</i>
<i>Tabela 8.5 - Dados técnicos das estações 683172824 (Tim) e 403090458 (Claro). ...</i>	<i>127</i>
<i>Tabela 8.6 - Campos dos registros - análise espectral. ....</i>	<i>135</i>
<i>Tabela 8.7 - Campos dos registros - avaliação de segurança. ....</i>	<i>139</i>

## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 - Espectro eletromagnético.....</i>	<i>14</i>
<i>Figura 2.1 - Evolução dos sistemas celulares.....</i>	<i>20</i>
<i>Figura 2.2 - Ocupação das faixas de 800 e 900 MHz.....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.3 - Ocupação das Faixas de 1800, 1900 e 2100MHz. ....</i>	<i>26</i>
<i>Figura 2.4 - Evolução do quantitativo de terminais móveis no Brasil. ....</i>	<i>27</i>
<i>Figura 2.5 - Estrutura básica dos sistemas celulares de primeira geração. ....</i>	<i>28</i>
<i>Figura 2.6 - Arquitetura UMTS conceitual. ....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 2.7 - Redução das células para aumento de capacidade do sistema. ....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 2.8 - Setorização das células para aumento de capacidade do sistema. ....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 3.1 - Níveis de referência adotados mundialmente. ....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 4.1 - Coexistências de tecnologias atuais e legadas. ....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 5.1 - Modelo de um sistema irradiante.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 5.2 - Exemplos de antenas do SMP. ....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 5.3 - Exemplo de diagrama de irradiação para uma antena direcional.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 5.4 - Visão tridimensional do diagrama de irradiação composto por mais de uma antena. ....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 5.5 - Ângulo de meia potência de um diagrama de irradiação.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 5.6 - Irradiação normal (a) e com downtilt mecânico (b).....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 5.7 - Defasagem entre os elementos irradiadores de uma antena e a consequente alteração na frente de onda. ....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 5.8 - Irradiação normal (a) e com downtilt elétrico (b).....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 5.9 - Comparação entre o downtilt mecânico (a) e o elétrico (b).....</i>	<i>72</i>
<i>Figura 5.10 - Número de transceptores e bastidores por site para suportar uma configuração de alta capacidade (20 usuários/MHz/setor).....</i>	<i>73</i>
<i>Figura 5.11 - Esquemas de combinação híbrida (a) bypass, (b) 2-way e (c) 4-way; (d) combinação por cavidade ressonante. ....</i>	<i>74</i>
<i>Figura 5.12 - Utilização dos combinadores de banda ou diplexers. ....</i>	<i>75</i>
<i>Figura 6.1 - Vista superior de uma ERB para determinação do ângulo horizontal.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 6.2 - Vista lateral de uma ERB para determinação do ângulo vertical.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 6.3 - Conceito de “zonas de concentração” ....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 6.4 - Conceito de “distância mínima segura”. ....</i>	<i>84</i>
<i>Figura 7.1 - Diagrama geral do programa computacional desenvolvido para elaboração de relatórios de RNI. ....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 7.2 - Fluxograma básico do programa principal.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 7.3 - Plano contendo o grid de pontos para o cálculo da densidade de potência. .....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 7.4 - Percentuais das contribuições dos efeitos térmicos relevantes das estações. .....</i>	<i>102</i>
<i>Figura 7.5 - Zonas de concentração / restrição no entorno de uma Estação Rádio Base compartilhada. ....</i>	<i>103</i>
<i>Figura 7.6 - Percentuais de CETRE na direção radial para o azimute de irradiação máxima. ....</i>	<i>104</i>
<i>Figura 8.1 - Estações Rádio Base do SMP em Niterói/RJ. ....</i>	<i>107</i>
<i>Figura 8.2 - Cenário 1 – Campus do Gragoatá da UFF. ....</i>	<i>108</i>
<i>Figura 8.3 - Resultados teóricos (modelo diretivo) - estação 667979077 (Oi).....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 8.4 - Resultados teóricos (modelo onidirecional) - estação 667979077 (Oi)..</i>	<i>113</i>
<i>Figura 8.5 - Resultados teóricos (modelo diretivo) - estação 684126605 (Tim).....</i>	<i>115</i>

<i>Figura 8.6 - Resultados teóricos (modelo onidirecional) - estação 684126605 (Tim)</i>	116
<i>Figura 8.7 - Cenário 2 – Campus Praia Vermelha da UFF.</i>	117
<i>Figura 8.8 - Resultados teóricos (modelo diretivo) – Cenário 2 – Campus Praia Vermelha da UFF.</i>	119
<i>Figura 8.9 - Resultados teóricos (modelo onidirecional) – Cenário 2 – Campus Praia Vermelha da UFF.</i>	120
<i>Figura 8.10 - Cenário 3 - Charitas.</i>	121
<i>Figura 8.11 - Resultados teóricos (modelo diretivo) – Cenário 3 – Charitas.</i>	123
<i>Figura 8.12 - Resultados teóricos (modelo onidirecional) – Cenário 3 – Charitas.</i>	124
<i>Figura 8.13 - Cenário 4 - Piratininga.</i>	125
<i>Figura 8.14 - Resultados teóricos (modelo diretivo) – Cenário 4 – Piratininga.</i>	128
<i>Figura 8.15 - Resultados teóricos (modelo onidirecional) – Cenário 4 – Piratininga.</i>	129
<i>Figura 8.16 - Equipamento SRM-3000, utilizado nas medições.</i>	130
<i>Figura 8.17 - ERB's do cenário 1 – Campus do Gragoatá da UFF.</i>	131
<i>Figura 8.18 - Pontos de medição escolhidos para o cenário 1 – Campus do Gragoatá da UFF.</i>	131
<i>Figura 8.19 - ERB do cenário 2 – Campus da Praia Vermelha da UFF.</i>	132
<i>Figura 8.20 - Pontos de medição escolhidos para o cenário 2 – Campus da Praia Vermelha da UFF.</i>	132
<i>Figura 8.21 - ERB do cenário 3 – Charitas.</i>	133
<i>Figura 8.22 - Pontos de medição escolhidos para o cenário 3 – Charitas.</i>	133
<i>Figura 8.23 - ERB do cenário 4 – Piratininga.</i>	134
<i>Figura 8.24 - Pontos de medição escolhidos para o cenário 4 – Piratininga.</i>	134
<i>Figura 8.25 - Valores máximos medidos de densidade de potência para os cenários 1 e 2.</i>	137
<i>Figura 8.26 - Valores máximos medidos de densidade de potência para os cenários 3 e 4.</i>	138
<i>Figura 8.27 - Valores medidos do CETRE para cada ponto de análise do cenário 1 – Campus do Gragoatá da UFF.</i>	141
<i>Figura 8.28 - Resultados obtidos para o cenário 1 – Campus do Gragoatá da UFF.</i>	141
<i>Figura 8.29 - Valores medidos do %CETRE para cada ponto de análise do cenário 2 – Campus Praia Vermelha da UFF.</i>	142
<i>Figura 8.30 - Resultados obtidos para o cenário 2 – Campus Praia Vermelha da UFF.</i>	143
<i>Figura 8.31 - Valores medidos do %CETRE para cada ponto de análise do cenário 3 – Charitas.</i>	144
<i>Figura 8.32 - Resultados obtidos para o cenário 3 – Charitas.</i>	144
<i>Figura 8.33 - Valores medidos do %CETRE para cada ponto de análise do cenário 4 – Piratininga.</i>	145
<i>Figura 8.34 - Resultados obtidos para o cenário 4 – Piratininga.</i>	146

## **LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS**

ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações

ANSI – American National Standards Institute

CEM – Campos Eletromagnéticos

CEMRF – Campos Elétricos e Magnéticos de Radiofrequência

CETRE – Contribuição para os Efeitos Térmicos Relevantes

EIRP – Potência Equivalente Isotropicamente Radiada: potência entregue a uma antena, multiplicada pelo ganho da antena em relação a uma antena isotrópica.

ELF – Extremely Low Frequency

ERP – Potência Efetiva Radiada: potência entregue a uma antena, multiplicada pelo ganho da antena em relação a um dipolo de meia onda.

ERB – Estação Rádio Base

FCC – Federal Communication Commission, agência fiscalizadora e reguladora norte-americana para todos os tipos de comunicações.

ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection

OMS – Organização Mundial da Saúde

RF – Radiofrequência

RNI – Radiação Não Ionizante

SAR – Specific Absorption Rate (taxa de absorção de energia específica)

SMP – Serviço Móvel Pessoal

WHO – World Health Organization

## RESUMO

As Radiações não ionizantes têm adquirido, nos últimos anos, particular destaque nos mundos acadêmico, governamental, empresarial e para a população em geral. Estas radiações, de forma abreviada RNI, são radiações com frequência abaixo da ultravioleta e que não têm energia suficiente para ionizar um material. Assim sendo, a energia proveniente da radiação, ao ser absorvida pelos átomos ou moléculas, não chega a ser suficiente para provocar o desprendimento de elétrons dos átomos, mas pode implicar em um aumento da temperatura do tecido (efeito térmico).

Devido à complexidade deste tema, a resposta para a questão dos efeitos térmicos, de interesse deste trabalho, vem da investigação e coordenação com as mais diversas áreas, como a biologia, a medicina e a engenharia, entre outras. Portanto, a engenharia de telecomunicações possui um papel fundamental para esclarecimento da sociedade, principalmente no que diz respeito aos níveis de referência para a exposição à RNI.

O presente trabalho tem por objetivo propor um modelo de avaliação de Estações Rádio Base do sistema móvel celular e apresenta a modelagem teórica e o desenvolvimento de uma ferramenta para simulação computacional, voltada para a análise dos efeitos térmicos causados por CEMRF (Campos Elétricos e Magnéticos de Radiofrequência) gerados por sistemas celulares em locais multiusuários.

São também apresentadas medições práticas realizadas em campo, com objetivo de análise e comprovação da funcionalidade do modelo e seus resultados discutidos neste trabalho.

Palavras chave: Radiação Não Ionizante; Estação Rádio Base; laudo radiométrico; densidade de potência; infraestrutura celular; compartilhamento.

## ABSTRACT

In recent years non ionizing radiation has won particular importance in the academic, governmental, business world and also for the population in general. These radiations, in abbreviated form NIR, are radiation with frequency below UV and which do not have enough power to ionize materials. In this way, energy from radiation, absorbed by atoms and molecules is not enough sufficient to provoke the detachment of electrons from atoms, but may result in an increase in temperature of the tissue (thermal effect).

Considering the complexity of this theme, the answer to the matter of the thermal effect, of interest to this work, comes from research and coordination of the most diverse areas, such as biology, medicine, and engineering, among others. Thus, the telecommunications engineering has a key role in clarifying population as regards radiation reference levels.

This study aims to propose a model for evaluation of the transmitting stations of cellular mobile system and presents a theoretical modeling and the development of a computer simulation tool, for analysis of thermal effects caused by CEMRF generated by Radio Base Stations in multiplayer environments.

Field measurements, with the purpose of analysis and verification of the functionality of the model are also presented and discussed in this work.

**Key Words:** Non Ionizing Radiation; Radio Base Station; power density, cellular infrastructure, site sharing; radiometric report.

## 1. Introdução

A motivação para o desenvolvimento deste trabalho deu-se em função do rápido crescimento da telefonia móvel no cenário mundial e, conseqüentemente, pelo crescente interesse da população nos possíveis efeitos causados pela radiação eletromagnética gerada por estes sistemas. Apesar de todo o esforço da comunidade científica em dimensionar estes efeitos e disseminar os resultados obtidos, ainda há demanda por pesquisas conclusivas e por modelos que possam avaliá-los de forma mais apurada.

De acordo com a Associação Nacional das Operadoras Celulares, a ACEL, atualmente existem aproximadamente 1,5 milhões de Estações Rádio Base no mundo, e este número aumenta significativamente com a tecnologia de terceira geração, o que gera uma preocupação comum em relação a ERB's, no que diz respeito aos danos à saúde que possam advir da exposição de longo prazo do corpo humano aos sinais de RF. Os níveis de radiação, expressos em termos de Taxa de Absorção Específica – SAR, provenientes de telefones celulares e considerados seguros para a região da cabeça, conforme a exigência legal, podem ser vinte e cinco vezes maiores, em intensidade, do que aqueles recomendados para as Estações Rádio Base. E, ainda assim, as pessoas preocupam-se mais com os efeitos provenientes das emissões das ERB's. Este comportamento talvez possa ser explicado pelo fato do uso de terminais ser avaliado pela população como um risco voluntário, enquanto a instalação de uma Estação Rádio Base, nas proximidades de suas residências ou seus locais de trabalho, pode ser vista como um risco imposto, sobre o qual as pessoas não têm nenhum tipo de controle. Originário da política ambiental européia da década de 70, o “Princípio da Precaução” [MILARÉ, 1] é expresso em ditos populares como “é melhor prevenir que remediar” ou “erre no lado da cautela”. Na prática, isto significa tomar medidas na direção de evitar possíveis danos para a saúde, mesmo diante de evidência científica insuficiente. Daí, a cobrança da sociedade por um maior controle por parte das autoridades e órgãos competentes, quanto aos níveis de segurança estipulados.

A década de 90 foi marcada pela explosão, em escala mundial, das comunicações celulares, e, neste momento, já estão em funcionamento os sistemas de 3ª geração. A chegada da 3ª geração e a concentração de tecnologias num único terminal abre portas para mais e mais usuários. A expansão dos sistemas, motivada pelo

crescimento contínuo do número de assinantes, leva ao aparecimento de novas operadoras, de mais Estações Rádio Base e terminais móveis, e o desconhecimento sobre o assunto fomenta o surgimento de opiniões e receios. Surge a questão: qual é o impacto das radiações eletromagnéticas provenientes dos sistemas de comunicações móveis no organismo humano?

A resposta para esta questão vem da investigação e coordenação entre as mais diversas áreas, como a biologia, a medicina e a engenharia, entre outras.

## 1.1. Histórico

No fim da Segunda Guerra Mundial, os militares americanos começaram a se interessar pelos efeitos biológicos causados pela exposição a micro-ondas emitidas pelos radares. Em 1954, a Força Aérea Americana reconheceu que a exposição a micro-ondas, com densidade de potência de  $100 \text{ mW/cm}^2$ , podia causar dano aos tecidos humanos, principalmente aos olhos.

Após o término da guerra, a Clínica Mayo, nos Estados Unidos, era o centro mais importante de estudos dos efeitos biológicos causados pelas micro-ondas. Em 1955, ela organizou o *Symposium on Physiologic and Pathologic Effects of Microwaves*, em cujos anais eram apresentadas sugestões para futuros estudos. Nesta ocasião, Schwan & Li (1956) concluíram que micro-ondas, com densidade de potência de  $10 \text{ mW/cm}^2$ , não deveriam ser aplicadas durante mais de uma hora, se a energia fosse absorvida pelo corpo inteiro.

Duas conferências se seguiram: *The First and The Second Annual Triservice Conference on Biological Hazards of Microwave Radiation*, em 1957 e 1958, respectivamente. O relato apresentado nestas conferências sobre a indução de catarata em um técnico de radar, muito bem documentado por Hirsch, da empresa Sandia, chamou a atenção dos especialistas. Este fato motivou o início do estabelecimento de recomendações por parte de diversas organizações, as quais consideraram que uma densidade de potência de  $100 \text{ mW/cm}^2$  produzia efeitos danosos ao organismo humano.

Em 1957, a *American Telephone and Telegraphic Company* em conjunto com o *Bell Telephone Laboratories* e, em 1958, a Marinha e o Exército dos Estados Unidos e a

*General Electric Co.* adotaram o limite de  $10 \text{ mW/cm}^2$  para toda a faixa de micro-ondas.

A partir de 1960, resultados de estudos teóricos usando modelos matemáticos simples, os quais consideravam os seres humanos em forma de esfera, cilindro circular ou esferóide prolato<sup>1</sup>, indicavam que os efeitos biológicos relativos ao aquecimento apresentavam grande dependência da frequência dos campos eletromagnéticos e que, portanto, os valores limites de recomendações deveriam variar com a faixa de frequências.

Em 1965, o Departamento de Defesa dos Estados Unidos adotou o limite para a densidade de potência de  $10 \text{ mW/cm}^2$ . Em 1966, o *American National Standards Institute* (ANSI) também adotou para exposição permissível máxima o mesmo valor médio de densidade de potência de  $10 \text{ mW/cm}^2$  em um período de 6 minutos qualquer, para frequências entre 10 e 100 MHz. A definição destes valores era baseada nos efeitos térmicos e considerava que o valor de densidade de potência de  $10 \text{ mW/cm}^2$  aumentava a carga de calor de um valor comparável à taxa metabólica<sup>2</sup>.

Em 1975, baseado no trabalho de um comitê que analisou cerca de 1.700 artigos relativos aos efeitos biológicos, o qual procurou investigar a comprovação de efeitos não-térmicos, o ANSI reafirmou os limites anteriores, apenas com pequenas modificações.

Em 1982, o ANSI emitiu novas recomendações, as quais consideravam que, para a faixa de 300 kHz a 100 GHz, a taxa de transferência de energia dos campos eletromagnéticos ao corpo humano dependia fortemente da sua frequência e do tamanho do corpo.

---

<sup>1</sup> Um esferóide é uma superfície quádrlica em três dimensões obtida através da rotação de uma elipse ao redor de um de seus eixos principais. Se a elipse for rotacionada ao redor de seu eixo maior, esta superfície é chamada de esferóide prolato (similar ao formato de uma bola de futebol americano). Se o eixo menor for escolhido, a superfície é chamada de esferóide oblato (similar ao formato do planeta Terra ou de uma abóbora). <http://pt.wikipedia.org/wiki/Esferoide>

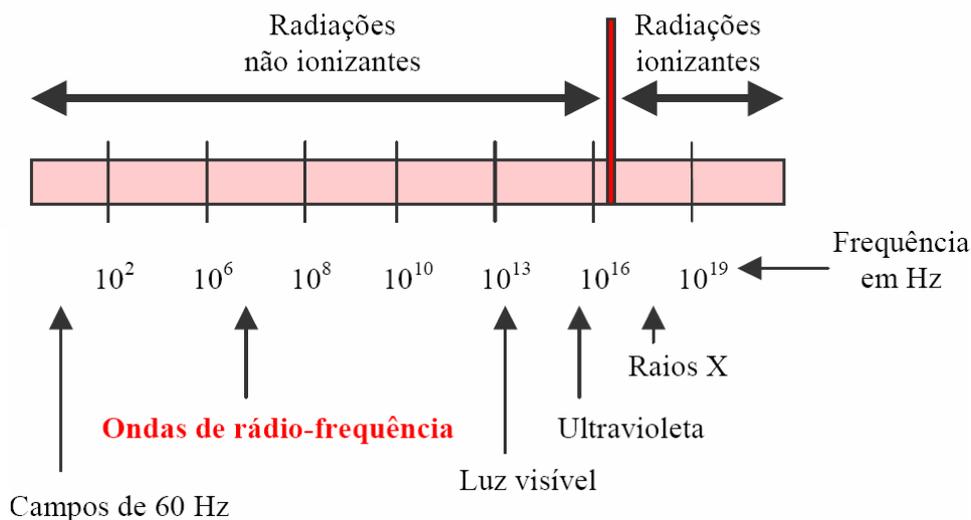
<sup>2</sup> Em termos de produção de calor metabólico humano,  $4 \text{ W/kg}$  representam um nível de atividade moderado, (ex., limpar a casa ou dirigir um caminhão) e pode ser considerados como dentro da faixa normal de termo regulação humana. [IEEE Std C95.1.]

Desde então, diversos organismos e entidades competentes desenvolvem e financiam estudos orientados para o conhecimento dos valores dos campos eletromagnéticos a partir dos quais podem vir a apresentar efeitos adversos no organismo humano. A partir destes valores, estabelecem-se níveis de referência para exposição à radiação [CVS, 2].

## **1.2. Ambientação**

Neste estudo, é importante diferenciar “efeitos” e “danos” causados pela radiação eletromagnética, visto que, muitas vezes, a utilização inadequada destes termos induz à confusão e à disseminação de falsos conceitos para a população. Efeito biológico, para o ser humano, é apenas uma resposta a um estímulo externo; no caso, à energia das ondas eletromagnéticas. Esta resposta pode ou não representar um perigo. Dano à saúde é uma consequência do perigo associado ao efeito biológico. Como por exemplo, a exposição direta das pessoas à luz solar, em quantidades moderadas, é considerada como um ato saudável, ao passo que esta mesma exposição, quando feita em demasia, sem proteção e durante um intervalo de tempo prolongado, pode acarretar sérios danos à saúde [OMS, 3].

Uma das características mais importantes dos campos e ondas eletromagnéticas é a sua frequência. A gama de frequências das fontes naturais e também das fontes artificiais é muito diversificada e, normalmente, apresenta-se um gráfico, onde são relacionadas as várias frequências e suas respectivas utilizações, denominado de espectro eletromagnético.



**Figura 1.1 - Espectro eletromagnético**

O espectro eletromagnético possui uma divisão, localizada após as frequências da luz visível, que separa as radiações em dois grandes blocos. As radiações de frequências abaixo desta divisão são conhecidas como radiações não ionizantes e as situadas acima são radiações ionizantes. Quando a radiação eletromagnética incide em um material, parte da energia pode ser absorvida pelos átomos constituintes do mesmo. Dependendo da frequência da radiação, ao ser absorvida pelos átomos ou moléculas, a energia pode ser suficiente para provocar o desprendimento de elétrons dos átomos, formando íons (ionização), e a estrutura do material que absorveu a energia da radiação irá sofrer mudanças. Para que ocorra a ionização do material, a frequência da radiação tem que ser muito elevada. Apenas radiações com frequência acima do ultravioleta têm energia suficiente para ionizar materiais e são conhecidas como radiações ionizantes. Assim, as frequências utilizadas nos sistemas de telecomunicações (rádio, TV e telefonia celular) são radiações não ionizantes. Quando estas radiações incidem em um tecido vivo, não provocam reações químicas, mas implicarão em um aumento da temperatura do tecido (efeito térmico). Os campos penetram somente a uma pequena distância dentro do corpo. A energia desses campos é absorvida e transformada em movimento das moléculas. A fricção entre moléculas em movimento rápido resulta em um aumento da temperatura. Os níveis de RF aos quais as pessoas estão normalmente expostas em nosso ambiente são muito inferiores aos necessários para a produção de um aquecimento significativo [OMS, 3].

### 1.3. Revisão Bibliográfica

Para que se tenha uma visão geral das pesquisas realizadas sobre o tema, os principais trabalhos desenvolvidos e publicados na literatura técnica serão a seguir apresentados sumariamente:

- **Balzano e Faraone [4-5]**, em 1999, utilizaram o conceito de que a exposição humana aos Campos Elétricos e Magnéticos de Radiofrequência – CEMRF irradiados por antenas de ERB's pode ser avaliada em termos de densidade de potência e da queda do nível do sinal com a distância em relação à antena. Desenvolveram, então, equações para predição da queda da densidade de potência para um arranjo de antenas colineares através de equações simplificadas, baseadas em estimativas de “pior caso”. Demonstraram, ainda, que os campos possuem características cilíndricas na região de campo próximo e convertem, gradualmente, para o comportamento esférico na região de campo distante. Entretanto, as equações apresentadas caracterizam apenas a densidade de potência para um único arranjo de antenas colineares, não sendo contemplado o comportamento conjunto para mais de um arranjo. Além deste fato, apesar da importância deste estudo, na prática, as propriedades direcionais das antenas são fornecidas em termos de características básicas e de diagramas de irradiação do arranjo colinear como um todo.

- **Bernardi et al. [6]**, analisaram, em 2000, a exposição humana a CEMRF irradiados por uma ERB operando na faixa de 900 MHz em ambiente urbano. Utilizaram-se de um método híbrido capaz de avaliar desde o diagrama de irradiação da antena até as muitas reflexões que ocorrem em um ambiente urbano. O modelo apresentado fundamentou-se nos métodos de *Ray tracing* (G. A. Deschamps, 1972) e da diferença finita no domínio do tempo (*finite-difference time-domain – FDTD*, K. S. Kunz and R. J. Luebbers, 1993), capazes de modelar reflexões de primeira ordem. O estudo demonstra não haver uniformidade na distribuição do campo produzido por ERB's em ambientes urbanos, em função do diagrama de irradiação das antenas de painel típicas e das muitas reflexões no ambiente.

- **Cooper et al. [7]** (2002) investigaram, através de cálculos e medições realizadas, os limites de distância de segurança para seres humanos próximos às antenas das ERB's, adotando os padrões ICNIRP e IEEE. Os estudos indicaram que, para uma

ERB GSM operando em 935 MHz e com potência irradiada de 40 W, a distância em relação à antena não deve exceder o limite de 5 a 18 cm para a exposição controlada e 75 a 95 cm para a exposição não controlada. Contudo, o estudo não apresenta um modelo para a avaliação de mais de um sistema irradiante.

- **Roje, V. [8]** (2003) avaliou os aspectos de segurança relacionados a ERB's GSM para a saúde humana, por meio do modelo numérico do corpo humano, utilizando a teoria de antenas e uma combinação do “método dos elementos de fronteira” (*Boundary Element Method – BEM*) e do “método dos elementos finitos” (*Finite Element Method – FEM*). O estudo demonstrou que o modelo proposto pode ser utilizado com sucesso para previsão da penetração de CEMRF no corpo humano e concluiu que a adoção da combinação das técnicas de predição numérica e de medições diretas se mostra mais eficiente, uma vez que nem sempre é possível prever corretamente os valores de CEMRF, especialmente em locais de relevo complexo, além do fato de valores diretamente medidos serem normalmente melhor aceitos pela população.

- **Miclaus e Bechet [9]** (2006), realizaram uma comparação entre valores medidos e estimados para a densidade de potência no entorno de ERB's. Os cálculos teóricos consideraram os dados técnicos das antenas, sem, no entanto, considerar seus diagramas de irradiação. O estudo concluiu que, em uma primeira instância, podem ser utilizados métodos teóricos para estimativa dos níveis de densidade de potência ou campo elétrico para que se tenha idéia dos níveis de exposição nas proximidades de uma ERB. Ressalta, entretanto, que a correlação entre os cálculos utilizando a propagação no espaço livre e os valores medidos dos picos de densidade de potência, é fraca, por se tratar de um modelo pessimista.

- **Atualmente**, um padrão internacional para avaliação de exposição - **IEC 62232 [10]** está sendo desenvolvido. Este padrão irá incluir protocolos de medição e cálculo para avaliação da SAR (taxa de absorção específica) [IEC, 2008].

Dentre os principais trabalhos publicados no Brasil, destacam-se os estudos realizados por:

- **Dias e Siqueira [11]** (2002), realizaram cálculos teóricos para estimativa da distância em relação à ERB, considerada segura para a saúde humana de acordo com a legislação vigente, envolvendo análises de “pior caso”. Foram analisados sistemas típicos TDMA com três setores e com número máximo de portadoras alocadas (vinte e um). O estudo considerou antenas com ganho de 10 dBi e potência de transmissão variando entre 30 e 45 dBm. Os resultados indicaram distâncias de segurança variando de 2 a 11 metros para estações operando na faixa de 900 MHz e 1,3 a 7,5 metros para estações operando na faixa de 1900 MHz. Foram realizadas medições próximas a estações nas cidades do Rio de Janeiro e Nova Friburgo. Os resultados das medições mostraram valores muito inferiores aos limites de segurança e com ordem de grandeza em conformidade com outras medições e estimativas encontradas na literatura.

- **Terada [12]** (2007) publicou um estudo de grande valia para este trabalho, onde são investigadas em detalhes as propriedades direcionais de irradiação de antenas em função de diversas variáveis, além da usual distância em relação à ERB. Foi demonstrado que o máximo da intensidade do campo elétrico ocorre a distâncias diferentes da ERB, dependendo destas outras variáveis, levando à conclusão que fixar uma distância mínima de regiões povoadas para a instalação de ERB's não é a maneira adequada para se assegurar a segurança e o bem-estar da população. Este assunto será discutido neste trabalho, juntamente com o conceito de “zonas de concentração” de RNI.

Além dos estudos citados, vários outros trabalhos pesquisados apresentaram resultados de medições realizadas nas vizinhanças de ERB's, tendo sido verificado que os níveis praticados encontravam-se bem abaixo dos níveis de referência adotados pela legislação vigente.

Este estudo pretende apresentar uma abordagem técnica, levando em consideração as contribuições de diversas fontes emissoras irradiando ondas eletromagnéticas de forma simultânea, situação muito comum no Brasil, devido ao compartilhamento de infraestrutura. Esta foi uma forma natural encontrada pelas operadoras de telefonia celular para reduzir custos operacionais e causar menos impacto no ambiente, o que de certa forma agrada à população, prefeituras e organizações ambientais.

Uma Estação Rádio Base compartilhada pode conter equipamentos de várias operadoras de telefonia celular, cada qual com suas diferentes características de irradiação do sinal, contribuindo aditivamente com a potência irradiada pelos equipamentos de outras operadoras. Outro fator a ser analisado é a sobreposição de tecnologias, pois, frequentemente, uma operadora possui duas ou mais tecnologias operando simultaneamente. A regulamentação exige que a transição de uma tecnologia para outra seja feita sem que haja prejuízo aos usuários que ainda fazem uso das tecnologias legadas. Assim, há casos onde uma única operadora possui mais de uma tecnologia em cada Estação Rádio Base. Existem, no Brasil, sistemas GSM operando em conjunto com sistemas TDMA, CDMA e UMTS, todos em uma mesma estação, que ainda pode estar sendo compartilhada com outras operadoras.

#### **1.4. Objetivos**

Este trabalho tem como objetivos: 1. Propor um modelo diretivo para predição dos níveis de radiação não ionizante gerada por sistemas celulares em locais compartilhados; 2. Desenvolver um programa computacional baseado no modelo teórico proposto, contendo uma extensa e consistente base de dados técnica de sistemas celulares, para fins de identificação das regiões que atendem aos limiares internacionalmente aceitos para proteção contra a Radiação Não Ionizante; 3. Comprovar, através de medições, a eficácia do modelo teórico proposto.

#### **1.5. Roteiro**

Para atingir os objetivos acima estabelecidos, no **capítulo 1**, foi realizada uma abordagem inicial sobre o tema escolhido.

No **capítulo 2**, será apresentada, de forma sucinta, a evolução da telefonia celular nos últimos anos, no cenário das telecomunicações no Brasil e no mundo. Serão apresentados conceitos sobre as tecnologias passadas até chegar aos padrões empregados nos dias de hoje, com uma breve apresentação do cenário futuro. Serão feitas algumas considerações básicas acerca das estações terminais portáteis.

No **capítulo 3**, serão mostradas as principais funções de cada organismo responsável pela normatização acerca dos efeitos biológicos, em função da crescente

preocupação da humanidade. Serão analisadas as normatizações e posicionamento de alguns dos países envolvidos nas questões relacionadas ao controle de emissão de RNI e será feito um paralelo entre os níveis adotados pelos mesmos.

No **capítulo 4**, serão analisadas as normatizações, níveis de referência propostos e as condições para operação das estações em ambientes multiusuários, além da demonstração de alguns cálculos iniciais.

No **capítulo 5**, serão apresentados os equipamentos que compõem uma Estação Rádio Base e suas principais características, que podem, de alguma forma, influenciar na densidade de potência do sinal recebida em um determinado ponto distante da estação.

No **capítulo 6**, todas estas informações são reunidas a fim de consolidar o modelo proposto para a análise de RNI nas Estações Rádio Base do SMP no Brasil.

No **capítulo 7**, este modelo será descrito sob a forma computacional para facilitar cálculos em grande escala de estações mais complexas, que podem envolver vários sistemas irradiantes, frequências e tecnologias distintas.

No **capítulo 8**, o modelo proposto será comparado com medições reais utilizando equipamentos específicos para estas medições.

No **capítulo 9**, serão expostas, de forma sintetizada, as conclusões, baseadas no conhecimento adquirido durante todo o trabalho. Ressalta-se que este trabalho é, ainda, intensivo em programação computacional (*software*).

## 2. Evolução da Telefonia Celular

Por várias razões, a evolução da telefonia celular nos últimos anos seguiu caminhos diferentes nas regiões de maior número de usuários do mundo: Europa, Estados Unidos e Japão. Conforme apresentado na figura 2.1, as três regiões começaram com seu próprio padrão analógico, não vislumbrando, inicialmente, que seu padrão de telefonia celular pudesse ser aproveitado em outras regiões do mundo. O Brasil optou por não desenvolver seu padrão próprio, adequando soluções já existentes, as quais serão elucidadas a seguir.

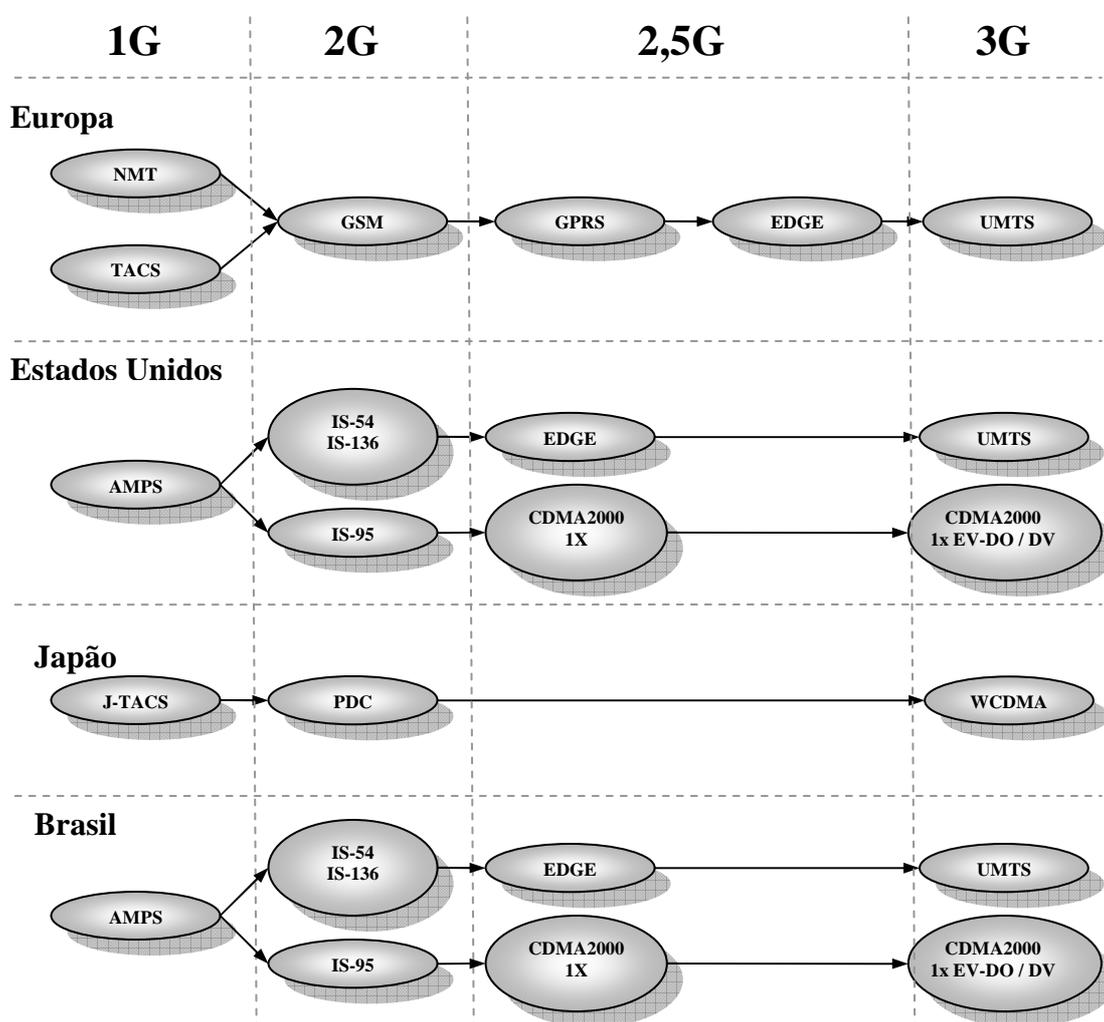


Figura 2.1 - Evolução dos sistemas celulares

## 2.1. Evolução da Telefonia Celular no mundo

Nos Estados Unidos, em 1974, a FCC regulamentou as faixas para telefonia celular, que, posteriormente, puderam ser aplicadas com pouca ou nenhuma modificação na maioria dos outros países. Em 1975, começou o desenvolvimento daquele que seria o primeiro grande sistema comercial de telefonia móvel: o AMPS (*Advanced Mobile Phone System*), que colocou em prática todas as propostas inovadoras relacionadas com a adoção de operação em células e uso de menores potências operacionais. Em 1978, foi ativado um sistema de testes em Chicago, objetivando demonstrar as reais possibilidades do sistema AMPS, que, finalmente, entrou em operação comercial em 1983. Em que pese sua interface de RF ser analógica, hoje obsoleta, o AMPS teve o mérito de viabilizar soluções que consolidaram o padrão de telefonia móvel até hoje empregado. Foi o padrão dominante, tendo servido de base para o desenvolvimento de outros sistemas, como o TACS inglês [ULBRICH, 13].

Estas soluções passaram a ser padrão mundial e, mesmo os sistemas digitalizados que surgiram posteriormente, utilizaram a estrutura básica introduzida pelo AMPS. Outra observação importante foi o desenvolvimento dos terminais portáteis, ampliando o conceito anterior que obrigava a comunicação móvel a ser operada apenas na forma embarcada.

O sistema móvel celular, a exemplo dos sistemas de telefonia fixa, foi inicialmente concebido com vistas ao serviço básico de voz. Entretanto, outros serviços poderiam ser acrescentados, como dados, fax e SMS, entre outros, atuando, também, como fonte de renda adicional nos serviços. Isto exigiria mais recursos do sistema e rapidamente concluiu-se que a saída estaria na digitalização do sistema, solução que apresentava melhor capacidade para agregar estes serviços suplementares. Das diferentes propostas, duas firmaram-se comercialmente: o D-AMPS e o CDMA.

O D-AMPS (Digital AMPS ou AMPS digital), padronizado inicialmente pelo padrão IS-54 e aperfeiçoado pelo padrão IS-136, utiliza diretamente a estrutura de canais de 30 kHz, mantendo, portanto, uma compatibilidade plena com o sistema analógico já implantado, justificando o nome inicial. A largura de banda de 30 kHz é compartilhada, no tempo, em 3 intervalos de tempo (*time-slots*) comutados digitalmente, numa técnica conhecida como TDMA (*Time Division Multiple Access* ou

Acesso Múltiplo por Divisão de Tempo). O nome do sistema D-AMPS foi abandonado na prática, sendo totalmente substituído pelo nome da tecnologia, razão do uso extensivo do nome TDMA até hoje [PINHEIRO, 14].

O CDMA (*Code Division Multiple Access* ou Acesso Múltiplo por Divisão de Código), concorrente do TDMA nos EUA, defendia a técnica de espalhamento espectral (*spread spectrum*). Nesta técnica é usada, para um determinado canal, uma grande largura de banda, muitas vezes maior do que a necessária para a transmissão de um determinado sinal. O sinal de voz (ou dados) de um usuário ocupa toda a banda de 1,23 MHz do canal CDMA. O que, a princípio, parece ser uma desvantagem, torna-se uma vantagem poderosa, quando são consideradas as condições em que este canal de banda larga é utilizado. Outros assinantes podem utilizar a mesma banda ao mesmo tempo; a diferenciação entre cada assinante é feita por códigos especiais associados a cada transmissão. Cada ligação em andamento porta um código específico, logo, não ocorre o uso do mesmo código para ligações diferentes. Um detalhe importante é que um sistema CDMA não precisa utilizar o reuso de frequências. A não-interferência é obtida através dos códigos [ULBRICH, 13].

A Europa começou com vários sistemas analógicos 1G como o TACS na Inglaterra e o NMT nos países escandinavos. Estes sistemas não operavam nas mesmas faixas de frequência, o que não era um grande problema, pois, inicialmente, ainda não havia demanda para a interconexão entre eles. Quando a atualização para a segunda geração (digital) se iniciou, a Europa decidiu que um único padrão em todo o continente deveria ser adotado. Após um grande trabalho de desenvolvimento envolvendo vários países, nasceu o sistema GSM, cujos fundamentos técnicos foram definidos em 1987. Em 1990, foi emitida a primeira especificação. Em 1991, foi instalado o primeiro sistema comercial, na Finlândia, logo seguido por outros em todos os países da comunidade européia. O GSM – *Global System for Mobile Communications*, é uma tecnologia celular utilizada em mais de 200 países e territórios, o equivalente a mais de 35% dos habitantes do planeta. A tecnologia GSM usa uma combinação das técnicas de acesso FDMA e TDMA, estruturada, inicialmente, sobre a banda de 900 MHz. Uma portadora de RF do GSM possui largura de banda de 200 kHz que, por meio da técnica TDMA, é subdividida em oito intervalos de tempo. Até 8 conversações simultâneas compartilham uma única portadora ou canal de 200 kHz [ULBRICH, 13].

A crescente demanda levou à busca de novas faixas de operação. Na Europa, foi designada a banda de 1800 MHz, que recebeu a denominação DCS 1800 (*Digital Cellular System* ou Sistema Celular Digital). Esta proposta de banda foi adotada pela maioria dos países, com poucas modificações e com exceção, principalmente, dos EUA.

A oferta de sistemas GSM operando em 1800 MHz teve acolhida global, devido a esta banda estar relativamente disponível na maioria dos países, como no Brasil. O mesmo não ocorreu nos EUA, onde já havia outros sistemas operando nesta banda, principalmente para aplicações militares. Na impossibilidade de desativação destes sistemas, foi feita uma adaptação para frequências na faixa de 1900 MHz. Este novo serviço passou a ser denominado PCS 1900 (*Personal Communications Service* ou Serviço de Comunicações Pessoais), disponível não somente para operações com sistemas GSM, como também para CDMA e D-AMPS (TDMA).

Por razões comerciais, passos intermediários entre a segunda e a terceira gerações foram adotados. O primeiro destes passos, dando início aos denominados sistemas 2,5G, foi a implantação do GPRS (*General Packet Radio Services*), que utiliza o conceito de comutação por pacotes. O próximo passo foi a adoção do protocolo EDGE (*Enhanced Data Rates for GSM Evolution*). Como os novos esquemas de codificação não foram capazes de incrementar a performance da transmissão de dados significativamente, o EDGE incorporou a modulação 8 PSK (enquanto o GSM usa a GMSK), incrementando a taxa de transmissão do 2,5G [ULBRICH, 13].

A União Internacional das Telecomunicações (UIT), no ano 2000, lançou as especificações técnicas para a terceira geração (3G) de telefonia celular, denominada IMT-2000 (*International Mobile Telecommunications - 2000*), cuja principal proposta era proporcionar interoperabilidade entre os sistemas móveis e evitando, assim, a fragmentação que caracterizou as gerações anteriores (1G e 2G). Foi sugerida uma alocação de bandas a nível mundial, que seria adaptada para atender às características de cada país.

A terceira geração de redes de telefonia móvel tem estado sob intensa pesquisa e discussão. A UIT a denominou como *International Mobile Telecommunications 2000 (IMT-2000)* e atualmente, na Europa, é denominada *Universal Mobile Telecommunication System (UMTS)*. Neste contexto, o *Wideband Code Division*

*Multiple Access (WCDMA)* é tido como a principal solução para interface de terceira geração. O UMTS é o sucessor do GSM e já vem sendo largamente utilizado no mundo.

## **2.2. Evolução da Telefonia Celular no Brasil**

No Brasil, a telefonia móvel foi introduzida em 1972, por um sistema anterior à tecnologia celular, de baixa capacidade, com tecnologia IMTS (*Improved Mobile Telephone System*). Instalado em Brasília, este sistema continha apenas 150 terminais. Em 1984, deu-se início à análise de sistemas de tecnologia celular, sendo definido o padrão analógico americano AMPS como modelo a ser introduzido no país [ULBRICH, 13].

Em 16 de julho de 1997, foi aprovada, pelo Congresso Nacional a Lei Geral de Telecomunicações – LGT. Esta lei autorizou a privatização do Sistema Telebrás e criou a Agência Nacional de Telecomunicações - ANATEL, pensada para, numa primeira etapa, viabilizar as privatizações e, depois, desenvolver os trabalhos permanentes e abrangentes de regulamentar, outorgar e fiscalizar.

Com a abertura do mercado de telefonia móvel, o espectro de frequências foi dividido em duas Bandas, A e B, ambas operando na faixa de 800 MHz.

A discussão em torno das tecnologias retornou em 2000, quando da definição da ANATEL pela utilização de novas faixas, destinadas à operação do serviço móvel pessoal (SMP) nas bandas C, D e E. Por fim, foi determinada a faixa de operação segundo o padrão europeu (GSM), por ser a única faixa capaz de possibilitar novos serviços, sem prejudicar os processos e definições de espectro para a terceira geração.

O Regulamento sobre frequências de celular no Brasil (Res. 454 de 11/12/06) criou novas subfaixas de frequências: A banda M (1.800 MHz), que poderia permitir a implantação de uma nova operadora GSM com cobertura nacional; A banda L (1.900 MHz) e as bandas F, G, H, I, J (1.900 e 2.100 MHz), destinadas à implantação de sistemas de terceira geração (3G).

Desta forma, o atual cenário tecnológico brasileiro abriga 4 distintas tecnologias: TDMA, CDMA, GSM, e UMTS operando na faixa de 800 MHz; GSM nas faixas de

900 e 1800 MHz e UMTS na faixa de 2100 MHz. Em 30 de junho de 2008, foi encerrada a utilização do sistema AMPS no Brasil (Resolução 454/2006 da ANATEL).

As figuras 2.2 e 2.3 ilustram a ocupação das diversas faixas de frequência no Brasil.

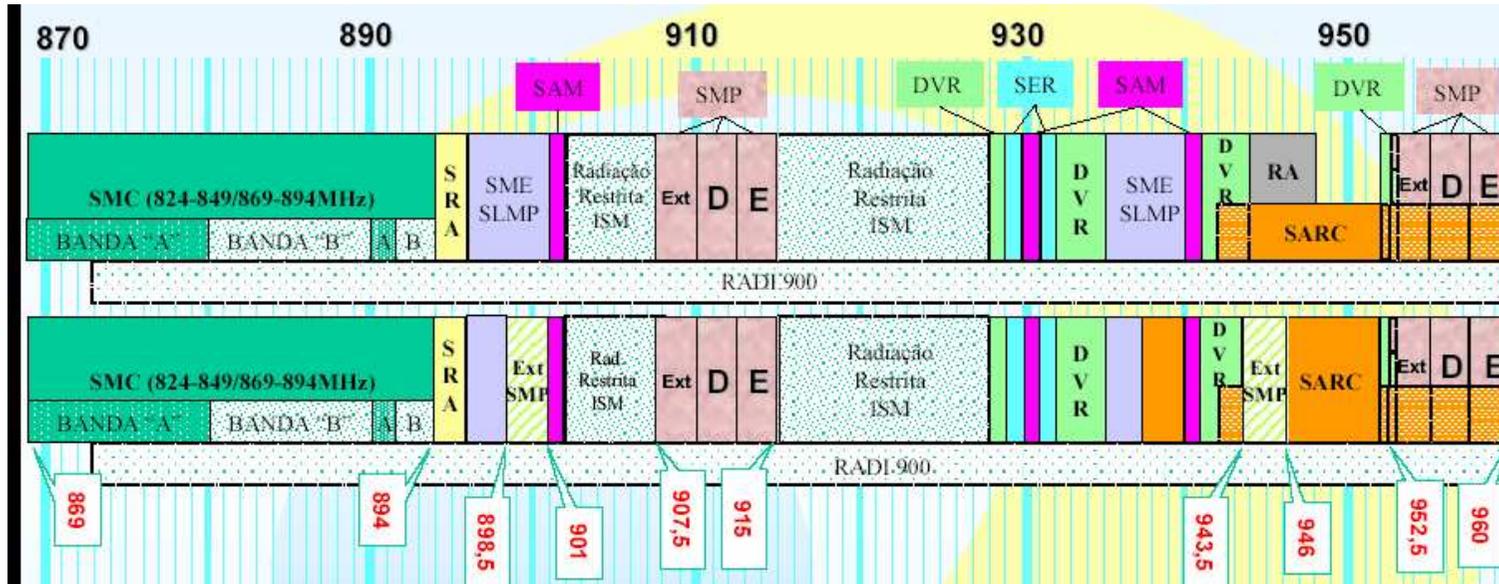


Figura 2.2 - Ocupação das faixas de 800 e 900 MHz.

Fonte: ANATEL

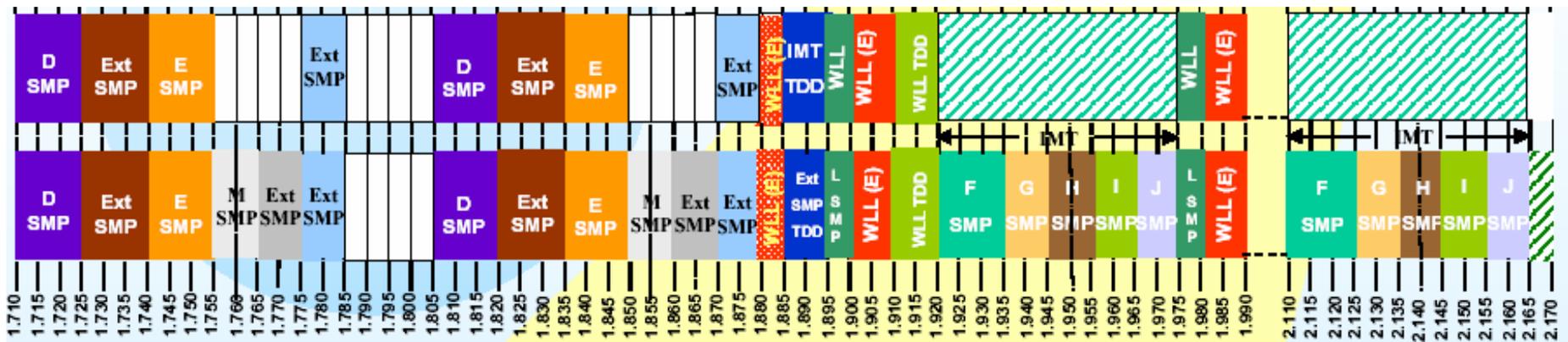


Figura 2.3 - Ocupação das Faixas de 1800, 1900 e 2100MHz.

Fonte: ANATEL

O Brasil terminou 2008 com 150,6 milhões de celulares e uma densidade de 79,2 cel/100 hab [ANATEL, 15]. Com este resultado, ocupa a 5ª posição entre os países com mais celulares no mundo. A figura 2.4 apresenta a evolução do quantitativo de terminais móveis no Brasil.

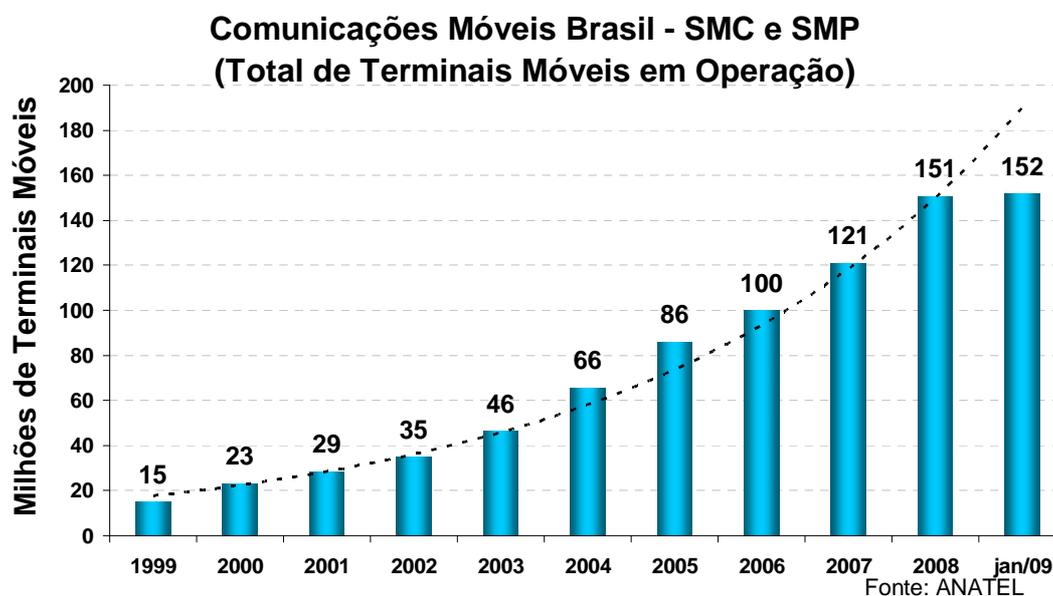


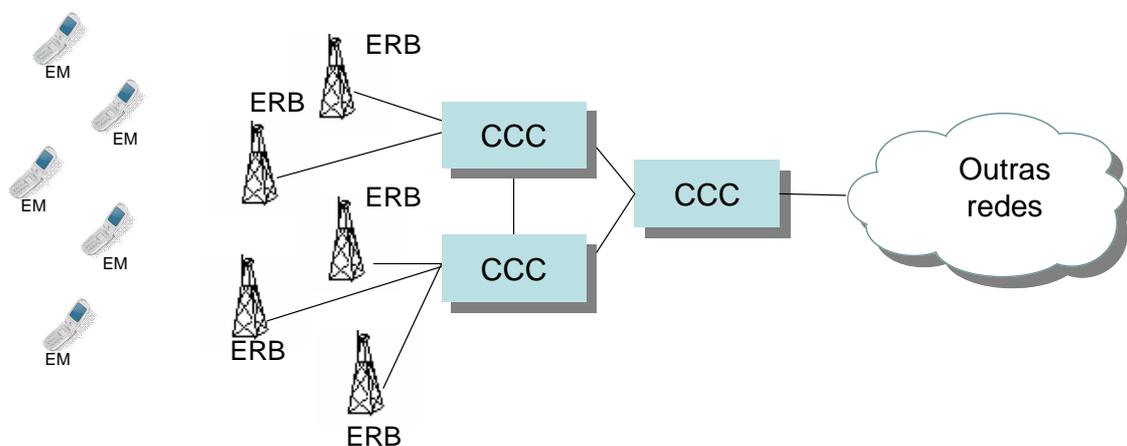
Figura 2.4 - Evolução do quantitativo de terminais móveis no Brasil.

O crescimento no número de celulares aponta para uma necessidade de melhoria contínua de capacidade e de cobertura, por parte das operadoras que fornecem este serviço. Tal melhoria pode ser obtida, de uma forma geral, com o aumento no número de equipamentos transmissores das estações ou com o aumento no próprio número de estações, o que leva a uma preocupação maior com os possíveis efeitos causados por radiações provenientes destas estações, instaladas cada vez mais próximas às residências, apesar de apresentarem potências cada vez menores.

### 2.3. Arquitetura dos sistemas celulares

Os sistemas celulares sofreram várias mudanças no decorrer dos últimos anos, sendo introduzidas várias tecnologias - AMPS, TDMA, CDMA, GSM e UMTS, cada qual com sua característica e forma de operar. Entretanto, é possível observar uma característica comum entre estes sistemas: a sua estrutura básica, que permeia todas as tecnologias e é mantida nas diversas gerações de sistemas celulares.

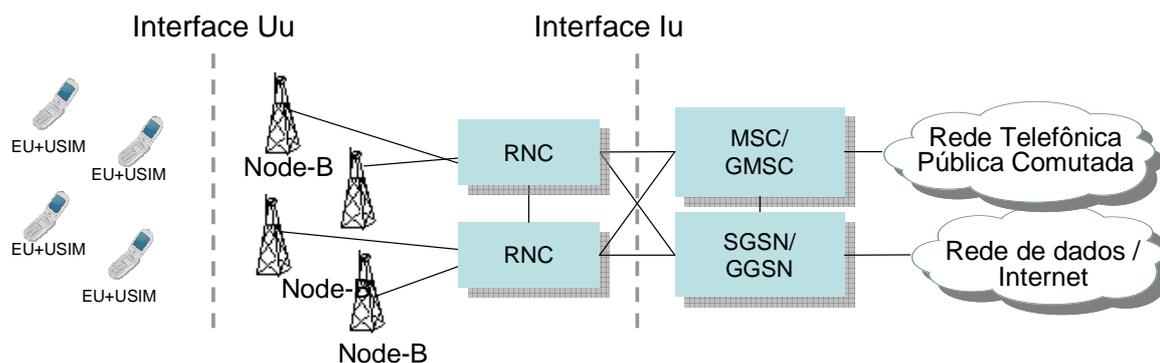
De uma forma mais geral, os sistemas celulares podem ser representados por uma Central de Comutação e Controle (CCC), por Estações Rádio Base (ERB) e pelas estações móveis (EM), conforme mostra a figura 2.5.



**Figura 2.5 - Estrutura básica dos sistemas celulares de primeira geração.**

A Estação Móvel (EM) ou *Mobile Station* (MS) é o terminal utilizado pelo assinante para o acesso ao ambiente celular. A Estação Rádio Base (ERB) é encarregada da comunicação com as estações móveis em uma determinada área, que constitui uma célula. A Central de Comutação e Controle (CCC) é a responsável pelas funções de comutação e sinalização para as estações móveis localizadas em uma determinada área geográfica. A CCC pode exercer a função de *Gateway* ao realizar a interconexão com outras redes, como por exemplo, com a rede de telefonia fixa ou com a rede móvel de outras operadoras.

A figura 2.6 representa uma arquitetura conceitual de um sistema de terceira geração (UMTS). É fácil perceber a permanência da estrutura básica, presente, anteriormente, nos sistemas de primeira e segunda geração.



**Figura 2.6 - Arquitetura UMTS conceitual.**

A tabela 2.1 ilustra os elementos de rede que possuem funções equivalentes:

**Tabela 2.1 - Equivalência entre sistemas de primeira e terceira geração.**

Primeira Geração (1G)	Terceira geração (3G)
MS	UE+USIM
ERB	Node-B
CCC	MSC+RNC

No UMTS, o RNC (*Radio Network Controller*) age como um gerente da rede de acesso. Conecta-se ao núcleo da rede por duas interfaces, uma com função de comutação de pacotes (Iu-PS) e outra com função de comutação por circuito (Iu-CS). O Nó B (Node-B) possui as mesmas funções de uma ERB dos sistemas de segunda geração (2G). O Equipamento do Usuário (UE), é composto por duas partes: o terminal e o cartão SIM, responsável, entre outras coisas, por armazenar as informações do assinante. A MSC/GMSC (Mobile Services Switching Center) é responsável, de uma forma geral, pelo encaminhamento e estabelecimento de conexões de canal de tráfego e pela administração de células e áreas locais. O SGSN/GGSN (*Serving GPRS Support Node*) possui funções comparáveis às da MSC, porém voltadas ao tráfego de pacotes.

## 2.4. Setorização e redução das células

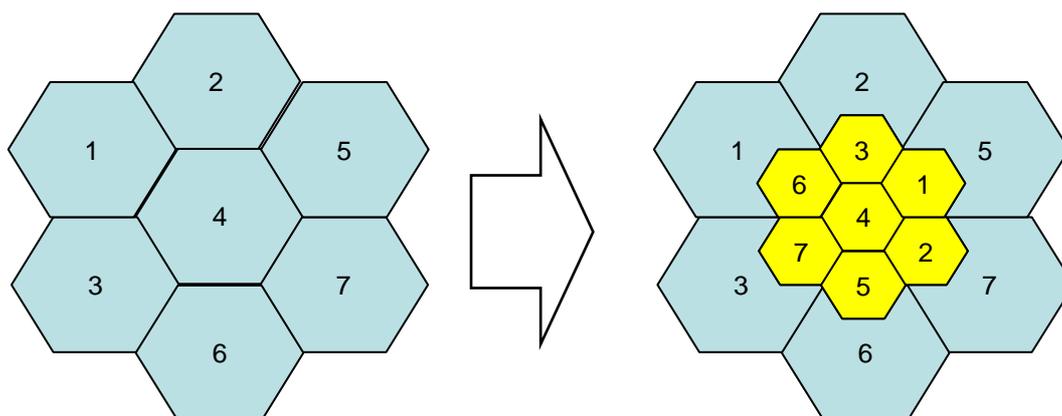
O termo Telefonia Celular é proveniente da arquitetura celular utilizada nestes sistemas. Uma célula é a menor área de serviço em uma rede, e é criada por uma Estação Rádio Base (ERB) que transmite numa área geográfica. Toda a área da Rede Pública de Comutação Móvel (PLMN) é coberta por um grande número de células.

A estrutura celular permite que uma operadora seja capaz de organizar uma rede em múltiplas camadas, utilizando o conceito de células reduzidas ou setorizadas. Em um

planejamento típico da rede, as operadoras optam pela utilização de células guarda-chuva ou macro-células. Estas células são caracterizadas por:

- Alta potência de transmissão;
- Grande área de cobertura;
- Antenas posicionadas em alturas elevadas;

Com o aumento no número de usuários, surge a necessidade de aumentar a capacidade da rede, o que implica na utilização de mais recursos. Entretanto, a quantidade de canais é limitada pela quantidade disponível no espectro de frequências. Como solução, é comum o reuso de frequências em células menores, como as micro e picocélulas. Através da criação de novas células, menores que as originais, nas células existentes, a capacidade aumenta devido ao acréscimo no número de canais por unidade de área (diminuição da distância de reuso). A figura 2.7 ilustra um exemplo de redução das células.



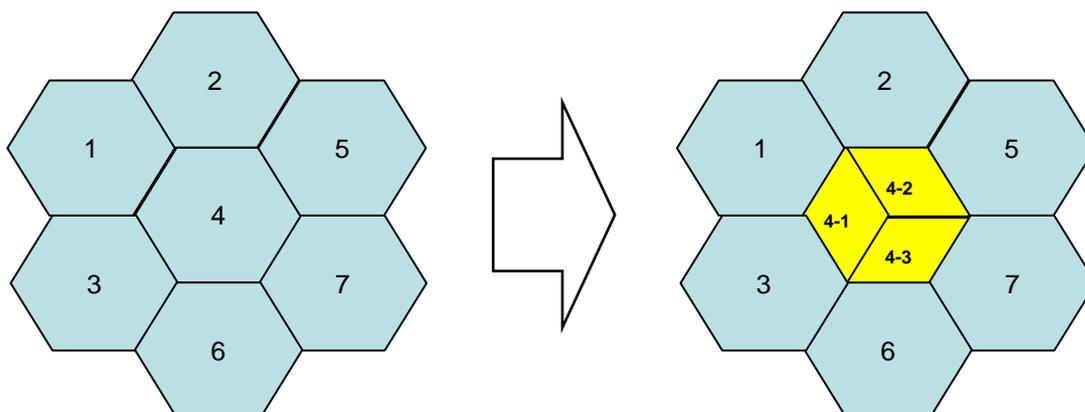
**Figura 2.7 - Redução das células para aumento de capacidade do sistema.**

Estas células reduzidas são caracterizadas por:

- Baixas potências de transmissão;
- Pequena área de cobertura (ex.: áreas de alto tráfego em centros de cidades, aeroportos, etc.);
- Antenas posicionadas em alturas mais baixas ou em áreas internas;

Outra forma de se conseguir a diminuição da distância de reuso e aumento de capacidade, mantendo o raio das células inalterado, é através da setorização. Esta técnica permite um aumento na capacidade do sistema, substituindo uma única antena

onidirecional, na Estação Rádio Base, por antenas direcionais. Usualmente, uma célula é particionada em três setores de 120°.



**Figura 2.8 - Setorização das células para aumento de capacidade do sistema.**

As antenas direcionais possuem características de radiação que levam a uma concentração de potência em uma determinada direção. Esta configuração é muito comum e adiciona certo grau de complexidade nos cálculos que definem distâncias consideradas seguras para a população em relação às Estações Rádio Base, que é objeto deste trabalho.

Como consequência da necessidade de redução do raio das células, as antenas passaram a ser instaladas cada vez mais próximas ao solo. Apesar da redução nos níveis de potência de transmissão, houve um aumento da preocupação, por parte da população, com os possíveis efeitos causados pela exposição dos seres humanos às radiações provenientes destas antenas, que se tornaram cada vez mais visíveis. Entretanto, observa-se, também, que o senso comum da população apresenta maior preocupação com as macrocélulas, em função do tamanho das torres, principalmente por desconhecimento sobre o assunto.

## **2.5. Considerações sobre as estações terminais portáteis**

Embora este não seja tema deste trabalho, é importante esclarecer algumas questões referentes aos terminais portáteis (celulares). Os níveis considerados seguros, levando-se em consideração os efeitos térmicos causados pela radiação não ionizante (RNI) proveniente de terminais portáteis, podem ser expressos em termos da Taxa de Absorção específica – SAR. Vários estudos foram realizados por governos e

organizações científicas, buscando mensurar os efeitos e os níveis de exposição seguros. A SAR é a unidade de medida para a quantidade de energia de radiofrequência (RF) absorvida pelo corpo. O aquecimento do tecido é um efeito resultante da exposição aos campos eletromagnéticos, devido à absorção da potência da RF dos campos induzidos dentro do corpo.

A SAR é expressa em W/kg, e é relacionada, de forma simples, ao campo elétrico interno de RF em algum ponto por:

$$SAR = \frac{\sigma |E_{\text{int}}|^2}{\rho} \quad (2.1)$$

onde:

$E_{\text{int}}$  - é a magnitude do campo elétrico interno ( $V/m$ ),

$\sigma$  - é a condutividade elétrica do tecido ( $S/m$ ) e

$\rho$  - é a densidade de massa do tecido ( $Kg/m^3$ ).

Os níveis de referência para a SAR estabelecidos no *ICNIRP Guidelines* (1998), e o padrão do IEEE C95.1 (2006), são avaliados calculando a média sobre uma massa de 10 g, geralmente na forma de um cubo, em função das propriedades de difusão térmica dos tecidos. Níveis de referência superiores aplicam-se às diferentes partes do corpo, como está indicado na tabela 2.2:

**Tabela 2.2 - Níveis de referência de acordo com ICNIRP e IEEE C95.1.**

ICNIRP <i>Guidelines</i> (1998)		IEEE C95.1 <i>standard</i> (2006)	
Cabeça e tronco	10 W/kg	Cabeça (exceto orelhas), tronco, braços, cotovelos, coxas e joelhos	10 W/kg
Braços e Pernas	20 W/kg	Orelhas e membros distantes do cotovelo	20 W/kg

Os dispositivos portáteis são desenvolvidos para operar dentro destes limiares definidos na tabela 2.2.

A SAR de cada dispositivo é determinada em laboratório, considerando-se o máximo valor de potência emitida verificado. Entretanto, o nível de SAR durante uma operação normal do terminal móvel pode ser muitas vezes inferior ao verificado em laboratório, devido a vários fatores, entre os quais se pode citar:

- Frequência de operação – O valor da SAR varia conforme a frequência de operação utilizada pela estação móvel em um determinado momento. Observa-se, de um modo geral, que os maiores valores são encontrados para as frequências mais baixas.
- Controle de potência – O terminal pode possuir vários níveis de potência pré-definidos, para que a ERB possa comandar a alternância entre eles. O número de níveis, bem como os valores padronizados, varia de acordo com a tecnologia empregada. Assim, quanto mais próximo da ERB, menor o nível de potência de transmissão necessário. Este ajuste é feito dinamicamente, conforme a estação móvel se move dentro da célula. O controle de potência tem como principais objetivos diminuir a interferência em outras estações móveis operando na mesma célula ou em células adjacentes e aumentar a autonomia e a vida útil das baterias das estações móveis. Os níveis de controle de potência, de acordo com o 3GPP<sup>3</sup> (TS 05.05.), são apresentados na tabela 2.3:

---

<sup>3</sup> 3GPP - *3rd Generation Partnership Project* – Entidade responsável pelo desenvolvimento e manutenção de especificações técnicas e padrões para sistemas móveis de segunda e terceira gerações.

Tabela 2.3 - Níveis de controle de potência de acordo com o 3GPP TS 05.05.

GSM 400, GSM 900 e GSM 850				DCS 1 800			
Nível de Controle de Potência	Saída Nominal potência (dBm)	Tolerancia (dB) para condições		Nível de Controle de Potência	Saída Nominal potência (dBm)	Tolerancia (dB) para condições	
		normal	extrema			normal	extrema
0-2	39	±2	±2,5	29	36	±2	±2,5
3	37	±3	±4	30	34	±3	±4
4	35	±3	±4	31	32	±3	±4
5	33	±3	±4	0	30	±3	±4
6	31	±3	±4	1	28	±3	±4
7	29	±3	±4	2	26	±3	±4
8	27	±3	±4	3	24	±3	±4
9	25	±3	±4	4	22	±3	±4
10	23	±3	±4	5	20	±3	±4
11	21	±3	±4	6	18	±3	±4
12	19	±3	±4	7	16	±3	±4
13	17	±3	±4	8	14	±3	±4
14	15	±3	±4	9	12	±4	±5
15	13	±3	±4	10	10	±4	±5
16	11	±5	±6	11	8	±4	±5
17	9	±5	±6	12	6	±4	±5
18	7	±5	±6	13	4	±4	±5
19-31	5	±5	±6	14	2	±5	±6
				15-28	0	±5	±6

- Controle de atividade da voz – Alguns níveis são designados para transmissão descontínua (DTX). Durante a conversação, é possível para estes terminais a alternância entre dois níveis, correspondendo aos estados ativo e inativo, sob controle do detector de atividade de voz. No estado ativo, quando o terminal detecta o início da fala, ele transmite o nível de potência comandado pela ERB. No estado inativo, o terminal transmite um nível reduzido para conservar a energia da bateria. Os menores níveis podem também ser designados para canais digitais de tráfego e de controle.
- Multiplexação por Divisão de Tempo – No TDMA, um transmissor que utiliza canal físico na taxa máxima está ativo apenas 1/3 do tempo. Desta forma, a potência média transmitida é  $10\log(3) = 4,8$  dB menor que o nível de potência irradiada especificada no referido padrão. Isto significa um aumento da vida útil da bateria de um terminal operando em um canal de tráfego digital, em relação a um analógico, para a mesma potência irradiada. No GSM, por exemplo, são especificadas cinco classes de Estações Móveis, diferenciadas por uma potência máxima de

transmissão, que varia de 20 W (43 dBm) a 0,8 W (29 dBm). Quando um terminal transmite na taxa máxima do canal, o transmissor fica ativo apenas durante um oitavo do tempo do quadro. Isto significa que a potência média irradiada é menor que a máxima por um fator de 8 (9 dB).

Em estudo realizado em 2007, o Comitê Científico para Riscos à Saúde Recentemente Identificados e Emergentes (*Scientific Committee on Emerging and Newly Identified Health Risks, ou SCENIHR*), da União Européia, apresentou uma opinião científica sobre os níveis de segurança relativos aos campos de radiofrequência associados às comunicações móveis<sup>4</sup>. O SCENIHR avaliou, principalmente, se a exposição aos campos eletromagnéticos (CEM) causa doenças ou qualquer outro efeito adverso à saúde, no longo prazo.

O SCENIHR informa que *“O balanço de evidências epidemiológicas indica que o uso de telefones celulares por menos de 10 anos não aumenta o risco de tumor cerebral ou neuroma acústico. Em relação ao uso em longo prazo, os dados são escassos e as respectivas conclusões são, portanto, incertas. Entretanto, considerando os dados disponíveis, parece que não há um aumento no risco de tumores cerebrais nos usuários, em longo prazo, com exceção do caso do neuroma no acústico, para o qual existe alguma evidência de associação.”* O comitê também afirma que: *“Estudos com animais não forneceram evidência de que os campos de RF possam causar câncer, aumentar os efeitos cancerígenos conhecidos, ou acelerar o desenvolvimento de tumores transplantados”*.

*Em relação ao uso de telefones celulares por crianças, o SCENIHR informa que “não existe qualquer evidência específica” que indique qualquer dano a crianças que utilizam telefones celulares, embora “crianças ou adolescentes podem ser mais sensíveis à exposição a campos de RF do que adultos”*.

Entretanto, O SCENIHR recomenda a realização de mais pesquisas em todas as faixas de frequências, considerando o rápido ritmo do desenvolvimento tecnológico na

---

<sup>4</sup> [http://ec.europa.eu/health/ph\\_risk/committees/04\\_scenihr/docs/scenihr\\_o\\_007.pdf](http://ec.europa.eu/health/ph_risk/committees/04_scenihr/docs/scenihr_o_007.pdf), acesso em 02/04/2009.

área de comunicações móveis. De uma maneira geral, o comitê menciona que a dosimetria (medida ou determinação, por cálculo, da distribuição interna da intensidade de campo elétrico, da densidade de corrente induzida, da absorção específica, ou da taxa de absorção específica, em seres humanos, ou em animais expostos a campos eletromagnéticos) de alta qualidade é fundamental para estudos futuros.

Uma maneira de se verificar a SAR para os modelos de telefones celulares homologados no Brasil, é através do certificado de homologação individual de cada modelo, disponível na ANATEL<sup>5</sup>, onde é possível, também, obter informações acerca dos certificados de conformidade técnica, bem como dos organismos certificadores.

---

<sup>5</sup> Dados disponíveis em [www.anatel.gov.br](http://www.anatel.gov.br), no sistema SGCH - Sistema de Gestão de Certificação e Homologação.

### **3. Radiação Não Ionizante no Cenário Mundial**

A demanda por informações científicas sobre as radiações não ionizantes provenientes de estações transmissoras do serviço celular forçou governos, organizações e entidades não governamentais a se aprofundarem no assunto. Hoje, existem centenas de estudos, normas e recomendações decorrentes deste esforço. Alguns deles serão citados a seguir.

#### **3.1. Entidades Envolvidas nos estudos relativos às RNI**

Em resposta à crescente preocupação da população, surgiram vários organismos responsáveis por mensurar e estudar os efeitos biológicos causados pelas radiações não ionizantes, e as principais são:

##### **3.1.1. IEEE - *Institute of Electrical and Electronics Engineers***

O Instituto dos Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE) é um dos pioneiros na especificação de normas e recomendações para atendimento a níveis de referência internacionalmente aceitos. Através dos seus membros, o instituto é uma das maiores autoridades em áreas que vão desde a aeroespacial, informática e telecomunicações até a biomedicina. É uma organização sem fins lucrativos que patrocina ou co-patrocina mais de 300 conferências técnicas a cada ano.

Dentre as várias publicações da entidade sobre o assunto, destaca-se o documento IEEE C95.1 (TM) -1991, "*Níveis seguros com respeito à exposição humana a campos eletromagnéticos de Radio Frequência de 3 kHz a 300 GHz*". Este documento é uma revisão da recomendação ANSI C95.1-1982 e é a base para grande parte das recomendações, hoje existentes.

O IEEE emite, também, relatórios, publicações e apresenta atividades técnicas voltadas para os efeitos biológicos causados pela Radiação Não Ionizante, por meio de sua comissão do Homem e Radiação (*Committee on Man and Radiation – COMAR*), que é um Comitê Técnico da Sociedade de Engenharia em Medicina e Biologia (EMBS) do IEEE.

### 3.1.2. ICNIRP - *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*

Em 1974, a Associação Internacional de Proteção contra Radiações (IRPA) organizou um grupo de trabalho sobre os efeitos biológicos causados pelos vários tipos de RNI. Em 1977, este grupo de trabalho tornou-se a Comissão Internacional de Radiações Não Ionizantes (*International Non-Ionizing Radiation Committee*) - INIRC.

Em colaboração com a Divisão de Saúde Ambiental da Organização Mundial de Saúde (OMS), a IRPA/INIRC elaborou vários documentos contendo critérios de proteção à saúde, como parte do Programa de Critérios de Saúde Ambiental da OMS, patrocinado pelo Programa Ambiental das Nações Unidas (*United Nations Environmental Programme – UNEP*). Cada documento inclui uma visão geral das características físicas, técnicas de medição e instrumentação, fontes e aplicações de RNI, uma análise completa da literatura sobre efeitos biológicos, e uma avaliação dos riscos à saúde devidos à exposição à RNI. Estes critérios, de proteção à saúde, proporcionaram uma base de dados científica para posterior desenvolvimento dos limites de exposição e dos procedimentos relacionados à RNI.

Durante o Oitavo Congresso Internacional da IRPA, em 1992, foi criada uma nova organização científica internacional independente — a Comissão Internacional de Proteção contra as Radiações Não Ionizantes (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection – ICNIRP*), que sucedeu à IRPA/INIRC. As funções da Comissão são: investigar os perigos que podem ser associados com as diferentes formas de RNI, desenvolver diretrizes internacionais sobre limites de exposição à RNI e tratar de todos os aspectos para proteção contra a RNI. Dentre suas principais publicações estão:

- *Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). Health Physics* 74 (4): 494-522; 1998.
- *Review of the Epidemiologic Literature on RF and Health. Environmental Perspectives* 112 (17): 1741-1754; Dez. 2004.

### 3.1.3. WHO (OMS) – *World Health Organization*

Para proteger a saúde pública, a organização mundial da saúde (WHO) estabeleceu o Projeto internacional de CEM (EMF Project) em 1996, para avaliar as evidências científicas de possíveis efeitos à saúde provocados por campos eletromagnéticos na faixa de frequências de 0 a 300 GHz. Entre as principais funções do projeto EMF, estão: desenvolver uma base sólida de evidências científicas; oferecer acesso a uma vasta quantidade de informações não-tendenciosas sobre o conhecimento científico atual; fornecer uma base de dados para pesquisadores com interesse em CEM; oferecer modelos de legislação para proteção contra a exposição a CEM e encorajar a harmonização entre padrões.

Além do Projeto EMF, a OMS possui uma base de dados denominada “Base de Dados Mundial de Padrões de CEM”, onde podem ser acessados os níveis de referência de exposição estipulados por cada país.

Com relação à harmonização entre padrões, de acordo com a OMS existem diferenças nas diretrizes de exposição e nos modelos em vigor em vários países. Em alguns casos, estas diferenças são grandes. Parte das disparidades em modelos de CEM tem surgido em função do uso de apenas bases de dados nacionais, diferentes critérios para aceitar ou avaliar estudos individuais, variadas interpretações dos dados científicos ou diferentes filosofias para desenvolvimento de modelos para a saúde pública. Tais diferenças podem ser causadas, em parte, por deficiências na comunicação entre cientistas de diferentes regiões, cada qual com suas diferenças sociais e culturais. Grandes disparidades entre níveis de referência nacionais e as diretrizes internacionais podem criar confusão entre reguladores e políticos, aumentar a ansiedade pública e gerar um desafio para fabricantes e operadores de sistemas de comunicações, os quais necessitam adaptar seus produtos a cada mercado. Estes fatores têm motivado a Organização Mundial de Saúde a construir um modelo para controle de exposição a CEM, baseados em um processo racional cientificamente conduzido.

Entre suas principais publicações relevantes para este trabalho, está o documento *Fact Sheets & Information Sheets: Estações Rádio Base e redes sem fio – Fact Sheet nº 304* – publicado em Maio de 2006, onde a OMS conclui: “*Considerando os níveis muito baixos de exposição e os resultados de pesquisas reunidos até o momento, não*

*existe evidência científica convincente de que os fracos sinais de RF, provenientes de Estações Rádio Base e de redes sem fio, causem efeitos adversos à saúde.”*

### **3.1.4. ANATEL – Agência Nacional de Telecomunicações**

A ANATEL é uma autarquia especial criada pela Lei Geral de Telecomunicações (Lei 9.472, de 16 de julho de 1997). É uma agência administrativamente independente, financeiramente autônoma, não se subordina hierarquicamente a nenhum órgão de governo (suas decisões só podem ser contestadas judicialmente). Do Ministério das Comunicações, a ANATEL herdou os poderes de outorga, regulamentação e fiscalização e um grande acervo técnico e patrimonial [ANATEL, 16].

Compete à Agência adotar as medidas necessárias para o atendimento do interesse público e para o desenvolvimento das telecomunicações brasileiras, atuando com independência, imparcialidade, legalidade, impessoalidade e publicidade.

Os níveis de referência para exposição às ondas de rádio, emitidas pelas antenas das estações transmissoras de serviços, estão estabelecidos pela ANATEL, no Regulamento sobre Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz, aprovado pela Resolução 303/2002 [17]. O documento define limites para exposição humana às ondas eletromagnéticas.

O cumprimento da regulamentação é monitorado por meio das ações de fiscalização que a ANATEL realiza regularmente. Estas ações são previstas em um plano anual de fiscalização da Agência e visam aferir os níveis dos campos em estações transmissoras de radiocomunicação. As avaliações feitas em estações transmissoras de telecomunicações, em diversas localidades brasileiras, têm demonstrado que seus campos eletromagnéticos estão abaixo dos valores limites adotados. A ANATEL, ao estabelecer limites de exposição a campos eletromagnéticos de radiofrequências e fiscalizar seu atendimento, busca garantir que, em locais passíveis de ocupação humana, não sejam excedidos os limites de exposição.

## 3.2. Controle adotado por alguns países

Conforme já foi apresentado, como parte de sua iniciativa para proteger a saúde pública, a Organização Mundial da Saúde estabeleceu o projeto internacional EMF, em 1996, para avaliar as evidências científicas de possíveis efeitos à saúde, causados por Campos Eletromagnéticos (CEM) na faixa de frequências de 0 a 300 GHz.

Os níveis determinados para proteção contra RNI, geralmente, seguem a recomendação da ICNIRP. Entretanto, são observadas algumas diferenças entre os níveis propostos por alguns países, dentre os quais destacam-se:

### 3.2.1. Austrália

A Austrália possui três organismos principais que controlam os níveis de irradiação de OEM: o *National Health and Medical Research Council (NHMRC)*, cujas atividades tiveram início em 1989; a *Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency (ARPANSA)*, com início das suas atividades em 1999 e a *Australian Communications Authority (ACA)* – 2003, que se juntou, em 2005, à *Australian Broadcasting Authority* para formar a *Australian Communications and Media Authority (ACMA)*. Os níveis de referência para exposição recomendados pela ARPANSA foram estabelecidos, através do documento *Radiation Protection Standard - Maximum exposure levels to radiofrequency fields – 3 kHz to 300 GHz*, que dispõe sobre os níveis aceitáveis e avaliações teóricas, baseando-se nas recomendações de 1998 do ICNIRP, com algumas alterações, dentre elas a adição de níveis de referência para exposição pulsada ou modulada por amplitude. As recomendações do NHMRC dispõem sobre a faixa de ELF – 50/60 Hz e não possuem caráter de obrigatoriedade, ao passo que a ACMA exige compatibilidade com normas de exposição humana obrigatórias por parte dos fabricantes e importadores de determinados dispositivos. A metodologia de verificação é reforçada por um sistema responsável por auditorias aleatórias de registros de conformidade, além de investigações de queixas. Para a ARPANSA, a compatibilidade eletromagnética é alcançada através de relatórios dos detentores de licença, baseado no documento *Licence Conditions Handbook - General Handbook* [OMS, 18].

Foi criado, ainda, em conjunto com representantes das três entidades – ARPANSA, ACMA e NHMRC, o comitê de assuntos relativos à energia eletromagnética e saúde pública, resultando na elaboração de uma série de documentos direcionados ao público, com a finalidade de esclarecer os principais questionamentos envolvendo principalmente telefonia móvel e saúde.

### **3.2.2. Estados Unidos**

A *U.S. Federal Communications Commission – FCC*, através do Ato de 1969, ficou responsável por avaliar os efeitos de emissões de transmissores e o impacto na qualidade do ambiente humano. Diversas organizações não-governamentais, tais como o *American National Standards Institute (ANSI)*, o *Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. (IEEE)*, e o Conselho Nacional de Proteção contra Radiação e Medições (NCRP) emitiram recomendações para a exposição humana aos campos eletromagnéticos de RF.

Em agosto de 1996, a FCC adotou os níveis de referência para potência e densidade do campo recomendados pelo NCRP para os transmissores que operam em frequências de 300 kHz a 100 GHz. Para a taxa de absorção (SAR), a FCC adotou os níveis de referência específicos para os dispositivos que operam nas proximidades do corpo, conforme especificado pelo relatório ANSI/IEEE C95.1-1992. Os níveis de referência de SAR para dispositivos portáteis e móveis foram aprovados em agosto de 1996. Os níveis de referência da FCC, para o campo elétrico e densidade de potência, foram aprovados em outubro de 1997, para todos os serviços, exceto o serviço de rádio amador. A FCC publicou, através de seu documento *OET - Office of Engineering and Technology Bulletin No. 65 - Evaluating Compliance With FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields (1997)* suas diretrizes para exposição a CEM, baseado nas recomendações do *American National Standards Institute (ANSI)* e do *Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., (IEEE)*, *Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz*, ANSI/IEEE C95. Assim, ficou definido que não seria necessária análise ambiental para os casos onde os níveis de referência propostos por esta recomendação fossem atendidos. Os perigos potenciais associados aos campos eletromagnéticos de RF são discutidos no boletim nº 56 do OET do FCC, "Perguntas e

respostas sobre os efeitos biológicos e os perigos potenciais de campos eletromagnéticos de radiofrequência" [OMS, 18].

### **3.2.3. Canadá**

O Canadá delimitou a exposição a CEM através de sua diretriz denominada “Código de segurança nº 6 - Limites de exposição humana aos campos eletromagnéticos de radiofrequência na faixa de frequências de 3 kHz a 300 GHz”, de cobertura nacional e caráter obrigatório, emitida em 1999. O controle se dá por meio de regulamentos/normas federais e provinciais, às quais o código 6 de segurança se refere. O código impõe limites de corrente, taxa de absorção específica (SAR), valores RMS do campo elétrico e magnético e densidade de potência. O organismo controlador é o *Health Canada*, departamento federal responsável por ajudar os canadenses a manter e melhorar sua saúde. Os métodos de medição são descritos nos documentos RSS-102 - Compatibilidade de exposição a radiofrequências por aparelhos de radiocomunicação (todas as faixas de frequência) e GL-01 - Diretrizes para medição de campos de radiofrequência para frequências de 3 kHz a 300 GHz [OMS, 18].

### **3.2.4. China**

A China possui normas e regulamentos próprios, de caráter obrigatório, publicadas pelo seu Ministério da Saúde para proteção contra radiações eletromagnéticas e pela Administração de Proteção Ambiental do Estado, tendo sido publicadas no final da década de 80. Estas normas e regulamentos dispõem sobre níveis de referência de exposição e restrições básicas, e são verificadas pelo CDC - Centro Chinês para o Controle e a Prevenção de Doenças e pela EPA - Administração de Proteção Ambiental de Estado da China. As restrições baseiam-se na taxa de absorção específica SAR, valores RMS do campo elétrico e magnético e densidade de potência [OMS, 18].

### **3.2.5. Itália**

A Itália publicou, através do decreto “Estabelecimento de níveis de referência de exposição, valores de atenção e objetivos de qualidade para proteger a população contra CE, CM e CEM gerados por frequências entre 100 kHz e 300 GHz”, em 2003, uma

legislação independente dos níveis de referência definidos pela ICNIRP, definindo limites de exposição que não podem ser ultrapassados. Entretanto, são definidos, também, níveis de atenção, buscando uma forma a mais de proteção para a população em longo prazo e adotados em áreas consideradas de maior sensibilidade. Estão incluídos *playgrounds* de crianças, moradias residenciais, áreas próximas a escolas, áreas onde a população permanece por 4 horas ou mais por dia, bem como anexos ao ar livre que podem ser usados como ambientes residenciais, tais como balcões, terraços e pátios, mas excluindo pavimentos de telhado. São definidos, também, objetivos de qualidade, a fim de reduzir progressivamente os níveis de emissão das Estações Rádio Base. Não há restrições definidas quanto aos níveis de SAR [OMS, 18].

A Itália é considerada um caso extremo da regulamentação de RNI, visto que utiliza limitação muitas vezes menor que os sugeridos pela ICNIRP. O governo utilizou os seguintes argumentos para a não adoção dos níveis propostos pelo ICNIRP [Giuliani, 19]:

- Adoção do princípio da precaução.
- Recusa da articulação entre os limites básicos e os níveis de referência.

### **3.2.6. Rússia**

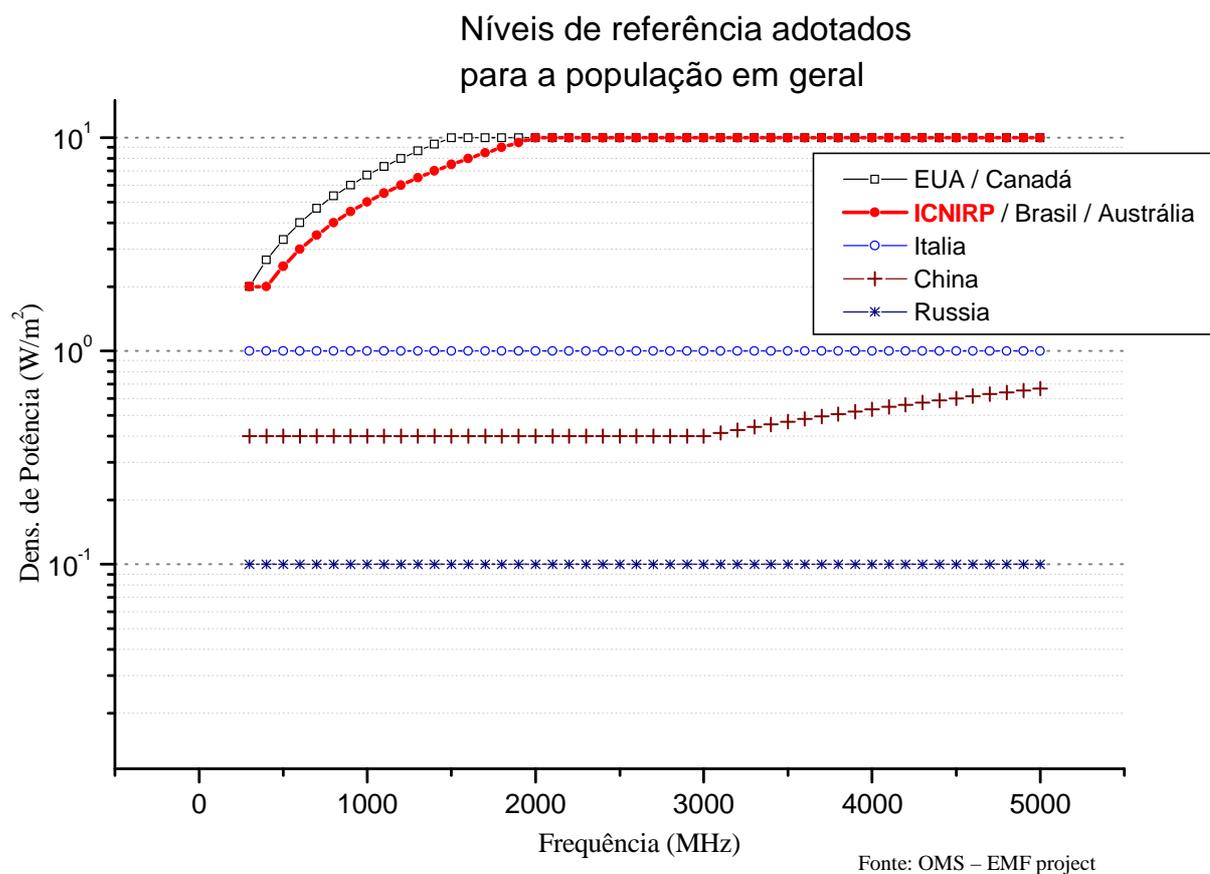
Os estudos sobre os efeitos à saúde causados por CEMRF foram iniciados na Rússia a partir de 1948. Atualmente, a estimativa dos critérios eletromagnéticos de segurança para a população e desenvolvimento de normas, é resultado do trabalho do fórum científico *Russian National Committee On Non-Ionizing Radiation Protection* (RNCNIRP). O RNCNIRP foi criado em 1997, na Academia Russa de Ciências Médicas, no âmbito da Comissão Científica Russa sobre Proteção Contra Radiações (*Russian Scientific Commission on Radiation Protection – RSCR*), que atua como presidência da RNCNIRP [Grigoriev, 20].

A Rússia considera que efeitos sobre a saúde, por exposição prolongada durante muitos anos são acumulativos, sendo, desta forma, possível que haja efeitos tardios, incluindo processos de degeneração do sistema nervoso central, leucemias, tumores cerebrais, doenças cardiovasculares e hormonais. Considera, ainda, que a exposição a CEMRF torna-se especialmente perigosa em crianças, mulheres grávidas, pacientes com

doenças dos sistemas nervoso central, hormonal e cardiovascular, alergias, e pessoas de imunidade enfraquecida. Por esta razão, suas normas e padrões possuem caráter obrigatório e são considerados os mais restritivos mundialmente [Grigoriev, 20].

### 3.2.7. Comparação entre os níveis de referência adotados

Uma comparação em escala logarítmica entre os níveis de referência adotados para a população em geral pelos países acima citados é ilustrada na figura 3.1.



**Figura 3.1 - Níveis de referência adotados mundialmente.**

Na figura 3.1, é possível observar a diferença acentuada entre os níveis de referência adotados pela Rússia (mais restritivo) e o Canadá (menos restritivo).

## **4. Aspectos Regulatórios no Brasil**

No Brasil, a ANATEL, no papel de reguladora do espectro de radiofrequências, é responsável pela determinação dos níveis de referência de radiação que as estações de radiocomunicação podem emitir. Para tanto, vem sistematicamente adotando as recomendações [21] da Comissão Internacional em Proteção contra Radiação Não Ionizante (ICNIRP), ratificadas pela Organização Mundial de Saúde (OMS) e sancionadas pela Presidência da República através da Lei nº11.934, de 05 de maio de 2009.

Até o fim da década de 1990, não havia um instrumento normativo que estabelecesse as limitações da exposição à radiação eletromagnética não ionizante. Apenas algumas normas do Ministério do Trabalho se dedicavam a estabelecer padrões de segurança para pessoas expostas à radiação em virtude de seu trabalho.

O Conselho Diretor da ANATEL, em 1999, decidiu adotar como referência provisória para avaliação da exposição humana a campos eletromagnéticos de radiofrequência provenientes de estações transmissoras de serviços de telecomunicações, os níveis de referência propostos pela ICNIRP. Em 2002, a ANATEL aprovou a Resolução nº 303 [17], que dispõe sobre a limitação da exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na faixa de radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz. Esta Resolução dispõe, inclusive, sobre a avaliação da radiação emitida em locais multiusuários, que é de interesse específico deste trabalho.

### **4.1. A Resolução 303/02 da ANATEL**

O objetivo da Resolução 303 da ANATEL [17], de 2 de Julho de 2007 é estabelecer níveis de referência para a exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos, na faixa de radiofrequências (CEMRF) entre 9 kHz e 300 GHz, associados à operação de estações transmissoras de radiocomunicação de serviços de telecomunicações. Além disso, a Resolução 303 define métodos de avaliação e procedimentos a serem observados durante o licenciamento de estações de radiocomunicação, no que diz respeito a aspectos relacionados à exposição a CEMRF.

A Resolução 303 apresenta alguns conceitos e definições, dentre os quais é importante ressaltar:

- **Exposição ocupacional ou exposição controlada:** Situação em que pessoas são expostas a CEMRF em consequência de seu trabalho, desde que estejam cientes do potencial de exposição e possam exercer controle sobre sua permanência no local ou tomar medidas preventivas.
- **Exposição pela população em geral ou exposição não controlada:** Situação em que a população em geral possa ser exposta a CEMRF ou situação em que pessoas possam ser expostas em consequência de seu trabalho, porém sem estarem cientes da exposição ou sem possibilidade de adotar medidas preventivas.
- **Restrições básicas:** Restrições na exposição a campos CEMRF variáveis no tempo, baseadas diretamente em efeitos conhecidos na saúde. Dependendo da frequência, as grandezas físicas usadas para especificar estas restrições são: densidade de corrente ( $J$ ), taxa de absorção específica (SAR) e densidade de potência ( $S$ ). Somente a densidade de potência no ar, fora do corpo, pode ser facilmente medida.
- **Níveis de referência:** Estes níveis são estabelecidos com a finalidade prática de avaliar se a exposição tem a possibilidade de superar as restrições básicas. Alguns níveis de referência são derivados das restrições básicas pertinentes, usando medições e/ou técnicas computacionais e alguns outros tratam da percepção e dos efeitos nocivos indiretos da exposição a CEMRF. As grandezas físicas derivadas são: campo elétrico ( $E$ ), campo magnético ( $H$ ), densidade de fluxo magnético ( $B$ ), densidade de potência ( $S$ ) e correntes percorrendo os membros ( $I_L$ ). Grandezas físicas que tratam da percepção e de outros efeitos indiretos são: corrente de contato ( $I_C$ ) e, para campos pulsados, absorção específica ( $SA$ ).

Em qualquer situação particular de exposição, valores calculados ou medidos, de quaisquer destas grandezas, podem ser comparados com o nível referencial apropriado. **O atendimento ao nível de referência assegura o atendimento à restrição básica pertinente.** Quando o valor calculado ou medido excede o valor de referência, não significa, necessariamente, que a restrição básica é excedida. Entretanto, sempre que o nível de referência for excedido, deve-se avaliar se as restrições básicas pertinentes são atendidas e determinar se são necessárias medidas adicionais de proteção.

Os níveis de referência para exposição ocupacional e para a população em geral foram definidos separadamente, seguindo as recomendações da ICNIRP, as quais foram desenvolvidas após uma análise abrangente de toda a literatura científica publicada. Os critérios aplicados durante a revisão foram desenvolvidos para avaliar a credibilidade dos vários resultados relatados (Repacholi e Stolwijk, 1991; Repacholi e Cardis, 1997) e somente efeitos estabelecidos foram usados como base para as limitações de exposição propostas.

Na tabela 4.1 são apresentadas as restrições básicas para densidades de corrente, SAR média de corpo inteiro e SAR localizada, para frequências entre 9 Hz e 10 GHz.

**Tabela 4.1 - Restrições Básicas para exposição a CEMRF, na faixa de radiofrequências entre 9 kHz e 10 GHz.**

Características de exposição	Faixa de Radiofrequências	Densidade de corrente para cabeça e tronco (mA / m <sup>2</sup> ) (RMS)	SAR média do corpo inteiro (W / kg)	SAR localizada (cabeça e tronco) (W / kg)	SAR localizada (membros) (W / kg)
Exposição Ocupacional	9 kHz a 100 kHz	f / 100	—	—	—
	100 kHz a 10 MHz	f / 100	0,4	10	20
	10 MHz a 10 GHz	—	0,4	10	20
Exposição da população em geral	9 kHz a 100 kHz	f / 500	—	—	—
	100 kHz a 10 MHz	f / 500	0,08	2	4
	10 MHz a 10 GHz	—	0,08	2	4

f é o valor da frequência, em Hz.

As restrições básicas para a densidade de potência, na faixa de frequências de 10 a 300 GHz, são apresentadas na tabela 4.2:

**Tabela 4.2 - Restrições Básicas para densidade de potência, para radiofrequências entre 10 GHz e 300 GHz.**

Características da exposição	Densidade de potência (W/m <sup>2</sup> )
Exposição ocupacional	50
Público em geral	10

A partir das Restrições Básicas, foram estabelecidos, por modelamento matemático e por extrapolação de resultados de investigações de laboratório em frequências específicas, os níveis de referência para exposição em termos de campo elétrico, campo magnético e densidade de potência da onda plana equivalente, grandezas que podem ser mais facilmente medidas ou calculadas que as Restrições

Básicas. Os níveis são dados para a condição de acoplamento máximo do campo com o indivíduo exposto, fornecendo, desta forma, o máximo de proteção.

Assim, para a exposição ocupacional, foram determinados os níveis de referência apresentados nas tabelas 4.3 e 4.4, onde  $f$  é o valor da frequência, cuja unidade deve ser a mesma indicada na coluna da faixa de frequências.

**Tabela 4.3 - Níveis de referência para a exposição ocupacional.**

Faixa de frequências	Intensidade de campo elétrico, (V / m)	Intensidade de campo magnético, (A / m)	Densidade de Potência da onda plana equivalente, $S_{eq}$ (W / m <sup>2</sup> )
9 kHz a 65 kHz	610	24,4	—
0,065 MHz a 1 MHz	610	$1,6/ f$	—
1MHz a 10 MHz	$610/ f$	$1,6/ f$	—
10 MHz a 400 MHz	61	0,16	10
400 MHz a 2000 MHz	$3 f^{1/2}$	$0,008 f^{1/2}$	$f / 40$
2 GHz a 300 GHz	137	0,36	50

**Tabela 4.4 - Níveis de referência para a exposição da população em geral.**

Faixa de frequências	Intensidade de campo elétrico, (V / m)	Intensidade de campo magnético, (A / m)	Densidade de Potência da onda plana equivalente, $S_{eq}$ (W / m <sup>2</sup> )
9 kHz a 150 kHz	87	5	—
0,15 MHz a 1 MHz	87	$0,73/ f$	—
1 MHz a 10 MHz	$87/ f^{1/2}$	$0,73/ f$	—
10 MHz a 400 MHz	28	0,073	2
400 MHz a 2000 MHz	$1,375 f^{1/2}$	$0,0037 f^{1/2}$	$f / 200$
2 GHz a 300 GHz	61	0,16	10

Os níveis de referência estabelecidos para exposição se referem às médias espacial e temporal das grandezas indicadas. Para o cálculo da média temporal<sup>6</sup>, o período de tempo a ser utilizado é de 6 minutos para frequências entre 100 kHz e 10 GHz e de  $(68 / f^{1,05})$  minutos ( $f$  em GHz) para frequências acima de 10 GHz [ANATEL,17].

<sup>6</sup> IEEE Std C95.3 - Recommended Practice for the Measurement of Potentially Hazardous Electromagnetic Fields—RF and Microwave -

De acordo com a Resolução 303, a avaliação das estações transmissoras de radiocomunicação deve ser efetuada por profissional habilitado, o qual deverá elaborar e assinar um Relatório de Conformidade para cada estação analisada, com indicação clara e conclusiva de que o funcionamento da estação, nas condições de sua avaliação, atende aos níveis de referência estabelecidos. A avaliação da exposição pode ser efetuada de duas formas: análises teóricas, baseadas nas características da estação transmissora, ou por meio de medições diretas dos CEMRF, com a estação em funcionamento.

Para o caso da análise teórica, o Relatório deve conter, necessariamente, a memória de cálculo dos campos eletromagnéticos produzidos pelas estações, utilizando-se modelos de propagação conhecidos ou os métodos empregados e resultados das medições, quando utilizadas para demonstrar o atendimento aos níveis de referência de exposição estabelecidos. Medições diretas são obrigatórias apenas em locais onde é permitido o acesso de pessoas e quando os valores de CEMRF, obtidos por meio de cálculos teóricos, forem iguais ou superiores a  $2/3$  dos níveis de referência de exposição estabelecidos para os campos elétricos ou magnéticos.

Apesar do cumprimento, por parte das empresas de telefonia móvel, dos termos da Resolução 303, pode-se observar a falta de um tratamento padronizado ou um modelo a ser utilizado por todas as operadoras.

## **4.2. Procedimentos de avaliação de estações terminais portáteis**

No Brasil, de acordo com a Resolução 303, a avaliação de estações terminais portáteis deverá ser efetuada em laboratório, envolvendo a medida direta da SAR em um manequim que simula a cabeça ou o corpo humano e exibe as mesmas características de absorção do tecido humano. Além dos documentos obrigatórios já exigidos, deverão ser apresentados, pelo fornecedor, Relatório de Testes e Laudo Conclusivo referentes ao atendimento aos limites da SAR, estabelecidos na Tabela V da referida resolução.

### 4.2.1. Medidas de SAR

O teorema de Poynting, desenvolvido por John Henry Poynting, expressa a lei de conservação da energia e estabelece que a diminuição de energia eletromagnética numa região se deve à dissipação de potência em forma de calor (por efeito Joule) e ao fluxo em direção ao exterior. De acordo com o teorema de Poynting, se  $S$  for uma superfície fechada envolvendo um volume  $V$ , então:

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V (W_C + \epsilon \cdot \vec{E} \cdot \vec{E} + \mu \cdot \vec{H} \cdot \vec{H}) dV + \oint_S \vec{E} \times \vec{H} \cdot d\vec{S}}_{\text{Lei da Conservação de Energia}} = 0 \quad (4.1)$$

onde:

$\oint_S \vec{E} \times \vec{H} \cdot d\vec{S}$  - é a potência fluindo para fora de  $V$ , limitado por  $S$ ;

$W_C$  - é a energia instantânea de partículas carregadas em um ponto dado em  $V$ ;

$\epsilon \cdot \vec{E} \cdot \vec{E}$  - é a energia instantânea armazenada no campo  $\vec{E}$  em um ponto dado em  $V$  e

$\mu \cdot \vec{H} \cdot \vec{H}$  - é a energia instantânea armazenada no campo  $\vec{H}$  em um ponto dado no volume  $V$  [DURNEY, 22].

A SAR é definida como sendo a taxa temporal de transferência da energia às partículas carregadas em um volume infinitesimal dividida pela massa do volume infinitesimal. Do teorema de Poynting, obtém-se:

$$SAR = (\partial W_C / \partial t) / \rho_m \quad (4.2)$$

onde  $\rho_m$  é a massa do volume infinitesimal.

Para campos senoidais estacionários, a potência média, no tempo, absorvida por unidade de volume, em um ponto interior a um volume, é dada pela equação (4.3):

$$P = (\partial W_C / \partial t) = \sigma |E_{\text{int}}|^2 = \omega \epsilon_0 \epsilon'' |E_{\text{int}}|^2 \quad (4.3)$$

onde:

$|E_{\text{int}}|$  (V/m) - é a magnitude do campo elétrico interno;

$\sigma$  (S/m) - é a condutividade elétrica do tecido;

$\rho$  (Kg/m<sup>3</sup>) - é a densidade de massa do tecido;

$\omega = 2\pi f$  (rad/s) - é a frequência angular;

$\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  (F/m) - é a permissividade elétrica no espaço livre e

$\epsilon''$  - corresponde à parte imaginária da permissividade elétrica complexa ( $\epsilon^* = \epsilon' + j\epsilon''$ ) e representa o fator de perda de energia do campo elétrico no material devido à polarização dielétrica. O fator de perdas está relacionado à condutividade elétrica do material,  $\sigma$ , pela expressão  $\epsilon'' = \frac{\sigma}{\omega\epsilon_0}$ .

Assim, a SAR local é associada ao campo  $\vec{E}_{\text{int}}$  através da equação (4.4).

$$SAR = P/\rho_m = \frac{\sigma |E_{\text{int}}|^2}{\rho_m} = \frac{\omega\epsilon_0\epsilon'' |E_{\text{int}}|^2}{\rho_m} \quad (4.4)$$

Geralmente, apenas os laboratórios de pesquisa fazem medidas da SAR, por serem relativamente difíceis e, para tanto, utilizam condições e equipamentos especializados. Três técnicas básicas são usadas para se medir a SAR. A primeira delas é medir o campo elétrico dentro do corpo, usando-se sensores de medição de campo elétrico implantáveis, para calcular, então, a SAR por meio da equação (4.4). Isto requer que se conheça a condutividade do material. Esta técnica é apropriada para medir a SAR somente em pontos específicos em cobaias. Mesmo nos modelos que usam material sintético equivalente ao tecido, medir o campo  $\vec{E}_{\text{int}}$  em mais do que alguns pontos normalmente não é prático [DURNEY, 22].

Uma segunda técnica básica para medir a SAR é medir a mudança de temperatura devido ao calor produzido, pela radiação, e calcular, então, a SAR. Sensores introduzidos em cobaias ou em modelos podem medir temperaturas locais e, então, a SAR em um dado ponto pode ser calculada a partir da variação da temperatura [DURNEY, 22].

Uma terceira técnica é calcular a potência absorvida como sendo a diferença entre a potência incidente e a potência dispersada em uma câmara de radiação. Para tal, utilizam-se acopladores direcionais e medidores de potência em todas as portas de saída e entrada. A potência absorvida pela câmara vazia pode ser calculada através da equação (4.5).

$$P_E = P_I - P_O - P_R \quad (4.5)$$

onde:

$P_E$  - é a potência (watts) absorvida pela câmara vazia;

$P_I$  - é a potência de entrada (watts);

$P_O$  - é a a potência de saída (watts) e

$P_R$  - é a a potência refletida (watts).

Em seguida, coloca-se a amostra em análise na câmara e calcula-se, da mesma forma,  $P_S$  - a potência absorvida pela câmara e pela amostra. A potência absorvida pela amostra é determinada pela diferença entre  $P_E$  e  $P_S$ . Para a determinação da SAR, divide-se o resultado pela massa do corpo. Este é o chamado método de potência diferencial [DURNEY, 22].

### 4.3. Níveis de exposição praticados no Brasil

No Brasil, além da Resolução da ANATEL 303, que dispõe sobre níveis de referência para a exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na faixa de radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz, outra Resolução, a 454/2006 [23] delimita a

potência efetiva radiada (ERP - Potência entregue a uma antena, multiplicada pelo ganho da antena em relação a um dipolo de meia onda, numa determinada direção) de uma Estação Rádio Base, de acordo com a faixa de frequências na qual ela está operando.

#### 4.3.1. Cálculo de distâncias mínimas permitidas

Para o caso de um único sistema irradiante, pode-se calcular a densidade de potência através da equação:

$$S = \frac{EIRP \times 2,56}{4\pi r^2} \quad (4.6)$$

onde:

EIRP - é a Potência Equivalente Isotropicamente Radiada;

r - é a distância do ponto de observação à antena transmissora e

o fator 2,56 - é uma aproximação para a reflexão no solo, considerando-se a possibilidade de que campos refletidos possam se adicionar em fase ao campo incidente direto, levando a um aumento de 1,6 na intensidade do campo e a um aumento na densidade de potência de 2,56 ( $1,6^2$ ).

De acordo com a Resolução 303 da ANATEL, para a exposição populacional na faixa de frequências utilizada para o Serviço Móvel Pessoal no Brasil (800 MHz a 2000 MHz), a densidade de potência da onda plana equivalente se restringe a  $S = f/200$ .

Assim, tem-se:

$$\frac{f}{200} = \frac{EIRP \times 2,56}{4\pi R^2} \quad (4.7)$$

$$R = 6,38 \times \sqrt{\frac{EIRP}{f \text{ (MHz)}}} \quad (4.8)$$

Onde a grandeza R é definida como sendo a distância mínima às antenas de estações transmissoras para o atendimento aos níveis de referência de exposição para a população em geral. Desta forma, tem-se o desenvolvimento matemático dos valores de distância considerados como seguros para uma única fonte emissora, baseado nos limiares propostos pelo órgão regulador e nas expressões que definem ondas eletromagnéticas.

Do mesmo modo, para a exposição ocupacional, com  $S_{equivalente} = \frac{f}{40}$ , tem-se:

$$\frac{f \text{ (MHz)}}{40} = \frac{EIRP \times 2,56}{4\pi R^2} \quad (4.9)$$

$$R = 2,85 \times \sqrt{\frac{EIRP}{f \text{ (MHz)}}} \quad (4.10)$$

#### 4.3.2. Faixas de frequência e níveis recomendados

A Resolução 454/2006 [23] da ANATEL determina as subfaixas de frequência a serem utilizadas no serviço SMP, as quais estão discriminadas na tabela 4.5.

Tabela 4.5 - Blocos e subfaixas de radiofrequência do SMP (Resolução 454/2006 da ANATEL).

Arranjo de Blocos das Subfaixas de radiofrequências do SMP		
	Transmissão da Estação Móvel (MHz)	Transmissão da Estação Rádio Base (MHz)
Subfaixa A	824 a 835	869 a 880
	845 a 846,5	890 a 891,5
Subfaixa B	835 a 845	880 a 890
	846,5 a 849	891,5 a 894
Subfaixa D	910 a 912,5	955 a 957,5
	1710 a 1725	1.805 a 1.820
Subfaixa E	912,5 a 915	957,5 a 960
	1.740 a 1.755	1.835 a 1.850
Subfaixa F	1.920 a 1.935	2.110 a 2.125
Subfaixa G	1.935 a 1.945	2.125 a 2.135
Subfaixa H	1.945 a 1.955	2.135 a 2.145
Subfaixa I	1.955 a 1.965	2.145 a 2.155
Subfaixa J	1.965 a 1.975	2.155 a 2.165
Subfaixa L	1.895 a 1.900	1.975 a 1.980
Subfaixa M	1.755 a 1.765	1.850 a 1.860
Subfaixas de Extensão	898,5 a 901	943,5 a 946
	907,5 a 910	952,5 a 955
	1.725 a 1.727,5	1.820 a 1.822,5

1.727,5 a 1.730	1.822,5 a 1.825
1.730 a 1.732,5	1.825 a 1.827,5
1.732,5 a 1.735	1.827,5 a 1.830
1.735 a 1.737,5	1.830 a 1.832,5
1.737,5 a 1.740	1.832,5 a 1.835
1.765 a 1.770	1.860 a 1.865
1.770 a 1.775	1.865 a 1.870
1.775 a 1.777,5	1.870 a 1.872,5
1.777,5 a 1.780	1.872,5 a 1.875
1.780 a 1.782,5	1.875 a 1.877,5
1.782,5 a 1.785	1.877,5 a 1.880
1.885 a 1.890	
1.890 a 1.895	

A Resolução 454/2006 delimita, também, os valores de ERP, máximos por estação, os quais estão listados na tabela 4.6.

**Tabela 4.6 - Valores de ERP máximos por estação (Resolução 454/2006 da ANATEL).**

<b>Potência efetiva radiada (ERP) de uma Estação Rádio Base (Res. 454/2006)</b>		
<b>Faixa de frequências</b>		<b>ERP (dBm)</b>
I	869 MHz a 894 MHz	64
II	943,5 MHz a 946 MHz e 952,5 MHz a 960 MHz	60
III	1.805 MHz a 1.880 MHz e 2.110 MHz a 2.170 MHz	69
IV	1.975 MHz a 1.980 MHz	67

Ressalta-se que o valor da potência efetiva radiada (ERP) por uma Estação Rádio Base corresponde ao total da contribuição de todas as portadoras de um sistema [ANATEL, 17].

De posse destas informações, é possível realizar uma análise independente para cada subfaixa de radiofrequências. De acordo com a tabela 4.6, pode-se identificar, com base na frequência mínima de transmissão de cada subfaixa, os valores de ERP máximos. A ERP está relacionada com a EIRP (Potência entregue a uma antena, multiplicada pelo ganho da antena em relação a uma antena isotrópica), para o dipolo de meia onda, pelo fator de 1,64. Assim, tem-se, também, os valores máximos de EIRP de cada subfaixa.

De acordo com a Resolução 303, para a exposição ocupacional, a densidade de potência equivalente máxima é dada pela equação  $S_{eq} \leq f/40$ , e para a exposição da

população em geral, pela equação  $S_{eq} \leq f/200$ . Desta forma, tem-se também os valores máximos de  $S_{eq}$  de cada subfaixa.

Considerando as equações (4.8) e (4.10), para o cálculo da distância mínima às antenas de estações transmissoras, foi construída a tabela 4.7 com os resultados calculados para os valores de referência para cada subfaixa de radiofrequência:

**Tabela 4.7 - Valores de referência para as subfaixas de radiofrequência.**

	Transmissão da Estação Rádio Base (MHz)	Tx min (MHz)	ERP max (dBm)	População em Geral	
				$S_{eq}$ Limite	distância segura - R (m)
<b>Subfaixa A</b>	869 a 880	869	64	4,3	13,9
	890 a 891,5	890	64	4,5	13,7
<b>Subfaixa B</b>	880 a 890	880	64	4,4	13,8
	891,5 a 894	891,5	64	4,5	13,7
<b>Subfaixa D</b>	955 a 957,5	955	60	4,8	8,4
	1.805 a 1.820	1.805	69	9,0	17,1
<b>Subfaixa E</b>	957,5 a 960	957,5	60	4,8	8,4
	1.835 a 1.850	1.835	69	9,2	17,0
<b>Subfaixa F</b>	2.110 a 2.125	2.110	69	10,6	15,9
<b>Subfaixa G</b>	2.125 a 2.135	2.125	69	10,6	15,8
<b>Subfaixa H</b>	2.135 a 2.145	2.135	69	10,7	15,8
<b>Subfaixa I</b>	2.145 a 2.155	2.145	69	10,7	15,7
<b>Subfaixa J</b>	2.155 a 2.165	2.155	69	10,8	15,7
<b>Subfaixa L</b>	1.975 a 1.980	1.975	67	9,9	13,0
<b>Subfaixa M</b>	1.850 a 1.860	1.850	69	9,3	16,9
<b>Subfaixa de Extensão</b>	943,5 a 946	943,5	60	4,7	8,4
	952,5 a 955	952,5	60	4,8	8,4
	1.820 a 1.822,5	1.820	69	9,1	17,1
	1.822,5 a 1.825	1.822,50	69	9,1	17,1
	1.825 a 1.827,5	1.825	69	9,1	17,1
	1.827,5 a 1.830	1.827,50	69	9,1	17,0
	1.830 a 1.832,5	1.830	69	9,2	17,0
	1.832,5 a 1.835	1.832,50	69	9,2	17,0
	1.860 a 1.865	1.860	69	9,3	16,9
	1.865 a 1.870	1.865	69	9,3	16,9
	1.870 a 1.872,5	1.870	69	9,4	16,8
	1.872,5 a 1.875	1.872,50	69	9,4	16,8
	1.875 a 1.877,5	1.875	69	9,4	16,8
	1.877,5 a 1.880	1.877,50	69	9,4	16,8
	1.885 a 1.890	1.885	69	9,4	16,8
1.890 a 1.895	1.890	69	9,5	16,8	

#### 4.4. Condições para operação em ambientes multiusuários

O valor da potência efetiva radiada (ERP), por uma Estação Rádio Base, corresponde ao total da contribuição de todas as portadoras de um sistema. Entretanto, na prática, uma estação pode possuir mais de um setor, cada qual irradiando um valor de EIRP distinto e operando em mais de uma faixa de frequências. Além disso, um ponto de análise qualquer pode estar sofrendo influência de mais de uma estação simultaneamente, dando origem ao conceito de “ambientes multiusuários”.

##### 4.4.1. Campos de frequências múltiplas

A ANATEL determina que sejam observadas determinadas regras em ambientes onde haja exposição simultânea a campos de frequências múltiplas. Neste caso, os campos agem de forma aditiva em seus efeitos. A aditividade deve ser examinada separadamente para os efeitos de estimulação térmica e elétrica, e as restrições básicas devem ser atendidas. As equações (4.11) e (4.12) se aplicam às frequências relevantes, em situações práticas de exposição. Para levar em conta os efeitos térmicos relevantes acima de 100 kHz, os seguintes requisitos devem ser aplicados aos níveis dos campos [ANATEL, 17]:

$$\underbrace{\sum_{i=100\text{KHz}}^{i=1\text{MHz}} \left( \frac{E_i}{c} \right)^2}_{\text{fora da faixa de interesse}} + \underbrace{\sum_{i=1\text{MHz}}^{i=300\text{GHz}} \left( \frac{E_i}{E_{L,i}} \right)^2}_{\text{faixa utilizada em sistemas celulares}} < 1 \quad (4.11)$$

onde:

$E_i$  - é a Intensidade de campo elétrico na frequência  $i$ ;

$E_{L,i}$  - é o nível de referência para o campo elétrico na frequência  $i$ ;

$c$  - deve ser igual a  $\frac{610}{f} \left( \frac{V}{m} \right)$ ,  $f$  em MHz, para exposição ocupacional e

$\frac{87}{f^{\frac{1}{2}}} \left( \frac{V}{m} \right)$  para exposição do público em geral.

Sabendo que  $S = \frac{E^2}{377}$ , chega-se a:

$$\sum_{i=1MHz}^{i=300GHz} \frac{S_i}{S_{L,i}} < 1 \quad (4.12)$$

onde:

$S_i$  - é a densidade de potência na frequência  $i$ ;

$S_{L,i}$  - é o nível de referência para a densidade de potência, na frequência  $i$ .

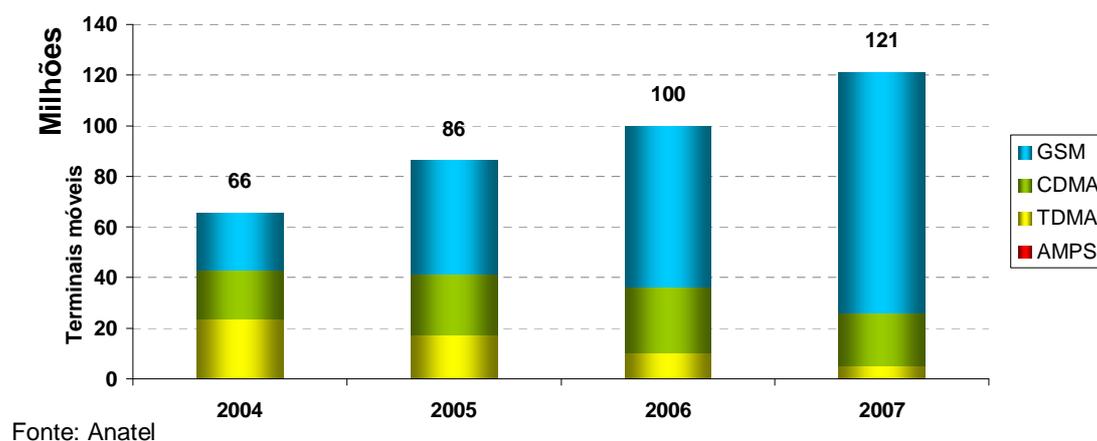
As equações (4.11) e (4.12) admitem condições de “pior caso” para os campos devidos a fontes múltiplas. Como resultado, em situações práticas típicas, podem ser permitidos níveis de exposição menos restritivos do que os níveis de referência calculados a partir de tais equações [ANATEL, 17].

#### 4.4.2. Considerações acerca dos aspectos regulatórios

Foi visto que o cálculo teórico envolve diversas variáveis complexas e deve ser analisado caso a caso, em virtude das peculiaridades de cada sistema. O desenvolvimento de um modelo completo deve levar em consideração o diagrama de irradiação de cada antena e as distâncias individuais dos sistemas irradiantes ao ponto de análise, o que adiciona certo grau de dificuldade ao modelo, principalmente em função do cálculo dos valores de EIRP para cada sistema irradiante. Além disso, cada equipamento possui suas especificações exatas de perdas e ganhos, variando para cada tecnologia empregada, modelo e fabricante. Os valores apresentados neste trabalho representam situações de “pior caso”. Todavia, deve-se levar em consideração a existência de compartilhamento de infraestrutura entre operadoras, inclusive para serviços diferentes, como por exemplo, telefonia celular, telefonia fixa (sistemas WLL) e radiodifusão.

Com a chegada dos sistemas de 3ª geração, as empresas adicionam cada vez mais equipamentos e sistemas irradiantes às suas torres. A coexistência de sistemas

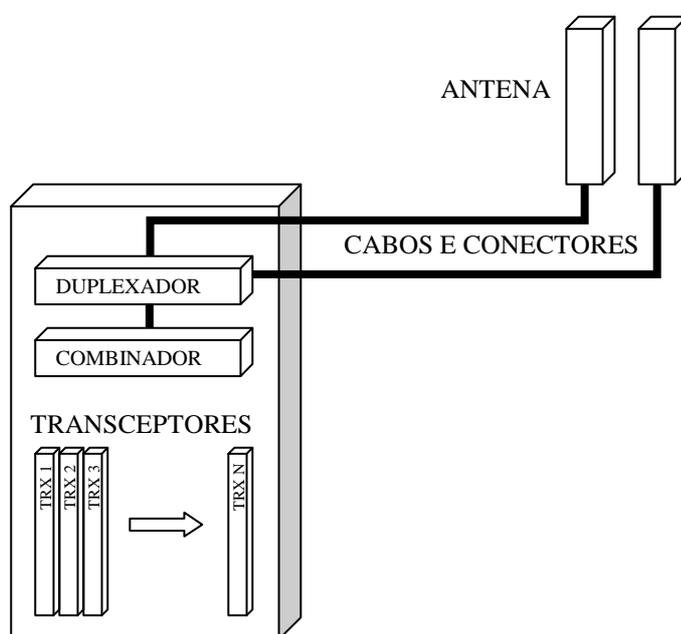
ocorre, uma vez que o advento de uma nova tecnologia não implica imediatamente no fim do ciclo de vida de uma tecnologia precedente, conforme pode ser observado na figura 4.1. Por esta razão, existem muitos casos de operadoras que utilizam a tecnologia UMTS em conjunto com GSM e TDMA. Assim, o desenvolvimento de um modelo completo que possa simular as condições de compartilhamento e diversidade de sistemas, o mais próximo do real possível, faz-se necessário o quanto antes e este é exatamente o foco deste trabalho.



**Figura 4.1 - Coexistências de tecnologias atuais e legadas.**

## 5. Características e componentes das estações rádio base

Para viabilizar a análise das variáveis e dos componentes envolvidos na determinação da EIRP de cada sistema irradiante que compõe a Estação Rádio Base, é necessária a adoção de um modelo que atenda, de uma forma geral, a todas as situações, independente da tecnologia empregada na transmissão. Este trabalho será centrado nas características principais de cada equipamento que possa vir a influenciar no estudo da potência efetivamente irradiada. A figura 5.1 ilustra o modelo de uma estação rádio base:



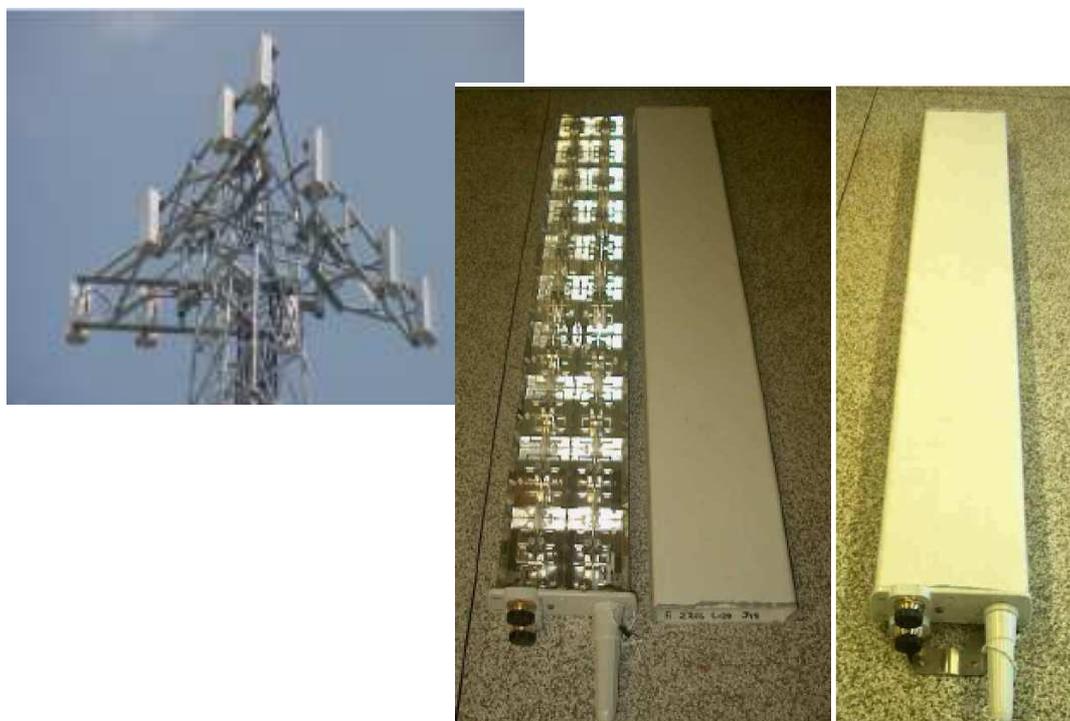
**Figura 5.1 - Modelo de um sistema irradiante.**

Os seguintes componentes serão considerados neste trabalho:

- Antenas
- Transceptores
- Combinador
- Duplexador
- Filtros
- Cabos e Conectores

## 5.1. Antenas

As antenas possuem duas tarefas principais: converter a potência de um sinal de RF (corrente em um elemento condutor) para ondas eletromagnéticas e induzir sinais de RF em um elemento condutor pela interceptação de ondas eletromagnéticas. Em outras palavras, realizam a “transformação” do sinal elétrico em um sinal eletromagnético e também fazem o processo inverso, o de captação de ondas eletromagnéticas e “transformação” para sinal elétrico. A teoria completa, envolvendo os tipos de antenas existentes e suas características individuais, é bastante extensa. Neste trabalho, estas características serão abordadas de uma forma sintetizada. Dois exemplos de antenas utilizadas no SMP estão apresentados na figura 5.2.



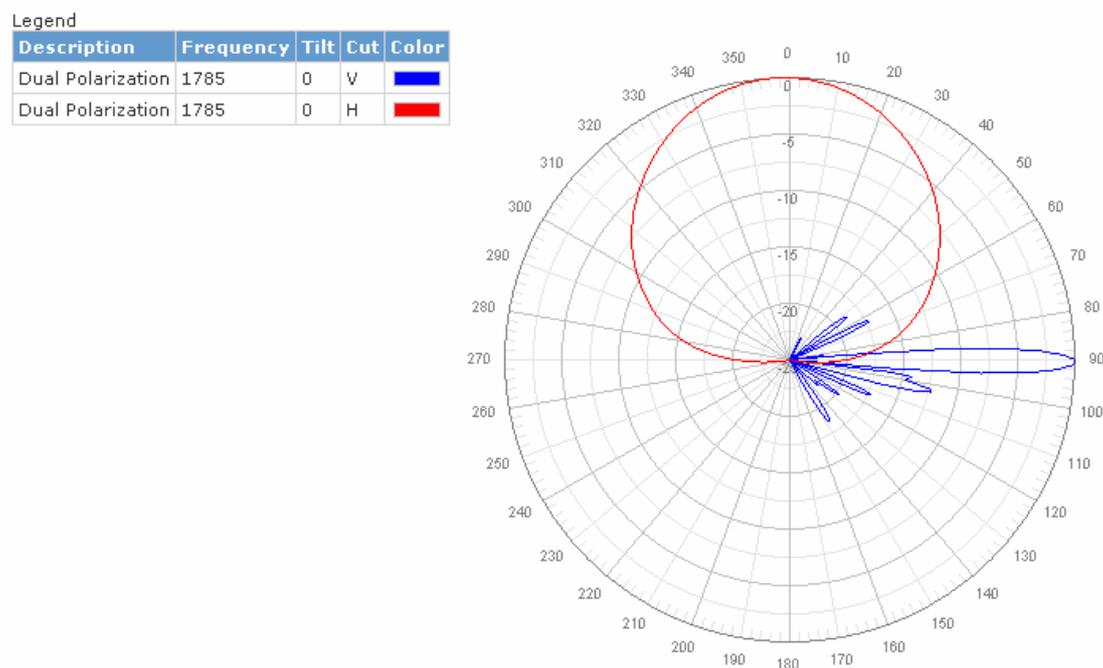
**Figura 5.2 - Exemplos de antenas do SMP.**

Para antenas lineares, os comprimentos das antenas eficientes normalmente adotados são:  $L = \lambda/2$  ou  $L = \lambda/4$ , onde  $L$  é o comprimento do elemento ativo da antena e  $\lambda$  é o comprimento de onda.

### 5.1.1. Diagrama de irradiação das antenas

Na prática, deseja-se visualizar a distribuição da intensidade de potência em diferentes direções. Esta visualização é feita através de diagramas tomados em diferentes planos no espaço, normalmente nas direções vertical (V) e horizontal (H).

A orientação de maior intensidade é chamada de lóbulo principal. As demais orientações de intensidade menores são os lóbulos secundários e os lóbulos traseiros.



**Figura 5.3 - Exemplo de diagrama de irradiação para uma antena direcional.**

Genericamente, diagrama de irradiação é a representação gráfica da distribuição espacial das propriedades de irradiação da antena, representada por uma superfície imaginária chamada de “esfera de irradiação”, ficando a antena hipoteticamente no seu centro, conforme pode ser visualizado na figura 5.4 para o caso de mais de uma antena.

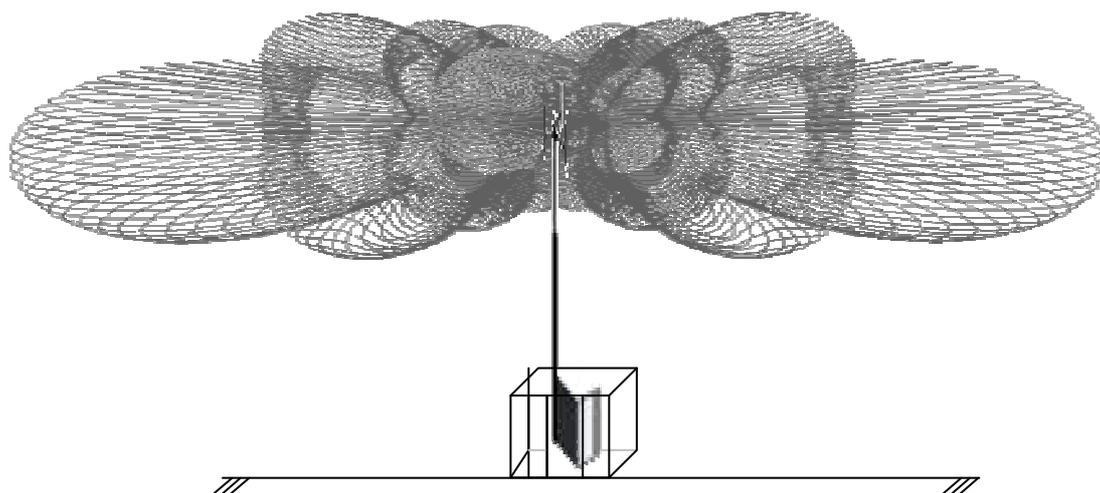


Figura 5.4 - Visão tridimensional do diagrama de irradiação composto por mais de uma antena.

### 5.1.2. Ganho

Outro método útil para descrever o desempenho de uma antena é o seu ganho, o qual expressa a capacidade de uma antena em concentrar a sua energia, sob forma de onda eletromagnética, em uma determinada direção.

Apesar de o ganho de uma antena estar diretamente associado à diretividade, é uma medida que leva em conta a eficiência de uma antena, bem como sua capacidade direcional.

O *ganho absoluto* de uma antena (em uma dada direção) é definido como sendo “a relação entre a intensidade de irradiação, em uma determinada direção, e a intensidade de irradiação que seria obtida se a potência entregue à antena fosse isotropicamente irradiada” [Balanis, 24].

$$G = 4\pi \frac{\text{intensidade de radiação}}{\text{potência total entregue}} = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{IN}} \text{ (adimensional)} \quad (5.1)$$

onde  $U(\theta, \phi)$  é a intensidade de radiação em uma determinada direção.

Sabendo-se que, nem toda a potência entregue é aceita pela antena, e que a diretividade pode ser expressa por  $D = 4\pi \frac{U(\theta, \phi)}{P_{IN}}$ , chega-se à equação (5.2):

$$G = \eta \cdot D \quad (5.2)$$

onde:

$\eta$  - é a eficiência da antena.

Em alguns casos, o ganho é determinado através da “comparação com um outro elemento irradiador de referência” – *ganho relativo*, que pode ser o dipolo de  $\lambda/2$  ou qualquer outra antena cujo ganho possa ser calculado [BALANIS, 24]. Ou seja, uma antena que irradia isotropicamente possui ganho igual a zero dB, enquanto que uma antena com maior diretividade possui ganho maior que zero. Assim, tem-se que:

$$G(\text{dBi}) = 2,15 + G(\text{dBd}) \quad (5.3)$$

**onde:**

**dB*i*** – é o ganho diretivo em comparação a uma antena isotrópica e

**dB*d*** – é o ganho diretivo em comparação a um dipolo de meia-onda.

### 5.1.3. Relação Frente-costas

Este parâmetro é uma medida utilizada para avaliar o quanto de potência é perdida na direção oposta à direção de máxima radiação. A relação frente-costas ( $R_{fc}$ ) de uma antena pode ser obtida a partir de:

$$R_{fc}(\text{dB}) = G(\theta_f, \varphi_f) - G(\theta_c, \varphi_c) = G_f - G_c \quad (5.4)$$

Onde  $\theta_c = \theta_f + 180^\circ$ ,  $\varphi_c = \varphi_f + 180^\circ$  e  $G_f$  é o ganho máximo, obtido geralmente onde se considera a frente da antena.  $G_c$  é o ganho medido na direção oposta, ou nas “costas” da antena. Todos os ganhos devem ser fornecidos em decibéis.

#### 5.1.4. Ângulo de meia potência

O feixe de meia-potência pode ser obtido diretamente dos diagramas de radiação. Seu valor é fornecido em radianos ou em graus, sendo que a medição é feita entre as direções onde a potência irradiada cai para a metade do seu valor máximo. Nos diagramas de radiação, estas direções correspondem aos pontos de -3dB, conforme mostra a figura 5.5.

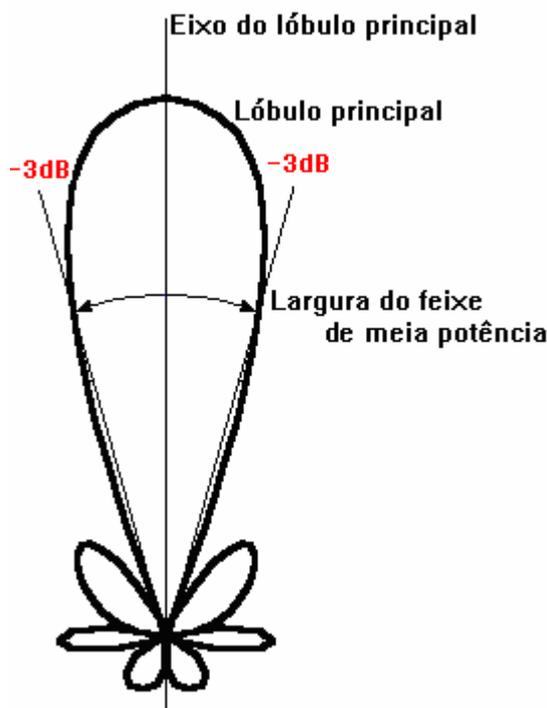


Figura 5.5 - Ângulo de meia potência de um diagrama de irradiação.

O ângulo de meia potência é um importante parâmetro de medida e serve como ponderação entre o lóbulo principal e os secundários, uma vez que o decréscimo do ângulo de meia potência implica em um acréscimo nos lóbulos laterais e vice-versa [BALANIS, 24].

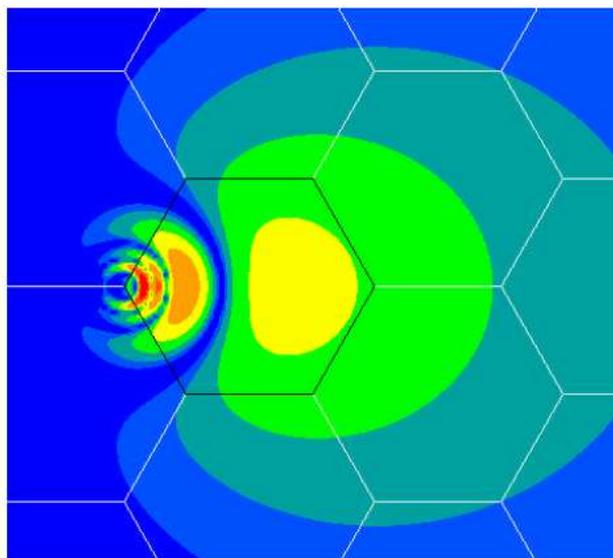
#### 5.1.5. Ângulo de elevação

A distância em relação à antena não é a única nem a mais importante variável a partir da qual se define qual a intensidade do campo eletromagnético irradiado pela mesma. O feixe de irradiação de cada setor de uma ERB deve ser ajustado de forma a não deixar que o sinal interfira em outra célula. Para isso, além da utilização de antenas diretivas com diagramas de irradiação adequados para cada situação, determinados

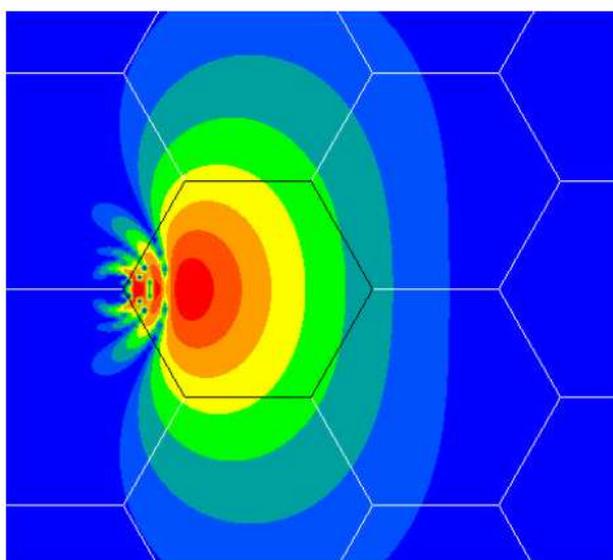
ângulos de elevação são aplicados às antenas a fim de controlar os raios de cobertura da cada setor da ERB. Estes ângulos de elevação podem ser obtidos por meio da utilização de *downtilt* mecânico e/ou *downtilt* elétrico. Ou seja, o ângulo de elevação de uma antena é dado pela soma do *downtilt* mecânico e do *downtilt* elétrico. Na prática, a inclinação normalmente varia de 3° a 15°.

#### **5.1.5.1. *Downtilt* mecânico**

O *downtilt* mecânico nada mais é do que a inclinação mecânica da antena para que se obtenha o ângulo de inclinação desejado. Assim, torna-se possível o controle da área de cobertura de uma ERB, simplesmente inclinando sua antena, conforme pode se observado nas figura 5.6.



(a)



(b)

Figura 5.6 - Irradiação normal (a) e com *downtilt* mecânico (b).

#### 5.1.5.2. *Downtilt* elétrico

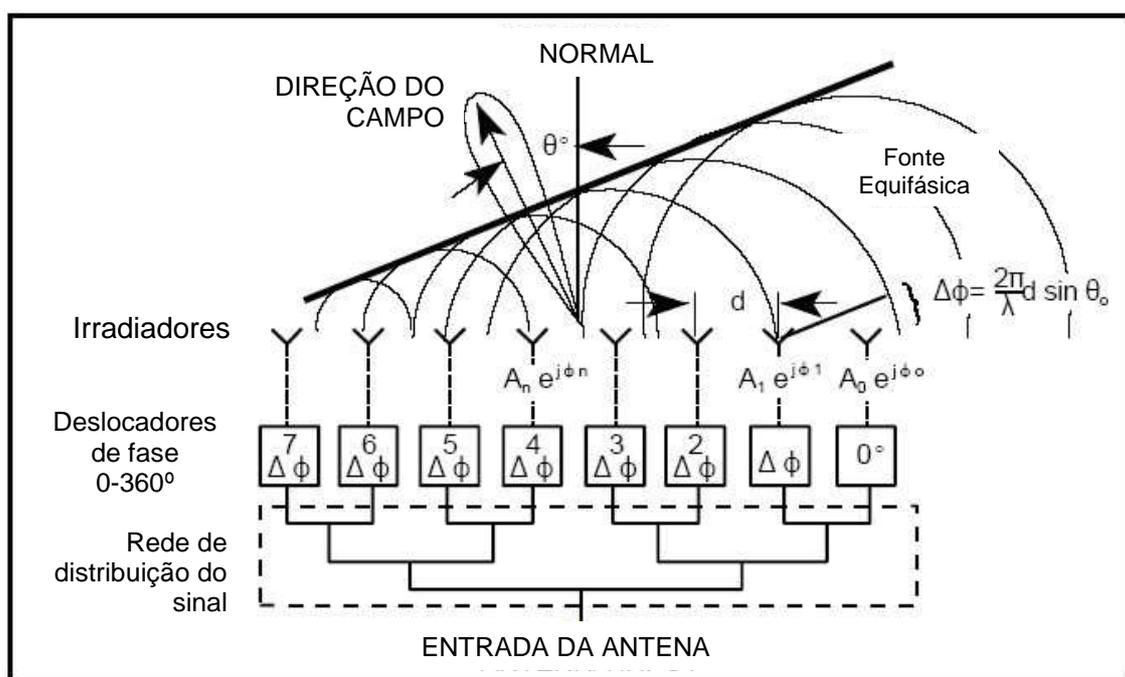
As antenas das ERB's geralmente são construídas utilizando a técnica de arranjos colineares de antenas do tipo painel de dipolo ou empilhamento de dipolos de  $\lambda/2$ . Isto aumenta o efeito da concentração da energia da antena em uma determinada direção. Os arranjos colineares alcançam boa diretividade na faixa de frequências utilizada para a comunicação celular, com perfil estreito e, assim, oferecem pouca superfície de carga para os ventos. Para obter o efeito do *downtilt* elétrico, controla-se as amplitudes e as fases de alimentação dos dipolos, conforme mostra a **tabela 5.1**, a título

de exemplo, para obtenção de um ângulo de inclinação de  $7^\circ$  abaixo da linha horizontal no plano de elevação.

**Tabela 5.1 - Amplitudes e fases de alimentação de um arranjo linear de dipolos de  $\lambda/2$ , para obtenção de  $7^\circ$  de inclinação abaixo da horizontal.**

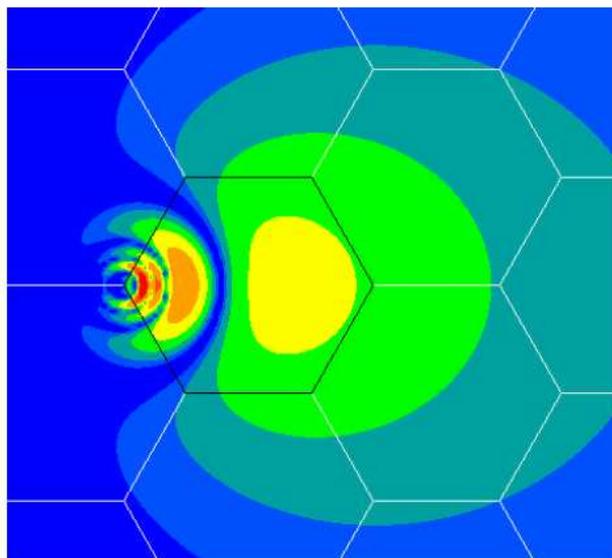
Elemento	1	2	3	4	5	6
Amplitude (Normalizada)	0,307	0,372	0,438	0,438	0,438	0,438
Fase (Radianos)	0	0,175	0,393	0,665	1,384	2,845

A figura 5.7 ilustra o comportamento do campo eletromagnético em função da defasagem entre os elementos de uma antena.

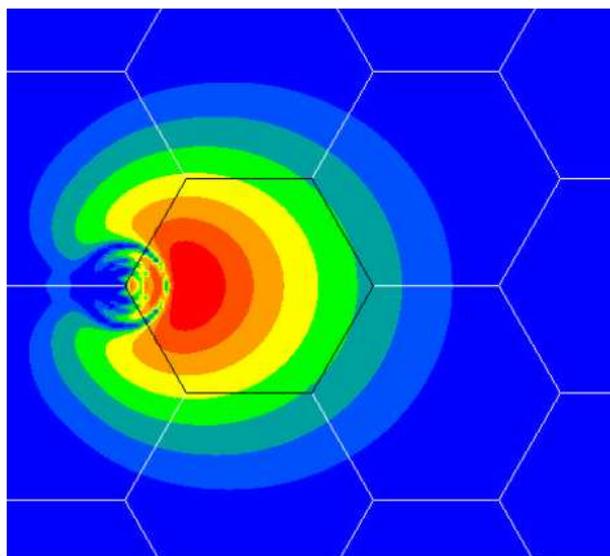


**Figura 5.7 - Defasagem entre os elementos irradiadores de uma antena e a conseqüente alteração na frente de onda.**

Como resultado, tem-se um incremento do campo eletromagnético nas regiões mais próximas à antena e um maior controle sobre o raio de cobertura da ERB, conforme ilustra a figura 5.8.



(a)



(b)

Figura 5.8 - Irradiação normal (a) e com *downtilt* elétrico (b).

### 5.1.5.3. Comparação entre os *Downtilt's* Elétrico e Mecânico

Para o *downtilt* mecânico, tem-se as seguintes características:

- Distribuição de energia deformada;
- Ângulo de meia potência horizontal aumentado;

- Dificuldade na precisão do comportamento do diagrama em *softwares* de predição, para planejamento da cobertura celular;
- Atuação de forma diferente para cada ângulo azimutal, ou seja, ocorrência de elevação acima da linha horizontal na parte traseira da antena.

Para o *downtilt* elétrico, tem-se as seguintes características:

- Distribuição de energia constante e controlada;
- Ângulo de meia potência horizontal constante, independente do valor do *downtilt* elétrico;
- Redução do ganho idêntica para todas as direções azimutais;
- Maior proximidade da realidade em termos de distribuição de energia nos *softwares* de predição de cobertura, para planejamento da cobertura celular.

A figura 5.9 ilustra a diferença entre os *downtilt's* elétrico e mecânico:

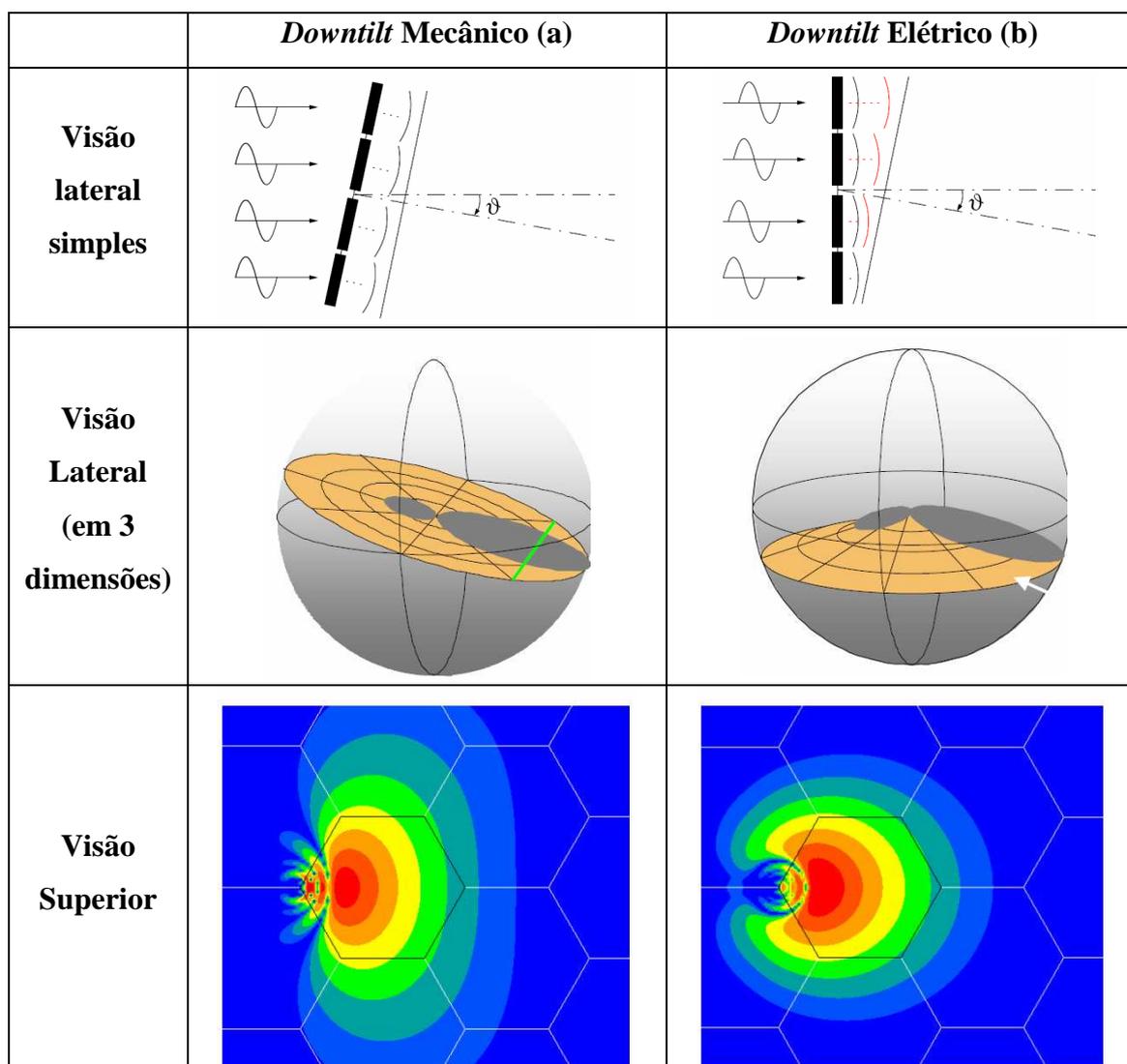


Figura 5.9 - Comparação entre o *downtilt* mecânico (a) e o elétrico (b).

## 5.2. Transceptores

Um transceptor é um dispositivo que combina o transmissor (TX) e o receptor (RX) em um só módulo (TRX). O módulo TRX é, da perspectiva do processamento de sinal, a parte mais importante da ERB. Consiste, basicamente, de uma parte para processamento de sinal e uma parte para modulação e demodulação. Todas as partes de uma ERB estão direta ou indiretamente interconectadas aos módulos transceptores (TRX).

Para uma ERB GSM, por exemplo, a potência máxima de saída medida na entrada do combinador deve ser, de acordo com sua classe, conforme a tabela 5.2:

Tabela 5.2 - Classes de potência para transceptores GSM.

GSM 400 / GSM 900 / GSM 850 / MXM 850		DCS 1 800 / PCS 1 900 / MXM 1900	
Classe de potência	Potência máxima de saída	Classe de potência	Potência máxima de saída
1	320 - (< 640) W	1	20 - (< 40) W
2	160 - (< 320) W	2	10 - (< 20) W
3	80 - (< 160) W	3	5 - (< 10) W
4	40 - (< 80) W	4	2,5 - (< 5) W
5	20 - (< 40) W		
6	10 - (< 20) W		
7	5 - (< 10) W		
8	2,5 - (< 5) W		

Normalmente, mais de um transceptor é utilizado por antena, a fim de aumentar a capacidade de uma ERB. Para que isto ocorra, é necessário que os transceptores sejam combinados, o que adiciona certa atenuação à potência do sinal transmitido à antena. A figura 5.10 ilustra o número de transceptores e bastidores por site para suportar uma configuração de alta capacidade (20 usuários/MHz/setor). O WCDMA é, visivelmente, a tecnologia mais eficiente para configurações de alta capacidade.

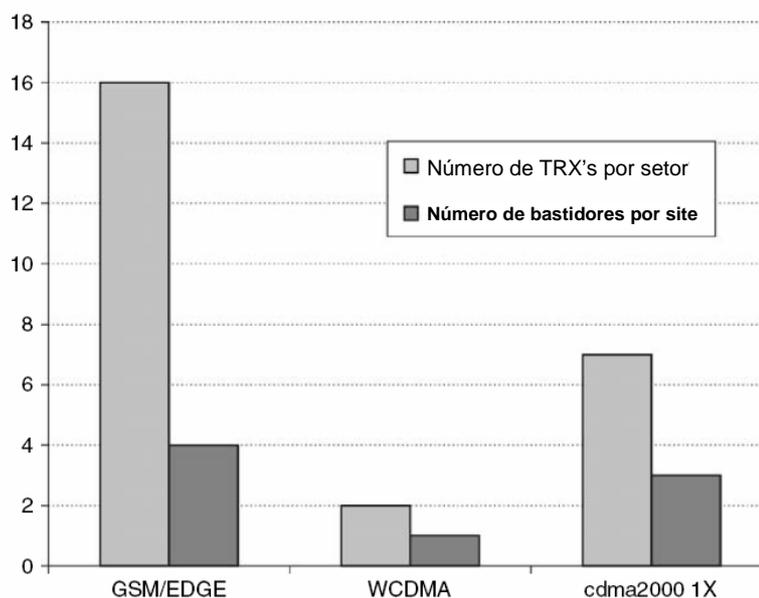


Figura 5.10 - Número de transceptores e bastidores por site para suportar uma configuração de alta capacidade (20 usuários/MHz/setor).

### 5.3. Combinadores

Um combinador é um equipamento que permite que múltiplos transmissores utilizem a mesma antena, em frequências diferentes. Há dois tipos de combinadores:

- Combinadores híbridos (C.H.) – Combinam até dois transceptores e apresentam perdas de, aproximadamente, 3 dB. São mais comumente utilizados no GSM, por permitirem saltos de frequência sintetizados.
- Combinadores de cavidade ressonante – A perda neste tipo de combinador é menor e independe do número de transceptores. No caso do GSM, permite apenas saltos de frequência em banda base, razão pela qual são mais utilizados em lugares remotos onde a demanda por cobertura se sobrepõe à demanda por capacidade.

A figura 5.11 ilustra alguns esquemas de combinação utilizando combinadores híbridos e de cavidade ressonante.

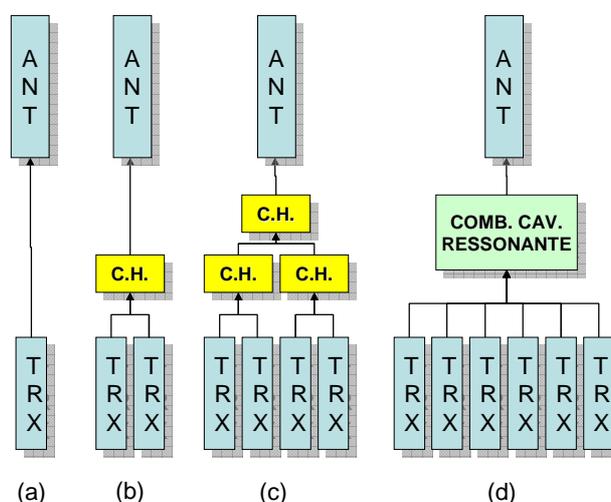


Figura 5.11 - Esquemas de combinação híbrida (a) *bypass*, (b) *2-way* e (c) *4-way*; (d) combinação por cavidade ressonante.

Os valores típicos de perda por inserção em combinadores são os seguintes:

- 3 dB (para cada par de transceptores);
- 2 a 4,8 dB (independente do número de transceptores).

## 5.4. Diplexers

A função básica dos combinadores de banda, também chamados *diplexers*, é a de agregar, num único lance de cabo, os sinais de duas redes celulares em bandas diferentes. Em uma Estação Rádio Base operando na faixa de 800 MHz, por exemplo, com a utilização de um combinador, pode-se usar o mesmo lance de cabos para combinar sinais de 1800 MHz na entrada da linha coaxial e separá-los antes de sua entrada na antena/banda correspondente, conforme ilustra a figura 5.12:

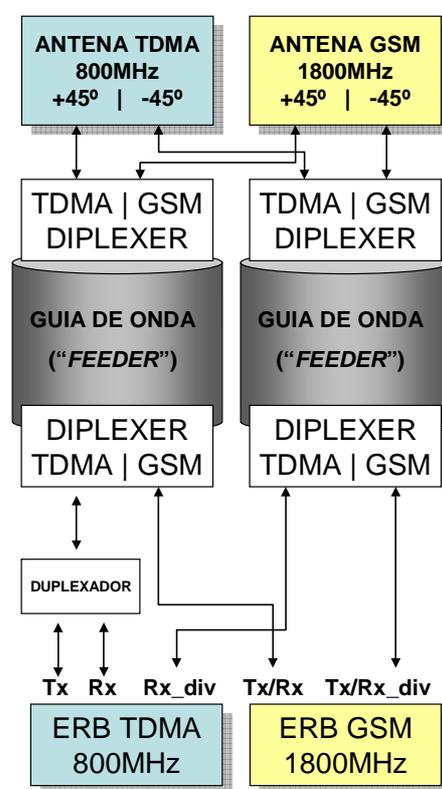


Figura 5.12 - Utilização dos combinadores de banda ou *diplexers*.

Os valores típicos de perda por inserção no *diplexer* são os seguintes:

- 0,15 dB (806 - 960 MHz)
- 0,25 dB ( 1710 - 2000 MHz)
- 0,35 dB (2000 - 2170 MHz)

## 5.5. Cabos e Conectores

Os cabos (guias de onda) mais usados em instalações de telefonia móvel são: cabo de 1/2", cabo de 7/8", cabo de 1.5/8" e cabo de 1.1/4", sendo que cada um tem as suas respectivas perdas características. A tabela 5.3 ilustra os tipos de cabos e suas aplicações típicas.

Tabela 5.3 - Tipos de cabos e aplicações típicas.

Tipo	Comprimento (m)	Aplicação Típica
1/2"	C ≤ 20	Ambientes internos e telhados
7/8"	C > 20	Microcélula interna / externa e macrocélula externa.
1 1/4"	C > 60	Macrocélula externa – cabo para casos especiais.
1 5/8"	C > 60	Macrocélula externa – cabo para casos especiais.

A tabela 5.4 descreve valores típicos de atenuação do sinal em cada tipo de cabo, de acordo com a frequência a ser utilizada.

Tabela 5.4 - Valores de atenuação típicos nos cabos.

Atenuação nos Cabos (dB/100m)						
Cabo:	Cabos Coaxiais de Baixa Atenuação			Cabos Coaxiais Super-flexíveis		
	900MHz	1800 MHz	2000 MHz	900 MHz	1800 MHz	2000 MHz
1/2"	7,5	10,3	11	11	16,5	17,5
7/8"	4	5,7	6,2	4	5,7	6,2
1 1/4"	3,2	4,7	5,1	-	-	-
1 5/8"	2,5	3,5	3,9	-	-	-

Para os conectores, os valores comumente utilizados variam de 0,1 a 1 dB de perda.

## 5.6. Duplexadores

Duplexadores são filtros com a função de combinar os sinais de transmissão e recepção em uma única antena. Estes filtros de cavidades ressonantes servem para isolar duas frequências ou duas faixas de frequência.

Os valores típicos de perda por inserção em duplexadores são:

- < 0,5 dB ( 824 - 851 MHz ) / < 0,5 dB ( 869 - 896 MHz )

- $< 0,5 \text{ dB ( 890 - 915 \text{ MHz } ) / < 0,5 \text{ dB ( 935 - 960 \text{ MHz } )}$
- $< 0,7 \text{ dB ( 1710 - 1785 \text{ MHz } ) / < 0,5 \text{ dB ( 1805 - 1880 \text{ MHz } )}$

## 5.7. Filtros

Instalando na mesma infraestrutura uma nova rede em *Overlay* com as já existentes, surgiram dificuldades geradas pela proximidade das frequências, principalmente nos grandes centros urbanos, onde, pelo grande número de equipamentos, o espectro das ondas radioelétricas fica congestionado e uma estação acaba interferindo na outra, pela proximidade das frequências utilizadas, emissão de harmônicos, intermodulações, etc. Para garantir a separação clara destas frequências, são aplicados filtros, que são, dependendo de sua função, diferenciados em:

- Filtros Passa Faixa
- Filtros Corta Faixa.

Tipicamente, os filtros provocam atenuações entre 0,5 e 0,8 dB.

## 6. Modelo teórico proposto - ambiente multiusuário

A seguir, será apresentado o desenvolvimento teórico para o cálculo da densidade de potência e do percentual de Contribuição para os Efeitos Térmicos Relevantes da Estação (% CETRE) observados em pontos próximos à ERB. Este processo está baseado nos cálculos de EIRP e do ganho efetivo em uma determinada direção, levando-se em consideração as contribuições de cada setor e suas características individuais, uma vez que o valor da densidade de potência em um ponto qualquer é dado pela equação (4.6), apresentada no capítulo 4. Visto que uma estação pode ser composta por vários setores e por vários sistemas irradiantes (antenas), cada sistema irradiante deverá ser considerado, isoladamente, um setor lógico. No caso das antenas que operam em múltiplas faixas de frequências, serão considerados tantos setores quantas forem as faixas de frequências em operação, mesmo quando se tratar de uma única antena fisicamente.

De posse dos valores da densidade de potência individuais de cada setor, é necessário atender à equação (4.12):

$$\sum_{i=1\text{MHz}}^{i=300\text{GHz}} \frac{S_i}{S_{L,i}} < 1 \Rightarrow \frac{S_{Setor1}}{S_{L,f1}} + \frac{S_{Setor2}}{S_{L,f2}} + \frac{S_{Setor3}}{S_{L,f3}} + \frac{S_{Setor4}}{S_{L,f4}} + \dots + \frac{S_{SetorN}}{S_{L,fN}} < 1 \quad (6.1)$$

Ou seja, para atender aos níveis recomendados, é necessário calcular para todos os setores o percentual de contribuição térmica para um determinado ponto de observação. A soma destes percentuais será o fator decisivo para a avaliação positiva ou negativa de um determinado conjunto de estações que compartilham a mesma infraestrutura, pela verificação se está operando dentro dos níveis recomendados.

### 6.1. Cálculo da EIRP por setor

De forma genérica, para as diferentes tecnologias, obtém-se a seguinte fórmula para o cálculo da EIRP por setor:

$$EIRP_{SETOR_{MAX}} \Big|_{dBm} = 10 \cdot \log n + P_{TRX} \Big|_{dBm} - P_{comb} \Big|_{dB} - P_{dup} \Big|_{dB} - P_{cabo} \Big|_{dB} + G_{ant} \Big|_{dBi} \quad (6.2)$$

onde:

$EIRP_{SETOR_{MAX}}$  - é a potência máxima efetivamente irradiada na direção de máxima irradiação da antena [dBm];

$n$  - é o número de transceptores por célula;

$P_{TRX}$  - é a potência de saída do transceptor [dBm];

$P_{comb}$  - é a perda de combinação [dB];

$P_{cabo}$  - é a perda nos cabos e conectores [dB];

$P_{dup}$  - é a perda no duplexador [dB];

$G_{ant}$  - é o ganho da antena [dBi].

Para que seja calculado o valor total da EIRP de cada sistema irradiante, em um ponto de observação, é necessário calcular o ganho da antena para a direção específica do ponto, ou seja, o ganho das componentes vertical e horizontal do diagrama de irradiação de cada antena na direção daquele ponto. Logo:

$$EIRP_{Ponto}|_{dBm} = EIRP_{MAX}|_{dBm} - \left[ A(\theta_H)|_{dB} + A(\varphi_V)|_{dB} \right]_{Ponto} \quad (6.3)$$

onde:

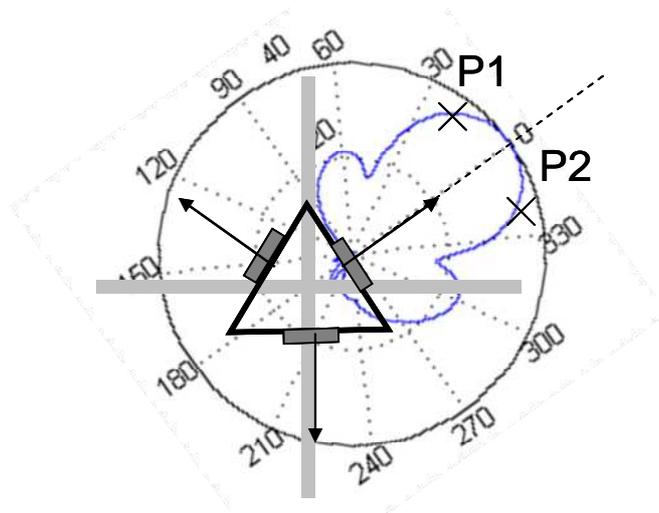
$EIRP_{MAX}$  - é o valor máximo da EIRP, ou seja, o valor da EIRP para a direção de máxima irradiação;

$A(\theta_H)$  - é a atenuação da antena para um determinado ângulo na horizontal;

$A(\varphi_V)$  - é a atenuação da antena para um determinado ângulo na vertical.

### 6.1.1. Determinação do ângulo horizontal

Para a determinação do ângulo na horizontal  $\theta_H$ , entre a direção de máxima irradiação e a direção do ponto de observação, considera-se a vista superior de uma ERB, que está mostrada na figura 6.1.



**Figura 6.1 - Vista superior de uma ERB para determinação do ângulo horizontal**

De acordo com a figura 6.1, é necessário avaliar duas situações: sabendo-se que o diagrama de irradiação das antenas é descrito para ângulos variando de  $0^\circ$  a  $359^\circ$ , caso o azimuth do ponto de observação ( $\theta_p$ ) seja maior que o azimuth da antena do setor em análise (caso P1), o ângulo a ser considerado, do diagrama horizontal da antena, é a diferença entre os dois azimutes. Caso o azimuth do ponto de observação ( $\theta_p$ ) seja menor que o azimuth da antena do setor em análise (caso P2), o ângulo a ser considerado, do diagrama horizontal da antena, é a diferença entre os dois azimutes, acrescentando-se  $360^\circ$ . Em resumo:

$$\theta_H = \begin{cases} \theta_p - Az_{ANT}; & \text{para } \theta_p > Az_{ANT} \\ \theta_p - Az_{ANT} + 360; & \text{para } \theta_p \leq Az_{ANT} \end{cases} \quad (6.4)$$

### 6.1.2. Determinação do ângulo vertical

Para o diagrama de irradiação vertical da antena, não há um ângulo fixo, como ocorre na determinação do ângulo horizontal. O ângulo a ser utilizado na vertical varia conforme o ponto se afaste da fonte emissora. Além disso, existe uma dependência com a diferença entre a altura da antena e a altura da pessoa a ser considerada.

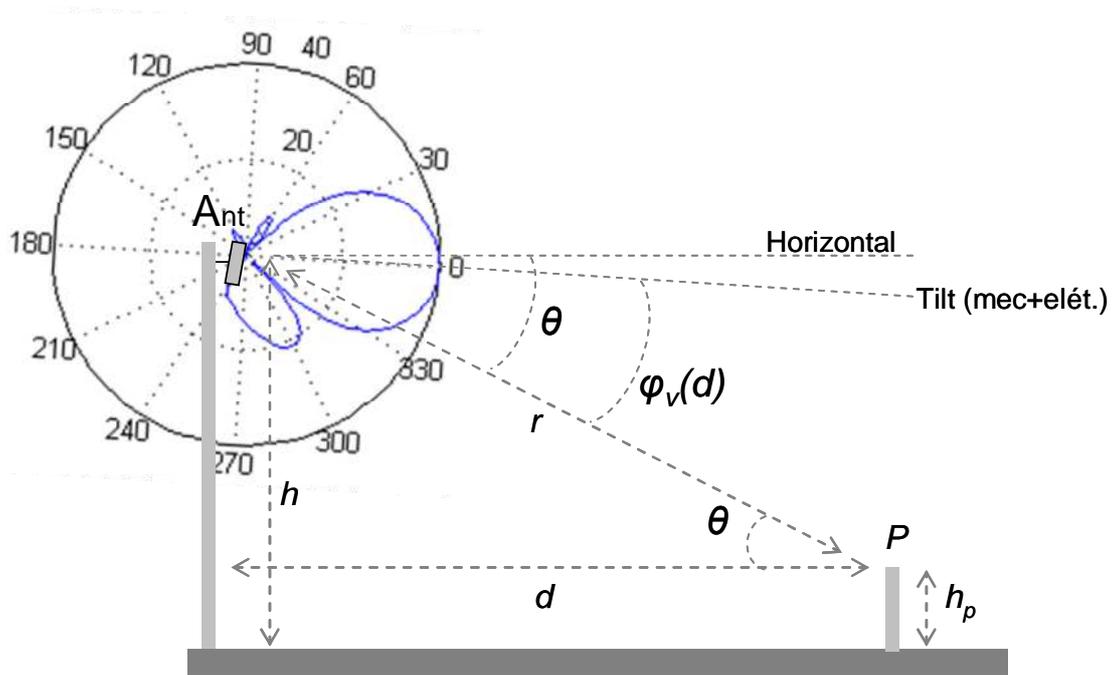


Figura 6.2 - Vista lateral de uma ERB para determinação do ângulo vertical

Sabendo-se que:

$$\theta = \arctg\left(\frac{h-h_p}{d}\right) \quad (6.5)$$

onde:

$h$  - é a altura da antena em questão;

$h_p$  - é altura de uma pessoa ou média das alturas das pessoas;

$d$  - é a distância da pessoa à base da estação.

Pode-se concluir que:

$$\varphi_v(d) = 360 - \frac{180}{\pi} \cdot \left[ \text{tg}^{-1}\left(\frac{h-h_p}{d}\right) + \theta_{TILT} \right] \quad (6.6)$$

onde:

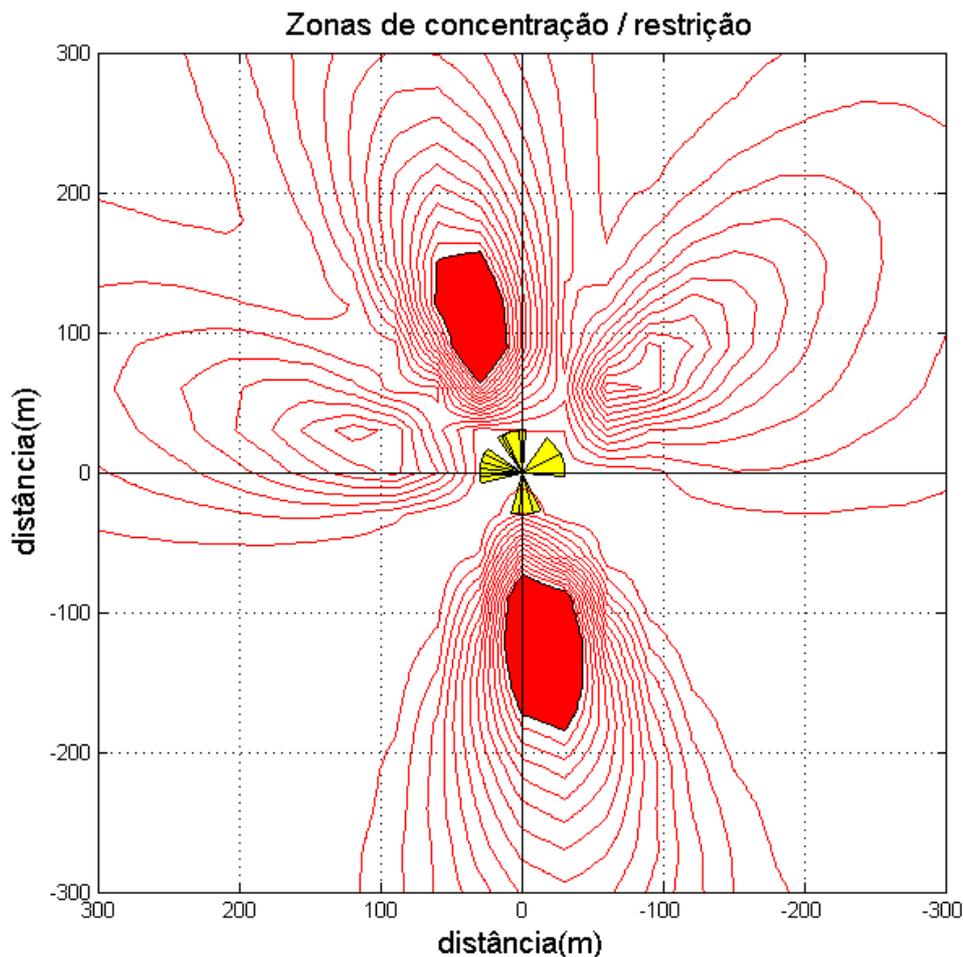
$\theta_{TILT}$  - é o ângulo de elevação, representando a soma dos *downtilt's* mecânico e o elétrico.

De posse das informações dos ângulos  $\theta_H$  e  $\varphi_V(d)$ , é possível obter diretamente, no diagrama de irradiação de cada antena, os valores de  $G(\theta_H)$  e  $G(\varphi_V)$  para serem utilizados na equação (6.3).

## 6.2. Cálculo da distância mínima segura

Baseado nas equações (4.8) e (4.10), definidas na Resolução 303/02 da ANATEL, a distância mínima segura, ou seja, a distância mínima à estação para atendimento aos níveis de referência, pode ser determinada considerando-se as antenas como irradiadores isotrópicos. Desta forma, considera-se que as antenas estariam irradiando igualmente em todas as direções, tanto no plano vertical, quanto no horizontal, com ganho máximo. Na prática, isto não ocorre. As antenas concentram a irradiação do sinal em algumas direções de interesse, em detrimento de outras. Assim, o cálculo deve levar em consideração as contribuições de todos os setores da estação em um determinado ponto de observação. É necessário que esta avaliação seja realizada, individualmente, para cada sistema irradiante, uma vez que as antenas possuem propriedades irradiantes distintas para cada direção e sentido no plano horizontal e no plano vertical. A partir desta abordagem, surge o conceito de “zonas de concentração” de RNI, ou seja, zonas (não necessariamente mais próximas à estação) onde ocorre uma maior concentração da densidade de potência como resultado da diretividade das antenas.

Na figura 6.3, onde temos um exemplo ilustrativo com valores extrapolados para fins didáticos, pode-se observar a concentração do sinal, e conseqüentemente de RNI, em áreas mais afastadas da estação. Ou seja, locais muito próximos à estação não são necessariamente os mais expostos aos efeitos da radiação.

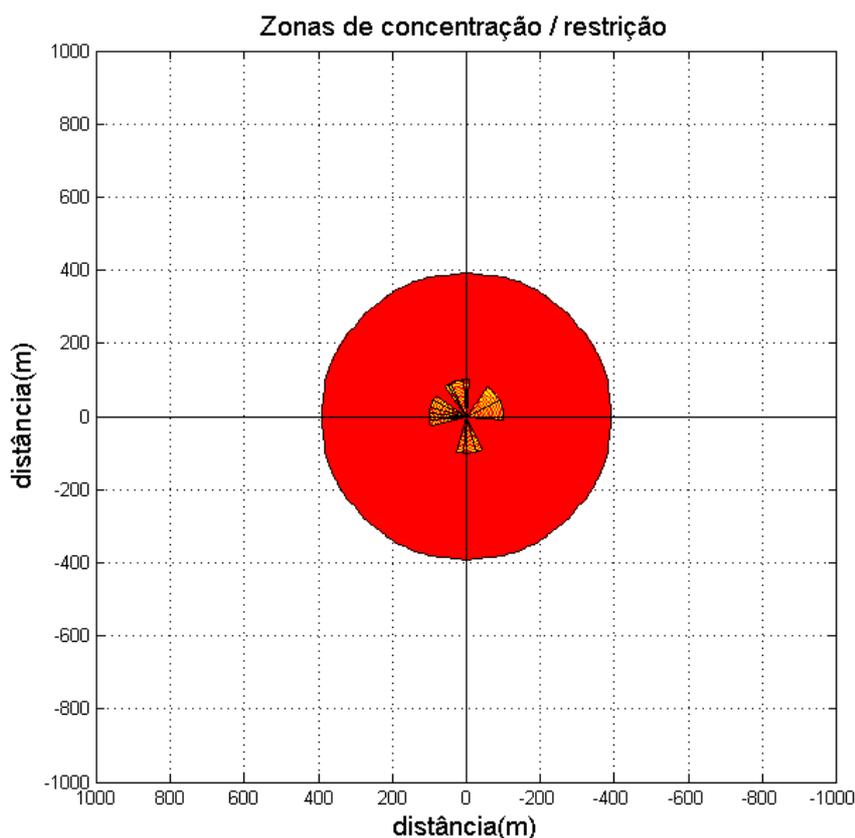


**Figura 6.3 - Conceito de “zonas de concentração”**

Este assunto foi abordado, em 2007, no estudo realizado por **Terada [12]**. Em seus estudos, relacionados às propriedades direcionais de irradiação de antenas das ERB's, onde o autor demonstra que “o máximo de intensidade de campo elétrico ocorre a diferentes distâncias da base da ERB, dependendo de outras variáveis, levando à conclusão que fixar uma distância mínima de regiões povoadas para a instalação de ERB's não é a maneira adequada para se garantir a segurança e o bem-estar da população. O reposicionamento de uma ERB para uma distância de 50 m, por exemplo, pode, na realidade, aumentar a intensidade do campo elétrico em mais de mil vezes na área que se deseja proteger.” O estudo ressalta, ainda, que “O critério científico correto e seguro é o de se limitar o valor da intensidade do campo elétrico máximo resultante de todas as antenas em operação na faixa de frequências considerada.”

O conceito de “distância mínima segura” geralmente é mais conservador do que o de zonas de concentração. Segundo este conceito, os cálculos devem considerar antenas onidirecionais arbitradas, com ganho máximo igual ao da antena diretiva.

Assim, uma vez respeitada a distância mínima segura neste modelo, pode-se dizer que as zonas de concentração de RNI estão sendo respeitadas. Tal característica pode ser observada quando se compara as figuras 6.3 e 6.4. Todas as zonas de concentração de RNI da figura 6.3 foram cobertas pela área da figura 6.4, que representa o modelo isotrópico.



**Figura 6.4 - Conceito de “distância mínima segura”.**

Assim sendo, um cálculo bastante conservador pode ser feito utilizando-se o conceito de múltiplas fontes emissoras para estimativa da distância mínima segura, para atender aos níveis de referência para exposição definidos para a população em geral (Resolução 303/02 da ANATEL).

Conforme já visto, uma estação pode ser composta por vários setores e por vários sistemas irradiantes. Para fins de cálculo da EIRP definida na equação (4.6), cada sistema irradiante deverá ser considerado, isoladamente, um setor lógico. Assim, nas equações a seguir,  $EIRP_1, EIRP_2, \dots, EIRP_N$  serão os valores individuais de EIRP de cada sistema irradiante que compõe uma estação para um determinado ponto em análise. Novamente, no caso das antenas que operam em múltiplas faixas de frequências, serão

considerados tantos sistemas irradiantes quantas forem as faixas de frequências em operação, mesmo quando se tratar de uma única antena fisicamente.

Para facilitar os cálculos, será considerado que os sistemas irradiantes estão concentrados em um mesmo ponto. Assim,  $R_1=R_2=R_N=\dots=R$ , que é a distância das antenas ao ponto de observação.

Considerando que o nível de referência para a densidade de potência na faixa de 400 MHz a 2000 MHz, para a população em geral, é definido pela expressão

$S_{equivalente} = \frac{f}{200}$ , tem-se:

$$S_{equivalente} = \frac{2,56}{4\pi R^2} \cdot (EIRP_1 + EIRP_2 + \dots + EIRP_N) = \frac{f}{200} \quad (6.7)$$

Como  $R = R_{min}$ , tem-se:

$$R_{min}^2 = \frac{200 \cdot 2,56}{4\pi} \cdot \frac{(EIRP_1 + EIRP_2 + \dots + EIRP_N)}{f} \quad (6.8)$$

$$R_{min} = \sqrt{\frac{200 \cdot 2,56}{4\pi} \cdot \left( \frac{EIRP_1}{f_1} + \frac{EIRP_2}{f_2} + \dots + \frac{EIRP_N}{f_N} \right)} \quad (6.9)$$

E assim chega-se à expressão:

$$R_{min} = 6,3831 \cdot \sqrt{\left( \frac{EIRP_1}{f_1} + \frac{EIRP_2}{f_2} + \dots + \frac{EIRP_N}{f_N} \right)} \quad (6.10)$$

Do mesmo modo, para a exposição ocupacional, com  $S_{equivalente} = \frac{f}{40}$ , tem-se:

$$R_{min} = 2,8546 \cdot \sqrt{\left( \frac{EIRP_1}{f_1} + \frac{EIRP_2}{f_2} + \dots + \frac{EIRP_N}{f_N} \right)} \quad (6.11)$$

### 6.3. Verificação do atendimento aos níveis de referência para exposição

De acordo com a Resolução 303/02 da ANATEL, em ambiente celular multiusuário, ou seja, onde haja compartilhamento de infraestrutura entre operadoras, o requisito para atendimento aos níveis de referência para exposição é dado pela equação (4.12), aqui repetida:

$$\sum_{i=1MHz}^{i=300GHz} \frac{S_i}{S_{L,i}} < 1 \quad (4.12)$$

onde:

$S_i$  - é a densidade de potência na frequência  $i$ ;

$S_{L,i}$  - é o nível de referência para a densidade de potência, na frequência  $i$ .

Assim, é possível definir o % CETRE (Percentual de Contribuição para os Efeitos Térmicos da Estação) através da equação:

$$\% \text{ CETRE} = \sum_{i=1MHz}^{i=300GHz} \frac{S_i}{S_{L,i}} \times 100\% < 100\% \quad (6.12)$$

Desenvolvendo a equação, tem-se:

$$\sum_{i=1MHz}^{i=300GHz} \frac{S_i}{S_{L,i}} = \frac{S_{i1}}{S_{L,i1}} + \frac{S_{i2}}{S_{L,i2}} + \dots + \frac{S_{iN}}{S_{L,iN}} < 1 \quad (6.13)$$

Levando-se (6.7) em (6.13), tem-se:

$$\sum_{i=1MHz}^{i=300GHz} \frac{S_i}{S_{L,i}} = \frac{2,56}{4\pi} \cdot \left( \frac{EIRP_1}{R_1^2} \frac{1}{f_1/200} + \frac{EIRP_2}{R_2^2} \frac{1}{f_2/200} + \dots + \frac{EIRP_N}{R_N^2} \frac{1}{f_N/200} \right) < 1 \quad (6.14)$$

$$\sum_{i=1MHz}^{i=300GHz} \frac{S_i}{S_{L,i}} = \frac{2,56 \cdot 200}{4\pi} \cdot \left( \frac{EIRP_1}{R_1^2 f_1} + \frac{EIRP_2}{R_2^2 f_2} + \dots + \frac{EIRP_N}{R_N^2 f_N} \right) < 1 \quad (6.15)$$

para a exposição da população em geral e:

$$\sum_{i=1\text{MHz}}^{i=300\text{GHz}} \frac{S_i}{S_{L,i}} = \frac{2,56 \cdot 40}{4\pi} \cdot \left( \frac{EIRP_1}{R_1^2 f_1} + \frac{EIRP_2}{R_2^2 f_2} + \dots + \frac{EIRP_N}{R_N^2 f_N} \right) < 1 \quad (6.16)$$

para a exposição ocupacional.

Estes valores devem ser analisados considerando todos os setores da Estação Rádio Base para que se possa verificar o atendimento aos níveis de referência para a estação como um todo. Esta mesma análise pode ser feita considerando o campo elétrico ou o magnético, uma vez que a expressão  $S = \frac{E^2}{377} = H^2 \cdot 377$  cria uma relação entre estas grandezas.

## 7. Modelo computacional proposto

O modelo consiste de 9 módulos interdependentes para a realização dos cálculos dos níveis de radiação e distância mínima considerados seguros para uma Estação Rádio Base, a fim de atender, de forma mais completa, às disposições da regulamentação da ANATEL. Consiste, basicamente, de uma rotina central que aciona os módulos desejados, no decorrer de sua execução.

O diagrama representado pela figura 7.1 ilustra, de uma forma geral, os módulos do programa desenvolvido e suas funcionalidades básicas:

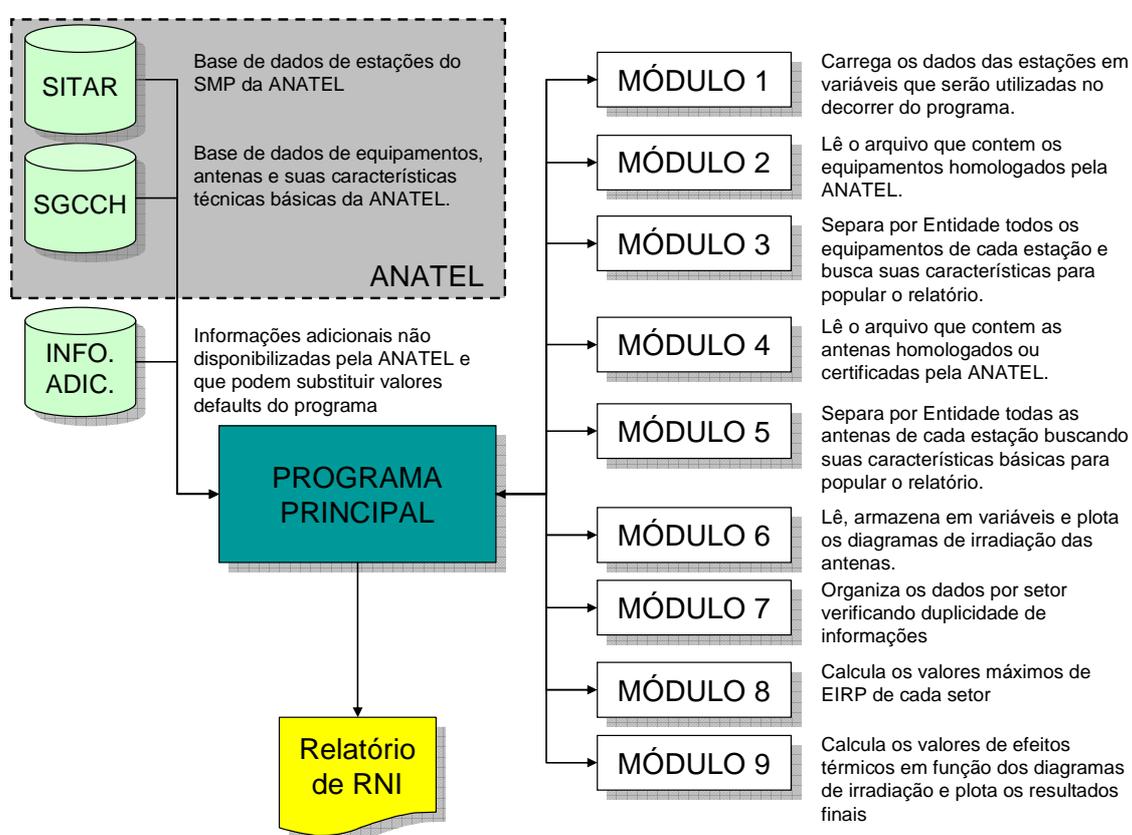


Figura 7.1 - Diagrama geral do programa computacional desenvolvido para elaboração de relatórios de RNI.

### 7.1. Entradas de dados

O modelo computacional proposto baseia-se em duas entradas básicas de dados: os provenientes da página da ANATEL na internet e os dados extras, editados manualmente pelo usuário. Caso não sejam fornecidos dados pelo usuário, o programa

irá considerar valores *default* para algumas informações necessárias aos cálculos e que não são informados pela ANATEL, em sua página na internet.

### **7.1.1. ANATEL – Sistemas Interativos**

A ANATEL disponibiliza uma série de dados referentes aos inúmeros serviços de telecomunicações por ela administrados no Brasil. A fim de disponibilizá-los para o público em geral, foram criados os Sistemas Interativos, através dos quais o usuário terá acesso a estes dados. Dentro do modelo computacional proposto, dois sistemas interativos são de maior interesse: o SITAR e o SGCH, os quais serão sumariamente descritos a seguir.

#### **7.1.1.1. SITAR – Sistema de Informações Técnicas para Administração das Radiocomunicações**

O SITAR permite acesso à base de dados de todas as estações do Serviço Móvel Pessoal (SMP), para consulta, sem a necessidade de autenticação de usuário. Os dados são abertos à população e trata-se de uma base completa e bastante confiável, uma vez que, para operar, todas as estações precisam estar cadastradas e com seus dados técnicos atualizados neste sistema, que é também a referência para a fiscalização da ANATEL. Todos os dados do SITAR necessários são extraídos do subsistema STEL - Sistema de Serviços de Telecomunicações. Para a composição dos dados utilizados no programa computacional proposto neste trabalho, as principais informações extraídas do SITAR são:

- Dados da estação
  - Endereço
  - Município
  - UF
- Localização geográfica
  - Latitude
  - Longitude
  - Altitude
- Empresas que operam na estação (entidades)
- Equipamentos transceptores

- Código de Homologação
- Frequência de operação
- Potência máxima de operação
- Designação de emissão
- Antenas
  - Código de Homologação
  - Frequência de operação
  - Ganho
  - Relação frente-costas

#### **7.1.1.2. SGCH – Sistema de Gestão de Certificação e Homologação**

É o sistema que possui as informações dos equipamentos e antenas. O SITAR informa (entre outros dados) apenas o código de homologação de um determinado equipamento ou antena. Para adquirir informações completas acerca de dados técnicos, nome do modelo, fabricante, tecnologia, faixa de operação e outras informações, é necessário fornecer este código de homologação para que o SGCH possa buscar as informações desejadas. Para a composição dos dados utilizados no modelo computacional proposto neste trabalho, as principais informações extraídas do SGCH são:

- Equipamentos transceptores
  - Modelo
  - Fornecedor
- Antenas
  - Modelo
  - Fornecedor

#### **7.1.2. Informações adicionais**

Algumas informações não estão disponíveis ao público, por não existirem na base de dados da ANATEL, como por exemplo:

- Perdas ou atenuações em geral, em:
  - Guias de onda;

- Conectores;
- Combinadores;
- Duplexadores;
- Filtros.

Em outros casos, apesar de existirem na base de dados da ANATEL, as informações apenas não estão disponíveis ao público, como por exemplo:

- Número de antenas do setor
- Número de equipamentos transceptores do setor

Para estes casos, as informações são fornecidas manualmente pelo usuário no decorrer da execução do programa ou, caso as mesmas não estejam disponíveis, serão adotadas considerações de “pior caso”.

## 7.2. Programa Principal

É o módulo responsável pelo controle de execução e acionamento dos módulos em sequência. Basicamente, segue a seguinte estrutura:

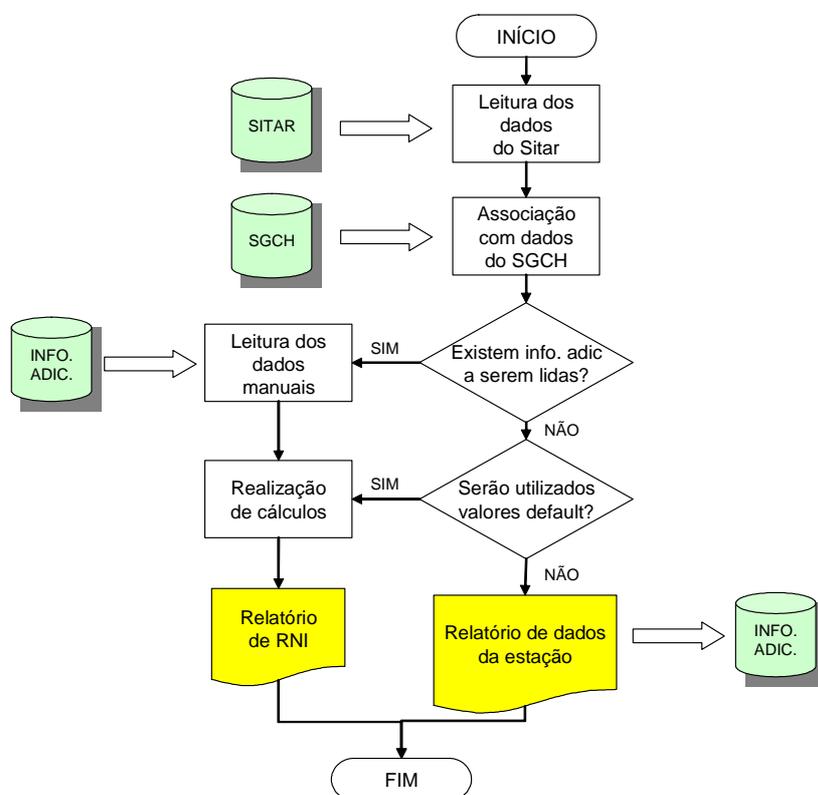


Figura 7.2 - Fluxograma básico do programa principal.

Inicialmente, o programa principal gera o “Relatório de dados da estação”, que aponta as informações adicionais necessárias que deverão ser fornecidas manualmente pelo usuário.

Uma vez que nem todas as informações das ERB’s estão disponíveis ao público (como tipo de guia de onda ou combinador utilizado) e caso estas informações não estejam ao alcance, é possível adotar algumas considerações para a análise de “pior caso”:

- Atenuação nos guias de onda – Por se tratar de uma análise de “pior caso”, não será considerada a atenuação nos guias, a menos que o valor seja fornecido manualmente como entrada no modelo. Os casos de unidades de rádio remotas encontradas no UMTS ilustram este tipo de ocorrência, onde não há guia de onda entre a saída do transceptor e a antena. A unidade de rádio remota é um módulo único que comporta tanto o transceptor quanto a antena.
- Número máximo de Transceptores por setor – A quantidade pode variar de acordo com o modelo de cada estação e com a tecnologia empregada. Existem estações com as mais variadas capacidades. Por se tratar de uma análise de “pior caso” e se estes valores não forem fornecidos manualmente, serão considerados os valores apresentados na tabela 7.1:

**Tabela 7.1 - Valores *default* para número de transceptores por setor**

Tecnologia	Nº Máximo de TRX
AMPS / TDMA	21
GSM	4
CDMA (2G)	2
WCDMA (UMTS)	2

- Número de antenas por setor – Um setor pode possuir mais de uma antena, para fins de aumento de capacidade sem perda de cobertura. Isto acarretaria um número maior de possíveis equipamentos transceptores, ou seja, o número máximo de transceptores descrito na tabela 7,1 varia com a quantidade de antenas por setor. No GSM, por exemplo, caso se tenha duas antenas em um mesmo setor, pode-se ter até  $2 \times 4 = 8$

transceptores. Entretanto, como valor mais usual, será considerada apenas uma antena por setor, a menos que este valor seja alterado manualmente, pelo usuário do programa.

De posse de todas as informações fornecidas manualmente pelo usuário, no decorrer da execução do programa, ou, caso as mesmas não estejam disponíveis, obtidas das considerações de “pior caso”, o programa realiza os cálculos necessários e emite, como produto, o relatório técnico final.

### 7.3. Módulos Auxiliares

Os módulos auxiliares são os responsáveis pela execução das tarefas no decorrer do programa principal e dependem uns dos outros, apesar de não existir uma interface direta entre eles, onde um módulo aciona o outro. A interface única é o programa principal. O principal objetivo da divisão em módulos é a divisão das tarefas. Assim, um módulo pode ser utilizado mais de uma vez para a execução de uma determinada tarefa em *loop*.

#### 7.3.1. Módulo 1

É o primeiro módulo do modelo computacional e tem como principais funções:

- Limpeza inicial de resíduos de variáveis;
- Leitura do arquivo com os dados do SITAR;
- Criação da tabela de endereço e localização geográfica da estação;
- Criação da tabela de associação entre estações e entidades.

A ANATEL disponibiliza os dados das estações através do SITAR, conforme foi visto no item 7.1.1. O arquivo possui os campos separados pelo caractere “|” (*pipe*) e contém os campos listados na tabela 7.2.

**Tabela 7.2 - Campos do arquivo exportado pelo SITAR**

Campo	Descrição
<i>TransmissaoInicial</i>	Frequência de Transmissão (Downlink) da estação - refere-se à subfaixa de radiofrequência adquirida pela operadora (de acordo com a Resolução 454/2006).

<i>UnidadeFrequenciaTX</i>	Unidade de Frequência de Transmissão (Downlink).
<i>RecepcaoInicial</i>	Frequência de Recepção (Uplink) da estação - refere-se à subfaixa de radiofrequência adquirida pela operadora (de acordo com a Resolução 454/2006).
<i>UnidadeFrequenciaRX</i>	Unidade de Frequência de Recepção (Downlink).
<i>Situacao</i>	Situação da estação: Consignada, Alterada, excluída, etc.
<i>CaraterSecundario</i>	Se a estação opera em caráter secundário, ou seja, se tem ou não prioridade na faixa de frequências, não podendo ser interferida.
<i>IndConfidencial</i>	não utilizada para o SMP.
<i>TipoClasseEstacao</i>	SIGLA CLASSE DA ESTAÇÃO.
<i>Horarios</i>	Horário de funcionamento da estação.
<i>DesignacaoEmissao</i>	Formato: <b>AAAABBBCC</b> , onde <b>AAAA</b> =Largura de banda, ex.: 200K <b>BBB</b> =Tipo de modulação, natureza do sinal modulante e tipo de informação a ser transmitida <b>CC</b> =Características Adicionais
<i>PotenciaOperacao</i>	Potência de operação do equipamento transceptor
<i>UnidadePotencia</i>	Unidade de potência do campo PotenciaOperacao
<i>Equipamento</i>	Código de homologação / Certificação do equipamento transceptor (padrão SGCH)
<i>TipoAntena</i>	Tipo de antena (Parabólica / Painel de dipolos / onidirecional / etc) conforme certificado de homologação.
<i>EquipamentoAntena</i>	Código de homologação / Certificação da antena (padrão SGCH).
<i>Ganho</i>	Ganho máximo da antena.
<i>FrenteCosta</i>	Relação frente/Costas da antena.
<i>AnguloMeiaPotencia</i>	Ângulo de meia potência da antena.
<i>AnguloElevacao</i>	Ângulo de elevação da antena (Tilt elétrico + Tilt mecânico).
<i>Azimute</i>	Azimute em relação ao norte verdadeiro.
<i>VariacaoAzimutal</i>	Variação azimutal.
<i>TipoPolarizacao</i>	Tipo de polarização (H-horizontal / V-vertical / X-cruzada).
<i>Altura</i>	Atura da antena em relação ao solo.
<i>Raio</i>	Raio de cobertura da estação.
<i>Latitude</i>	Latitude datum WGS-84.
<i>Longitude</i>	Longitude datum WGS-84.
<i>Altitude</i>	Altitude da estação em relação ao nível do mar.
<i>Estacao</i>	Número da estação no SITAR.
<i>Servico</i>	Tipo de serviço (SMP/Radioenlace/etc).
<i>Indicativo</i>	Indicativo, por exemplo, para radioamador, móvel aeronáutico e

	outros.
<i>MedPotenciaMaxima_TR</i>	não utilizada para o SMP.
<i>MedLarguraBanda</i>	não utilizada para o SMP.
<i>DiametroSGCH</i>	não utilizada para o SMP.
<i>Diagrama</i>	não utilizada para o SMP.
<i>SiglaEstacao_TRS</i>	não utilizada para o SMP.
<i>LongitudeOrbitalSubida</i>	não utilizada para o SMP.
<i>NomeFeixeSubida</i>	não utilizada para o SMP.
<i>SiglaEstacaoDescida</i>	não utilizada para o SMP.
<i>LongitudeOrbitalDescida</i>	não utilizada para o SMP.
<i>NomeFeixeDescida</i>	não utilizada para o SMP.
<i>TipoEstacao</i>	Própria / Compartilhada / Terceiros, etc.
<i>NomeEntidade</i>	Razão social da empresa.
<i>NumEntidade</i>	Número da empresa no SITAR.
<i>NomeMunicipio</i>	Município.
<i>CodMunicipio</i>	Código IBGE.
<i>Endereco</i>	Endereço.
<i>UF</i>	UF.
<i>TipoClasseCorrespondencia</i>	CP – Estação Coletora Principal CM – Estação Coletora Intermediária CI – Estação Coletada Interligada CL – Estação Coletada RT – Estações de Rota
<i>Rede</i>	Usado para radioenlaces.
<i>Distancia</i>	Distância à coordenada informada na pesquisa (recuperação de frequência - tela 210 do SITAR).

### 7.3.2. Módulo 2

O módulo 2 tem como principais funções:

- Leitura do arquivo que contém os equipamentos homologados pela ANATEL para armazenamento na memória. Este arquivo deve ser retirado do sistema SGCH, o qual possui os campos listados na tabela 7.3:

Tabela 7.3 - Campos dos equipamentos transeptores no SGCH.

<b>Campo</b>	<b>Descrição</b>
<i>Nº Homologação</i>	Número do certificado de homologação do equipamento na ANATEL.
<i>Número Uso Sitar</i>	Número próprio da ANATEL e que identifica o equipamento individualmente na base de dados, uma vez que mais de um equipamento pode pertencer a um mesmo certificado de homologação.
<i>Modelo do Produto</i>	Nome do modelo
<i>Arquivo</i>	Arquivo fornecido pelo fabricante com fotos, manuais, diagramas de irradiação, etc.
<i>Fabricante</i>	Fornecedor do produto.
<i>Tipo do Produto</i>	Indica o tipo / finalidade do produto.
<i>Validade</i>	Data de validade do certificado de homologação.

### 7.3.3. Módulo 3

O módulo 3 tem como principais funções:

- Separação por entidade de todos os equipamentos da estação para popular o relatório;
- Geração da tabela de equipamentos, que contém os equipamentos de cada entidade;
- Utilização das informações de homologação do SGCH previamente carregadas na memória pelo módulo 2 para enriquecimento do relatório;
- Determinação das bandas de frequência de operação (800/900/1800/2100).
- Determinação da tecnologia utilizada, baseado na largura de banda da portadora informada no campo “DesignacaoEmissao” do arquivo com os dados do SITAR. Uma vez estabelecida a tecnologia, serão propostos os valores *default* para o número de transeptores por setor da ERB com base na tabela 7.1.

A tabela 7.4 apresenta as tecnologias mais comuns, com suas respectivas larguras de banda.

Tabela 7.4 - Tecnologias e larguras de banda da portadora utilizada

Largura de Banda	Tecnologia
1M23 (1,23 MHz)	CDMA
1M25 (1,25 MHz)	
200K (200 kHz)	GSM
40K0 (40 kHz)	AMPS/TDMA
30K0 (30 kHz)	
5M00 (5 MHz)	UMTS

### 7.3.4. Módulo 4

O módulo 4 tem como principais funções:

- Leitura do arquivo que contém as antenas homologadas ou certificadas pela ANATEL, para armazenamento na memória. Este arquivo deve ser retirado do sistema SGCH, o qual possui os seguintes campos:

Tabela 7.5 - Campos das antenas no SGCH.

Campo	Descrição
<i>Nº Homologação</i>	Número do certificado de homologação da antena na ANATEL.
<i>Número Uso Sitar</i>	Número próprio da ANATEL que identifica a antena individualmente na base de dados, uma vez que mais de uma antena pode pertencer a um mesmo certificado de homologação.
<i>Modelo do Produto</i>	Nome do modelo.
<i>Arquivo</i>	Arquivo fornecido pelo fabricante com fotos, manuais, diagramas de irradiação, etc.
<i>Fabricante</i>	Fornecedor da antena.
<i>Tipo do Produto</i>	Indica o tipo / finalidade do produto (antena direcional / omnidirecional).
<i>Validade</i>	Data de validade do certificado de homologação.

### 7.3.5. Módulo 5

O módulo 5 tem como principais funções:

- Separação por entidade de todas as antenas de cada estação para popular o relatório;

- Criação da tabela de antenas, que contém as antenas de cada entidade;
- Utilização das informações de homologação do SGCH previamente carregadas na memória pelo módulo 4 para enriquecimento do relatório.

### **7.3.6. Módulo 6**

O módulo 6 tem como principais funções:

- Solicitar ao usuário que informe a localização dos arquivos contendo os diagramas de irradiação de cada antena da estação;
- Plotar os diagramas, utilizando coordenadas polares;
- Armazenar em variáveis os valores dos diagramas de irradiação das antenas, para utilização nos cálculos posteriores.

### **7.3.7. Módulo 7**

O módulo 7 tem como principais funções:

- Criação da tabela com os setores, certificando-se da não ocorrência de repetições – A estrutura da base de dados da ANATEL foi elaborada utilizando a repetição de todos os campos, para o caso de diferença em apenas um dos campos. Para a banda A, por exemplo, há uma faixa de 869 a 880 MHz e outra de 890 a 891,5 MHz. A estrutura da base de dados da ANATEL repete todos os dados da faixa 869 a 880 MHz para a faixa de 890 a 891,5 MHz, ou seja, existe repetição de registros na base de dados e esta repetição deve ser tratada pelo programa, pois os dados pertencem à mesma banda (banda A, no caso).
- Criar a associação entre os equipamentos, antenas e demais características de um setor;

### **7.3.8. Módulo 8**

O módulo 8 tem como principais funções:

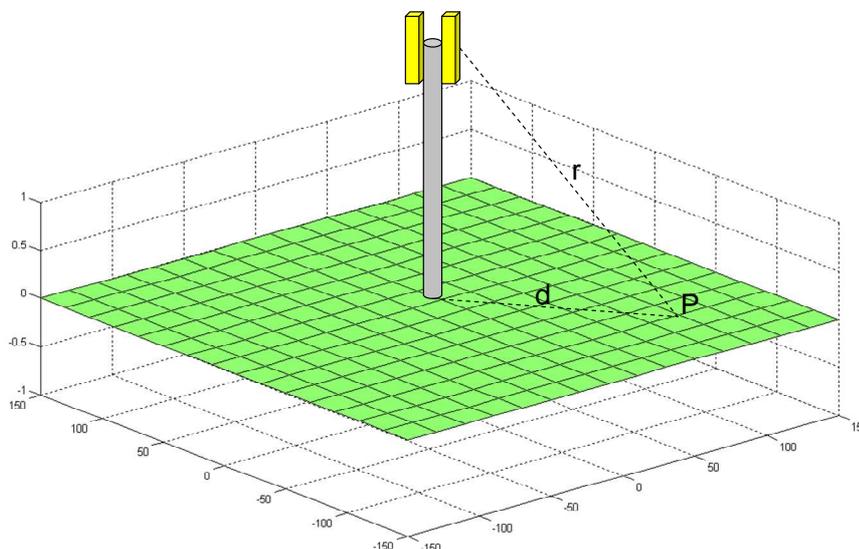
- Realizar os cálculos dos valores máximos de EIRP dos setores, por meio da equação (6.2).

- Efetuar conversões dBm  $\leftrightarrow$  W

### 7.3.9. Módulo 9

O módulo 9 tem como principais funções:

- Criação do *grid* de pontos, conforme mostra a figura 7.3, em coordenadas polares, onde  $[X,Y]_{\text{cartesiano}} \Rightarrow [Az,d]_{\text{polar}}$ . Os valores de densidade de potência de onda plana equivalente serão calculados para cada par  $[Az,d]$ .



**Figura 7.3 - Plano contendo o *grid* de pontos para o cálculo da densidade de potência.**

- Realizar o cálculo da Atenuação Horizontal (AH) a ser considerada em cada setor, com base na equação (6.4) e da atenuação Vertical (AV) a ser considerada em cada setor, sendo que a atenuação AV é calculada em função da distância “d” do ponto  $[Az,d]$  à origem  $[0,0]$ .
- Cálculo da EIRP específica proveniente de cada Setor para todos os pontos do *grid*, com base na equação (6.3).
- Cálculo da densidade de potência de cada setor, para todos os pontos do *grid*, com base na equação (4.6) e considerando  $r^2 = (h - h_p)^2 + d^2$ .

- Cálculo da Contribuição para os Efeitos Térmicos Relevantes da Estação (CETRE) de cada setor, para todos os pontos do *grid*, para atendimento à equação (6.1).
- Plotar os gráficos com:
  - Percentuais totais de Contribuição dos Efeitos Térmicos Relevantes das Estações (% CETRE);
  - “Zonas de concentração” ou “distância mínima segura”;
  - Queda da contribuição térmica com a distância na direção de máxima irradiação.

#### 7.4. Relatório Técnico

A Resolução 303/02 [17] define que *“a avaliação da exposição, com vistas a demonstrar o atendimento aos limites estabelecidos no regulamento, pode ser efetuada por meio de análises teóricas, baseadas nas características da estação transmissora de radiocomunicação analisada, ou por meio de medições diretas dos CEMRF, com a estação em funcionamento”*. Tal resolução exige, adicionalmente, *“indicação clara e conclusiva de que o funcionamento da estação, nas condições de sua avaliação, atende ao estabelecido no regulamento”* e que *“em locais onde é permitido o acesso de pessoas, quando os valores de CEMRF obtidos por meio de cálculos teóricos forem iguais ou superiores a 2/3 (dois terços) dos limites de exposição estabelecidos para os campos elétricos ou magnéticos, será obrigatória a realização de medições para comprovação do atendimento”*.

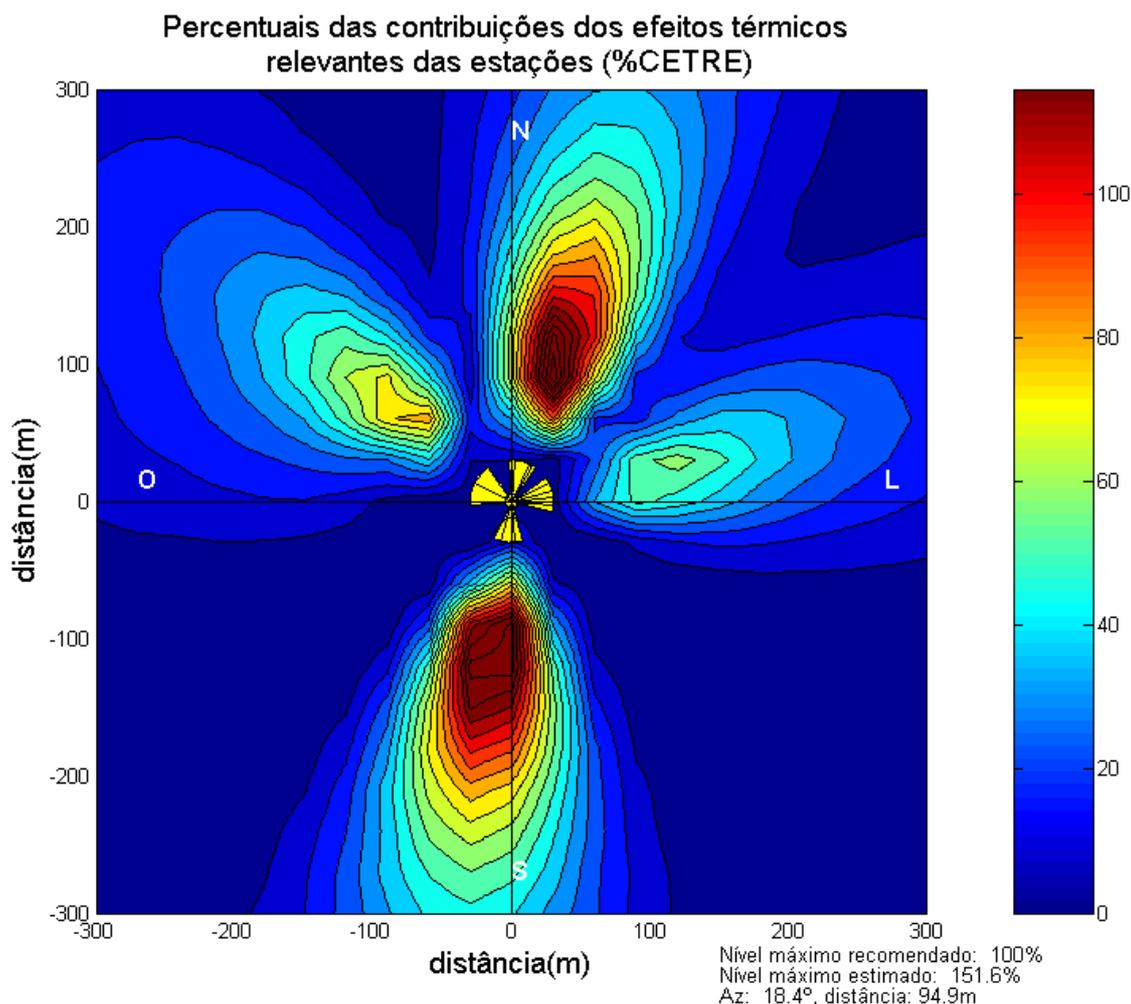
Após todo o processamento dos dados e a realização dos cálculos, tem-se para cada ponto do *grid* os valores de:

- $EIRP_{SetorN}$  – EIRP gerada por cada um dos N setores, calculada no ponto[X,Y].
- $EIRP_{TOTAL}$  – Somatório dos valores de EIRP de todos os setores, calculada no ponto [X,Y].
- $S_{SetorN}$  – Densidade de potência de onda plana equivalente, gerada por cada um dos N setores, calculado no ponto[X,Y].

- $S_{TOTAL}$  – Somatório dos valores de densidade de potência de onda plana equivalente de todos os setores, calculada no ponto  $[X,Y]$ .
- $CETRE_{SetorN}$  – Contribuição para os Efeitos Térmicos Relevantes das Estações, gerada por cada um dos N setores, calculada no ponto  $[X,Y]$ .
- $CETRE_{TOTAL}$  – Somatório dos valores de Contribuição para os Efeitos Térmicos Relevantes das Estações de todos os setores calculada no ponto  $[X,Y]$ .

De posse destas informações, vários tipos de gráficos e análises podem ser realizados para fins do relatório técnico. A seguir, serão apresentados, alguns resultados, a título de exemplo didático, para o caso de uma estação cujos níveis viessem a extrapolar os recomendados. Para tal visualização, foi adotada uma relação extremamente rigorosa de  $f/22.000$  para a densidade de onda plana equivalente (a Resolução 303 da ANATEL adota a relação de  $f/200$ ).

A figura 7.4 mostra a distribuição espacial dos percentuais das Contribuições dos Efeitos Térmicos Relevantes das ERB's do local. No centro da figura (nas coordenadas  $[0,0]$ ), estão representados, na cor amarela, os setores da estação, cada qual apontando na direção do seu azimute em relação ao norte geográfico.

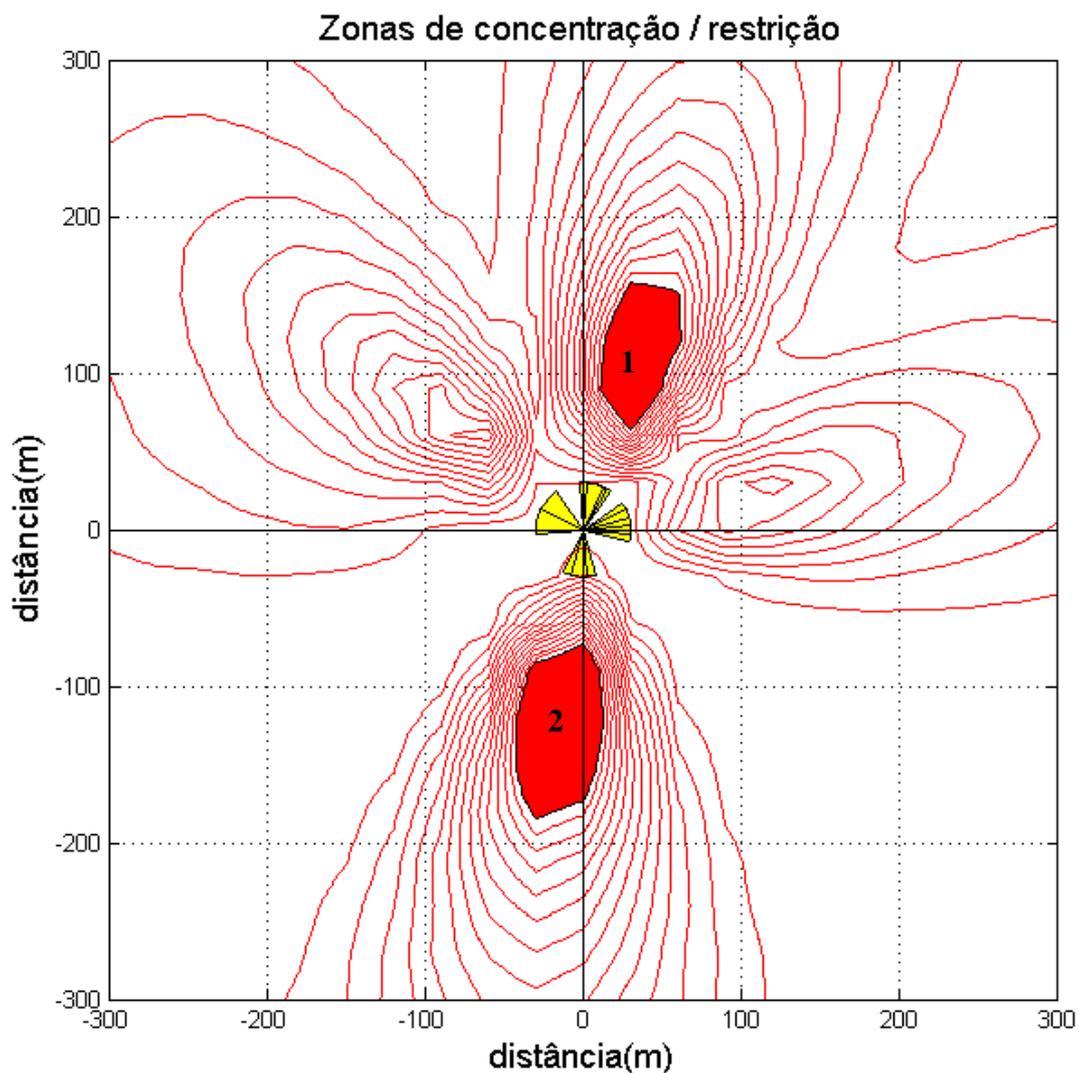


**Figura 7.4 - Percentuais das contribuições dos efeitos térmicos relevantes das estações.**

Na figura 7.4, as linhas representam a variação equipercetual do % CETRE em 20 níveis, ou seja, a cada transição de um nível para o outro há um acréscimo de 5% na CETRE em relação ao valor máximo observado. É possível observar que a área exatamente abaixo da ERB não é necessariamente a mais afetada pela radiação não ionizante. Os picos ocorrem a uma determinada distância da estação, em função da diretividade das antenas, com base em seus diagramas de irradiação. A partir da distância onde ocorre o pico, o efeito da atenuação no espaço livre reduz exponencialmente os níveis por toda a área de cobertura da estação.

Os valores calculados mostram, ainda, que o valor máximo de RNI estimado para esta estação equivaleria a 151,6 % do nível de referência recomendado e ocorre no azimute 18,4° e a uma distância de 94,9 metros da base da ERB, conforme apresentado no rodapé direito da figura 7.4..

A figura 7.5 ilustra o conceito de zonas de concentração / restrição, onde se observa o aparecimento de duas áreas preenchidas, que apontam as regiões onde houve extrapolção dos níveis de referência recomendados. Apesar da ocorrência de um pico de RNI no azimute  $18,4^\circ$  e a uma distância de 94,9 metros da Estação Rádio Base (área 1), existe ainda outra área comprometida (área 2) a uma distância que varia de 90 a 150 metros aproximadamente no azimute  $190^\circ$ .

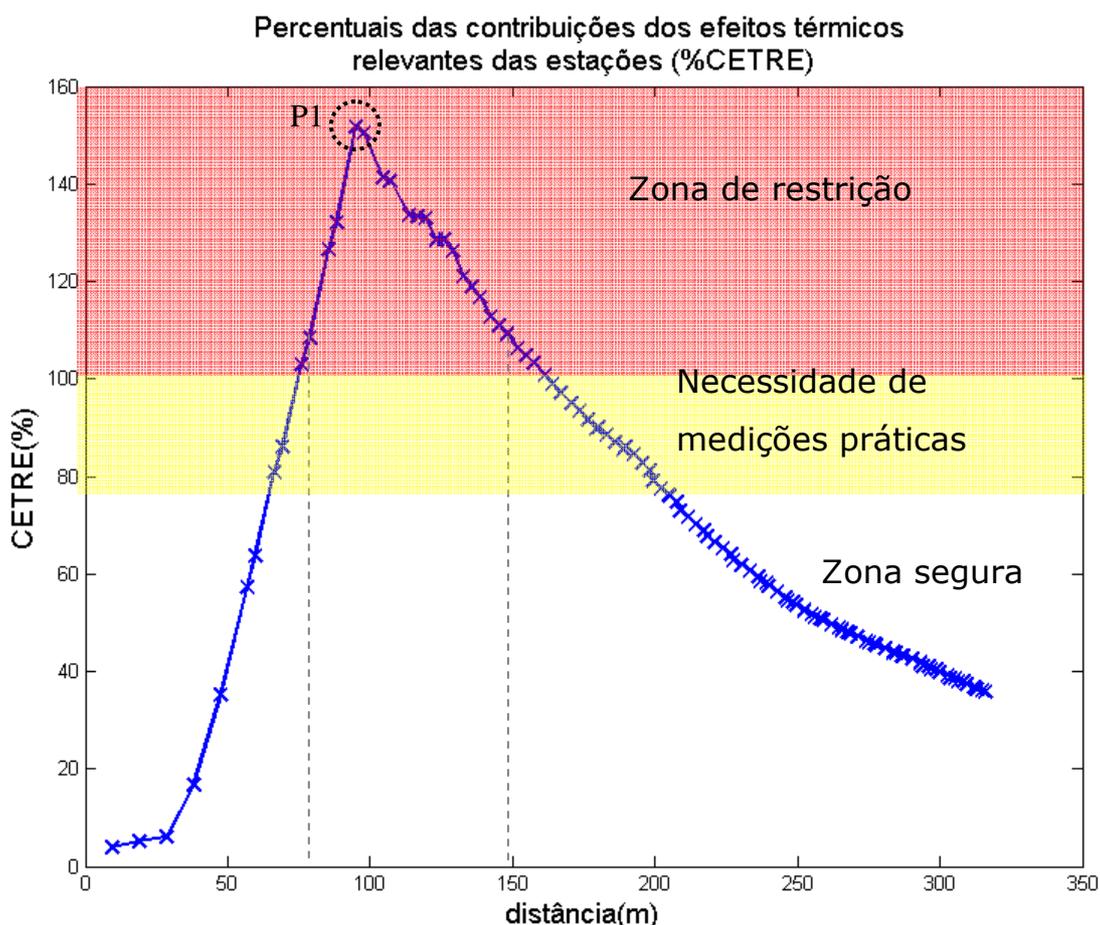


**Figura 7.5 - Zonas de concentração / restrição no entorno de uma Estação Rádio Base compartilhada.**

Na figura 7.5 é possível, também, observar que a área exatamente abaixo da ERB não é necessariamente a mais afetada pela radiação não ionizante.

Na figura 7.6, onde foram plotados os pontos na direção de máxima irradiação (ponto P1, azimute  $18,4^\circ$  e distância de 94,9 metros), é possível observar o efeito da

diretividade das antenas, fazendo com que a CETRE parta do menor nível nas proximidades da estação, alcançando valores máximos por volta dos 94,9 metros de distância e decaindo gradativamente a partir desta área em função da atenuação no espaço livre.



**Figura 7.6 - Percentuais de CETRE na direção radial para o azimute de irradiação máxima.**

Na estação hipotética do exemplo, conforme pode ser visto na figura 7.6, seria necessário realizar medições em campo para comprovação do atendimento aos níveis de referência, uma vez que a Resolução 303/02 assim determina para os casos onde o percentual de CETRE ultrapasse dois terços do valor máximo permitido. Neste caso, o valor ultrapassou não apenas este limite, como também o limite máximo recomendado. Ou seja, de acordo com os cálculos teóricos, esta estação não estaria de acordo com as exigências regulatórias para operar.

Os dados necessários para os cálculos teóricos estão à disposição na página da ANATEL, na internet. Entretanto, a inclusão de algumas informações, atualmente não

repassadas à ANATEL pelas operadoras, tais como perda no percurso até a antena ou potência entregue à antena, tipo de infraestrutura, etc., pode colaborar para aumentar a precisão da simulação computacional. Outro fator que pode facilitar a análise das ERB's é a exigência, por parte da ANATEL, dos diagramas de irradiação das antenas durante a fase de homologação. Assim, será possível automatizar o processo de avaliação dos níveis de radiação emitidos pelas estações, de forma mais apurada.

## 8. Realizações de medições e análise dos resultados

A fim de comprovar o modelo teórico proposto no capítulo 6, foram realizadas campanhas de medições em estações reais ativas, com ou sem compartilhamento de infraestrutura. Os valores obtidos das medições deveriam ser sempre menores ou, em caso extremo, iguais aos valores calculados, uma vez que durante toda a modelagem foram consideradas condições de “pior caso”, ou seja, condições extremamente conservadoras.

Os principais fatores que contribuem para a garantia de que os valores medidos (reais) estejam sempre abaixo dos calculados pelo modelo são:

- 1) **Adoção do modelo em linha de visada direta (LOS)** <sup>7</sup> – Todos os cálculos levam em consideração a inexistência de obstáculos no percurso da antena até o ponto de observação. No ambiente real, a vegetação, relevo e construções exercem elevada influência no nível do sinal recebido, atenuando-o consideravelmente.
- 2) **A aproximação para a reflexão no solo** (modelo de dois raios) considera a possibilidade de que campos refletidos possam se adicionar em fase ao campo incidente direto, permanentemente. Assim, a densidade de potência é multiplicada pelo fator 2,56.
- 3) **Considera-se que todos os canais estão sendo utilizados simultaneamente.** O número de usuários ativos na rede, em um determinado momento, varia em função de uma série de fatores externos. Os sistemas são projetados para operar com uma folga razoável na maior parte do tempo e, normalmente, apenas um pequeno percentual dos recursos de uma ERB está em uso.
- 4) **Adoção do número máximo de transceptores para cada setor como referência para os cálculos,** em virtude da análise de pior caso, exceto em casos onde este quantitativo seja fornecido como entrada para o programa computacional. O número de transceptores varia para cada tipo

---

<sup>7</sup> LOS – Line of Sight (linha de visada)

de estação, em função do objetivo de cobertura e demanda de capacidade de uma determinada célula. Estações localizadas em áreas rurais ou estradas possuem baixa demanda por capacidade, ao passo que estações localizadas em grandes centros urbanos requerem maior capacidade e, conseqüentemente, maior quantidade de equipamentos transceptores.

- 5) **O modelo utiliza antenas onidirecionais, com ganho máximo igual ao da antena diretiva**, nos casos onde não for possível obter o diagrama de irradiação de uma antena.

Para avaliação do efeito em ambientes multiusuários, foram levantados os possíveis pontos de compartilhamento de infraestrutura de estações do Serviço Móvel Pessoal (SMP) na cidade de Niterói/RJ, com base nos dados informados pelas operadoras à ANATEL. As estações licenciadas estão assinaladas na figura 8.1, cuja imagem foi obtida do software Google Earth™ serviço de mapa.



**Figura 8.1 - Estações Rádio Base do SMP em Niterói/RJ.**

Foram eleitas, para a realização de medições, as estações com mais de uma operadora, em locais seguros e com facilidade de acesso. Os cenários de medições escolhidos serão apresentados no item 8.1.

## 8.1. Resultados teóricos

Os resultados teóricos foram obtidos com auxílio do modelo proposto no capítulo 6 e utilizando o modelo computacional proposto no capítulo 7, ou seja, foram utilizados os dados contidos na base de dados da ANATEL para os cálculos realizados.

### 8.1.1. Cenário 1 – Campus do Gragoatá da UFF

Neste cenário, foram identificadas duas estações instaladas em torres distintas separadas por uma pequena distância (aproximadamente 120m.). O objetivo foi avaliar a relevância das contribuições individuais de cada estação em um determinado ponto, mesmo estando os equipamentos em torres diferentes. As estações estão localizadas no bairro do Gragoatá – Niterói/RJ, no campus da UFF.

A figura 8.2 apresenta o cenário 1, identificando os principais locais de permanência de pessoas no Campus. Além dos locais de atenção destacados, existem ainda algumas residências bastante próximas às ERB's.



**Figura 8.2 - Cenário 1 – Campus do Gragoatá da UFF.**

Na tabela 8.1 são mostrados os valores utilizados nos cálculos, parte retirada da base de dados da ANATEL, com valores informados pelas operadoras de telefonia móvel e parte determinada para situações de pior caso conforme exige o modelo proposto.

Com a finalidade de se avaliar as alternativas possíveis e seus resultados, a análise foi realizada de duas formas distintas: A primeira considerando os diagramas de irradiação das antenas e a segunda considerando antenas onidirecionais arbitradas pelo autor, com ganho máximo igual ao da antena diretiva.

Os resultados são apresentados graficamente através da distribuição espacial (visão superior) do percentual de Contribuição para os Efeitos Térmicos Relevantes da Estação (% CETRE) e da variação do % CETRE com a distância (visão lateral) em relação à ERB.

A distribuição espacial apresenta curvas equipercenuais, separadas em passos de 5%, variando de zero até o valor máximo do % CETRE observado. Os valores mais baixos são representados por cores frias (tons azuis), passando para cores quentes (tons avermelhados), à medida que se aproximam dos níveis máximos recomendados. A fim de auxiliar na visualização, são apresentadas também as direções de irradiação de cada setor da estação.

A variação com a distância é calculada para a direção que apresenta os valores máximos de % CETRE, identificados através da análise da distribuição espacial.

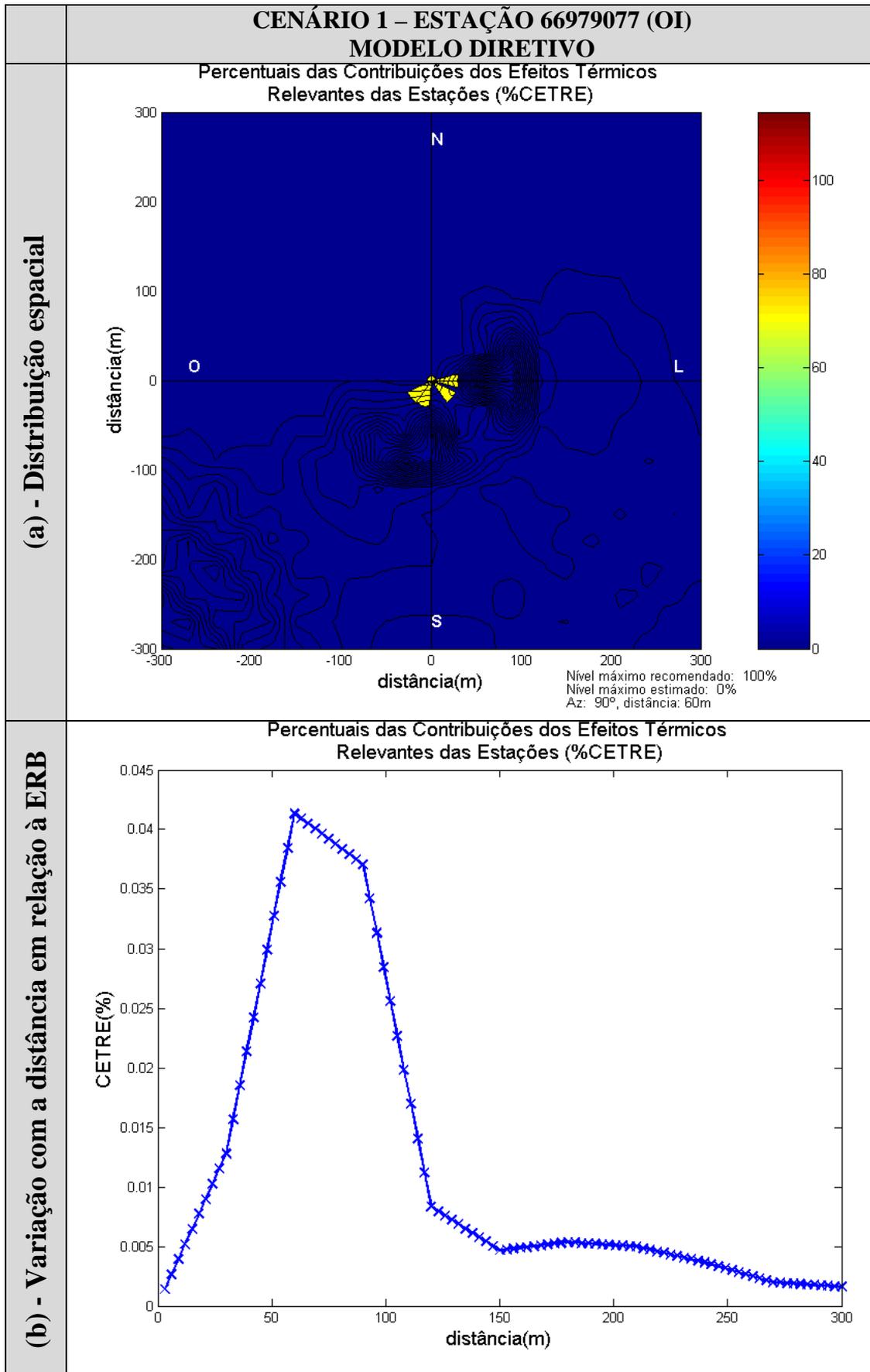
Pela distribuição espacial do percentual de CETRE, mostrada na figura 8.3 (a), é possível observar uma maior concentração de irradiação nas direções de máxima irradiação das antenas, uma vez que foi adotada a abordagem com antenas direcionais. Para a análise por antenas onidirecionais, mostrada na figura 8.4 (a), observa-se uma distribuição mais uniforme.

A figura 8.3 (a) indica ainda a ocorrência de um pico de RNI (Radiação Não Ionizante) no azimute de 90 graus e a uma distância de 60 metros da ERB. A partir desta análise, torna-se relativamente fácil identificar áreas mais sujeitas à exposição à RNI e, ao contrário do que se pensa, nem sempre estas áreas são mais próximas da ERB. O mesmo fenômeno pode ser observado na figura 8.3 (b) que mostra a variação do percentual de CETRE com a distância para o azimute indicado como crítico na análise espacial (90°). Já para a abordagem com antenas onidirecionais o pico ocorre exatamente abaixo da ERB e chega a atingir valores correspondentes a 47,9% dos níveis recomendados de exposição, figuras 8.4 (a) e (b).

Com base na análise dos resultados apresentados pelo modelo onidirecional na figura 8.4 (b), é possível observar uma queda exponencial do percentual de CETRE com a distância. Apesar de não apresentar as áreas de concentração de RNI, os valores apresentados para o percentual de CETRE, neste modelo, são sempre maiores que os apresentados no modelo direcional, o que o torna um modelo mais restritivo e, portanto, mais conservador.

Tabela 8.1 – Dados técnicos das estações 667979077 (Oi) e 684126605 (TIM).

	SETORES								SETORES	
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2
<b>Entidade</b>	TNL PCS S.A.								TIM CELULAR S.A.	
<b>Estação</b>	667979077								684126605	
<b>Banda</b>	1800MHz	2100MHz	1800MHz	2100MHz	1800MHz	2100MHz	2100MHz	1800MHz	1800MHz	1800MHz
<b>Az.</b>	90°	90°	200°	200°	130°	130°	230°	230°	100°	200°
<b>Ant.</b>	739 496	739 496	739 496	739 496	HBX-6516DS VTM	HBX-6516DS VTM	UMWD- 03319-XD	UMWD- 03319-XD	932DG65VT EKL	932DG65VT EKL
<b>G.</b>	18,0dBi	18,0dBi	18,0dBi	18,0dBi	11,8dBi	11,8dBi	20,6dBi	20,6dBi	18,0dBi	18,0dBi
<b>Tilt</b>	2°	2°	2°	2°	0°	0°	0°	0°	7°	7°
<b>Alt.</b>	26m	26m	26m	26m	32m	32m	32m	32m	20m	20m
<b>Equip.</b>	UltraSite GSM/EDGE 1800	Nokia Flexi WCDMA Base Station 2100 Dual 50W	UltraSite GSM/EDGE 1800	Nokia Flexi WCDMA Base Station 2100 Dual 50W	Nokia Flexi WCDMA Base Station 2100 Dual 50W	UltraSite GSM/EDGE 1800	UltraSite GSM/EDGE 1800	Nokia Flexi WCDMA Base Station 2100 Dual 50W	S30861- U2388-X	S30861- U2388-X
<b>Pot. TRX (W)</b>	40	20	40	20	20	40	40	20	68	68
<b>P.Comb (dB)</b>	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
<b>P.dup (dB)</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P.Cabos (dB)</b>	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
<b>P.Conectores (dB)</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Num. TRX</b>	4	2	4	2	4	2	2	4	4	4
<b>EIRP (W)</b>	2511,9	629,5	629,5	2511,9	616,6	154,5	1172,1	4677,3	4265,8	4265,8
<b>EIRP (dBm)</b>	64,0	58,0	58,0	64,0	57,9	51,9	60,7	66,7	66,3	66,3



**Figura 8.3 - Resultados teóricos (modelo diretivo) - estação 66979077 (Oi)**

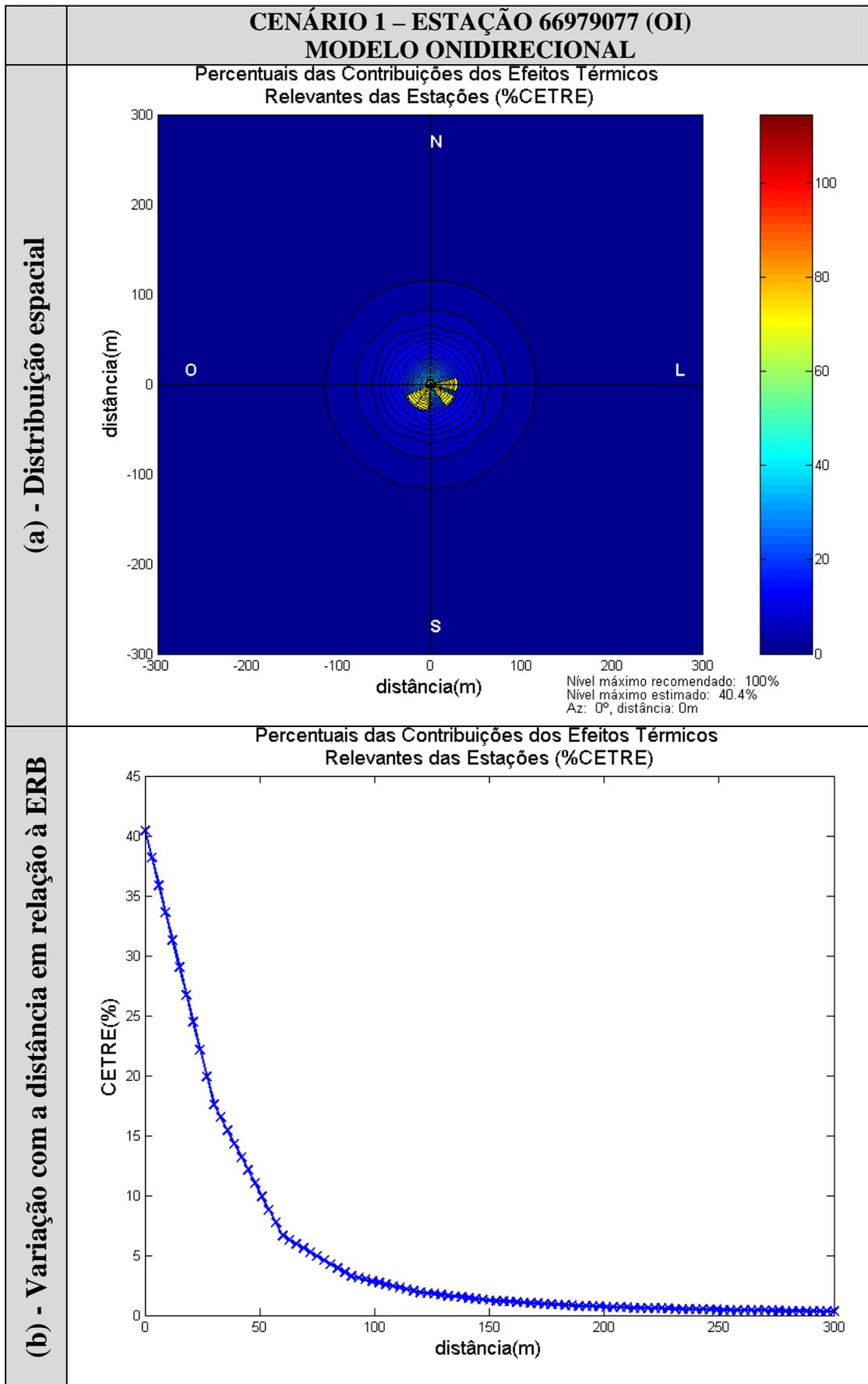
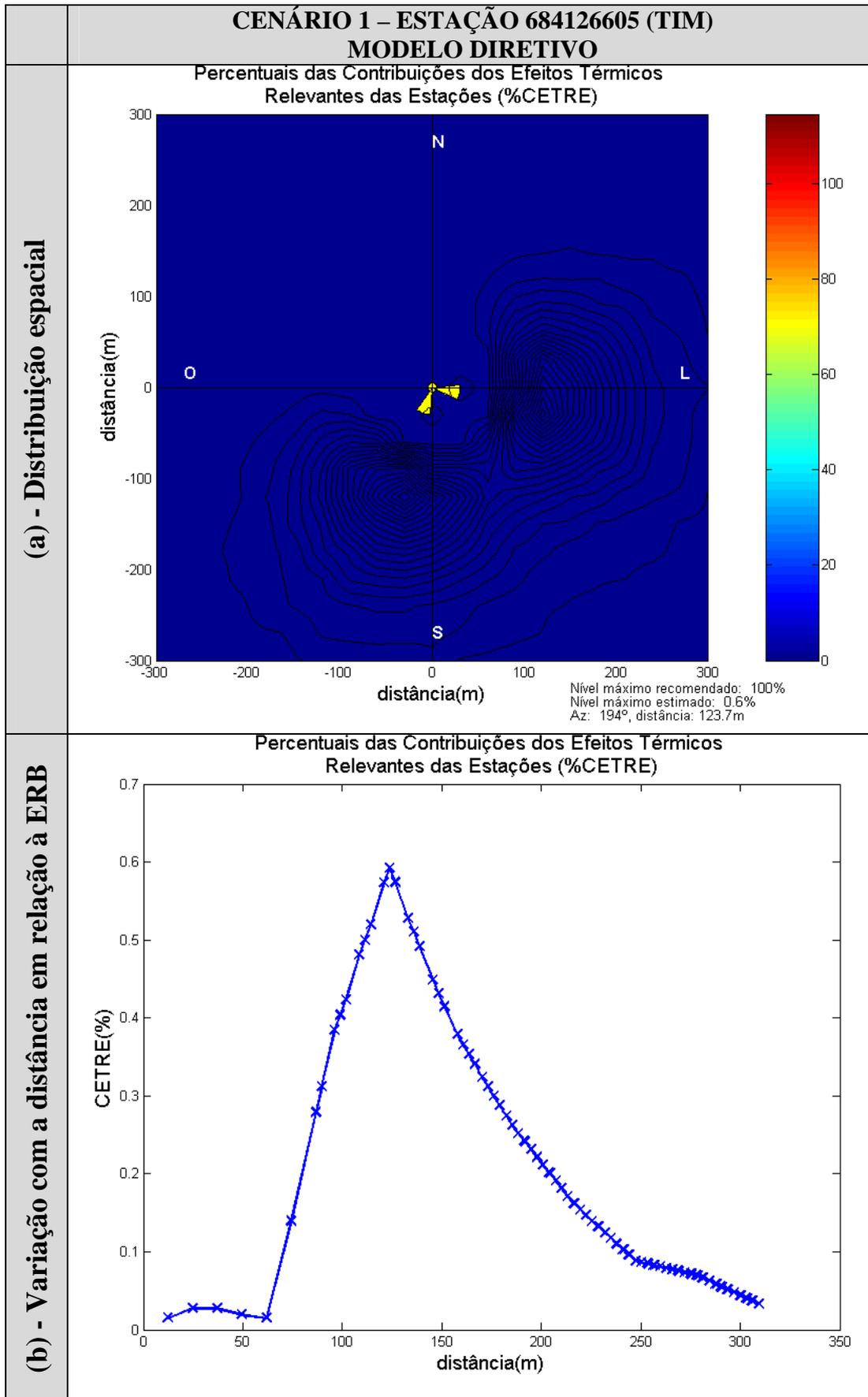


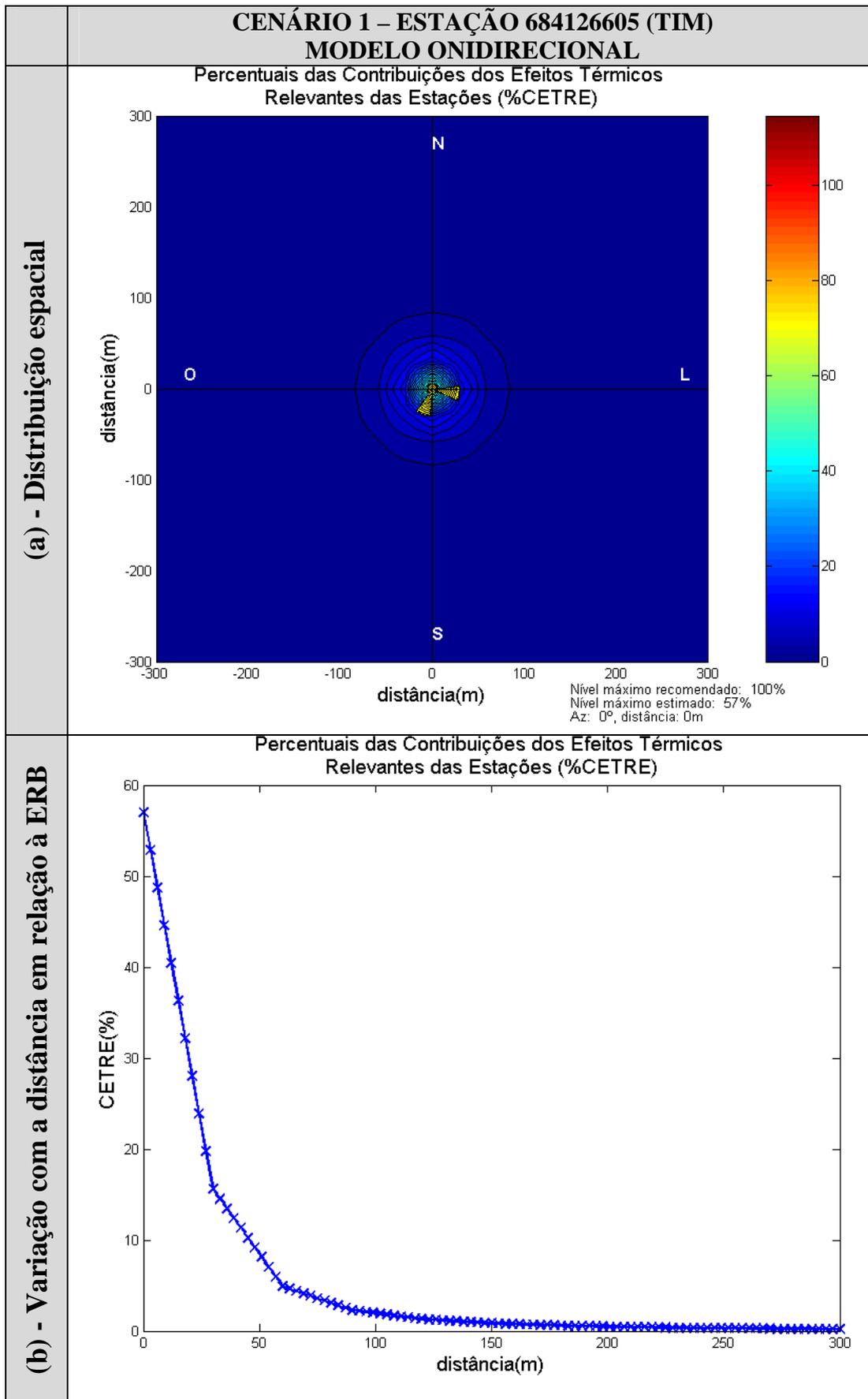
Figura 8.4 - Resultados teóricos (modelo onidirecional) - estação 667979077 (Oi)

Para o caso da estação 684126605, da TIM, com base na análise do modelo diretivo, representado na figura 8.5 (a), é possível observar a ocorrência de dois pontos de maior concentração de irradiação, em função da existência de apenas dois setores na estação. Estes pontos estão localizados a uma distância de, aproximadamente, 130 metros da ERB, chegando a atingir um valor máximo 0,6 % dos níveis recomendados de exposição nos azimutes de máxima irradiação das antenas. A variação do percentual de CETRE com a distância, para o azimute considerado como crítico ( $194^\circ$ ), de acordo com a análise da distribuição espacial, é apresentada na figura 8.5 (b).

O modelo onidirecional, apresentado nas figuras 8.6 (a) e (b) estima níveis máximos do percentual de CETRE atingindo até 57 % do nível recomendado junto à base da ERB.



**Figura 8.5 - Resultados teóricos (modelo diretivo) - estação 684126605 (Tim)**



**Figura 8.6 - Resultados teóricos (modelo onidirecional) - estação 684126605 (Tim)**

## Cenário 2 – Campus Praia Vermelha da UFF

Para o cenário 2, foram considerados equipamentos instalados no topo de um prédio, localizado no bairro São Domingos, próximo ao Campus Praia Vermelha da UFF.



**Figura 8.7 - Cenário 2 – Campus Praia Vermelha da UFF.**

Para o cenário 2, com base nos dados enviados pelas operadoras de telefonia móvel à ANATEL, foram considerados os valores constantes da tabela 8.2.

A figura 8.8 (a) indica a ocorrência de um pico de RNI correspondendo a 0,2 % dos níveis de exposição recomendados no azimute de 315 graus, a uma distância de 127 metros da ERB. O mesmo pode ser observado na figura 8.8 (b). Já para a abordagem com antenas onidirecionais o pico ocorre imediatamente abaixo da ERB e atinge valores correspondentes a 19,8% dos níveis recomendados de exposição, figuras 8.9(a) e (b).

Tabela 8.2 - Dados técnicos das estações 683934171 (Claro), 667984020 (Oi) e 683016687 (TIM).

	SETORES				SETORES								SETORES					
	1	2	3	4	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6
Entidade	CLARO S.A.				TNL PCS S.A.								TIM CELULAR S.A.					
Estação	683934171				667984020								683016687					
Banda	800MHz		1800MHz		1800MHz				2100MHz				1800MHz			2100MHz		
Az.	50°	140°	50°	140°	20°	30°	120°	120°	20°	30°	120°	120°	80°	160°	320°	80°	160°	320°
Ant.	800 10305/AP X15- 880/065 DAT	800 10305/AP X15- 880/065 DAT	742 215/APX1 8- 1900/065 DAT10	742 215/APX1 8- 1900/065 DAT10	HBX- 6516DS- VTM	739 496	739 496	HBX- 6516DS- VTM	HBX- 6516DS- VTM	739 496	739 496	HBX- 6516DS- VTM	742 212/APX1 8- 1900/065 DAT 0-8T	742 212/APX1 8- 1900/065 DAT 0-8T	DB992HG 28N-B	742 212/APX1 8- 1900/065 DAT 0-8T	742 212/APX1 8- 1900/065 DAT 0-8T	DB992HG 28N-B
G.	15.0dBi	15.0dBi	14.7dBi	14.7dBi	11.8dBi	18.0dBi	18.0dBi	11.8dBi	11.8dBi	18.0dBi	18.0dBi	11.8dBi	15.0dBi	15.0dBi	15.0dBi	15.0dBi	15.0dBi	15.0dBi
Tilt	4°	4°	2°	2°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	7°	7°	7°	7°	7°	7°
Alt.	46m	48m	49m	50m	49m	48m	48m	49m	49m	48m	48m	49m	52m	53m	53m	52m	53m	53m
Equip.	KRC 118 22/1	KRC 118 22/1	KRC 131 1003/1	KRC 131 1003/1	UltraSite GSM/ED GE 1800	UltraSite GSM/ED GE 1800	UltraSite GSM 1800	UltraSite GSM 1800	Nokia Flexi WCDMA Base Station 2100 Dual 50W	Nokia Flexi WCDMA Base Station 2100 Dual 50W	Nokia Flexi WCDMA Base Station 2100 Dual 50W	Nokia Flexi WCDMA Base Station 2100 Dual 50W	S30861- U2388-X	S30861- U2388-X	S30861- U2388-X	RRU3801 C- QWEM1R RUC	RRU3801 C- QWEM1R RUC	RRU3801 C- QWEM1R RUC
Pot.TRX (W)	48.87	48.87	25.11	25.11	40	40	28	28	20	20	20	20	68	68	68	49.1	49.1	49.1
P.Comb (dB)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
P.dup (dB)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P.Cabos (dB)	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
P.Conectores (dB)	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Num. TRX	4	4	2	2	4	4	4	4	2	2	2	2	4	4	4	2	2	2
EIRP (W)	794.3	794.3	758.6	758.6	616.6	2511.9	1737.9	416.9	154.9	631	631	154.9	2138	2138	2138	794.3	794.3	794.3
EIRP (dBm)	59.0	59.0	58.8	58.8	57.9	64.0	62.4	56.2	51.9	58.0	58.0	51.9	63.3	63.3	63.3	59.0	59.0	59.0

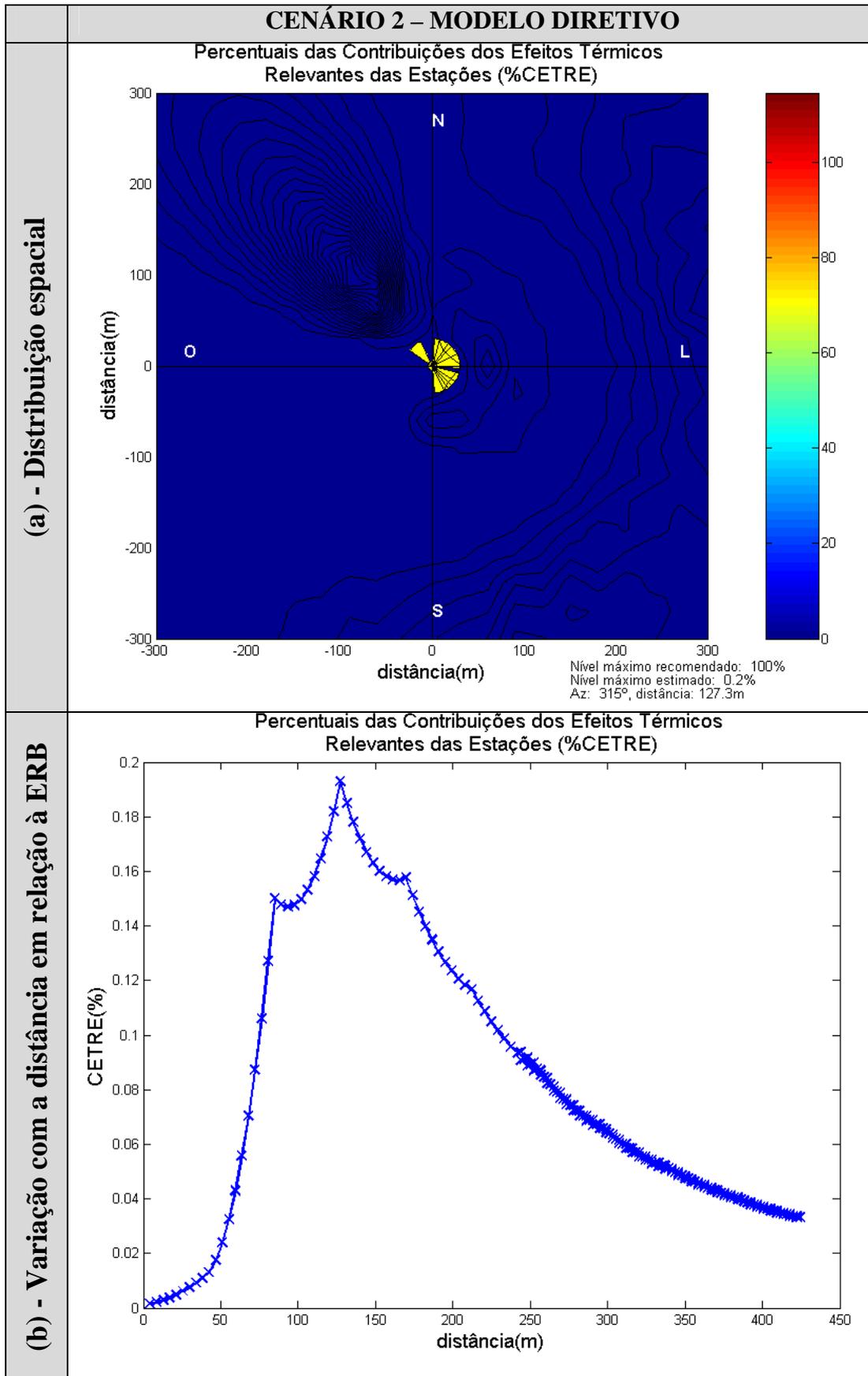


Figura 8.8 - Resultados teóricos (modelo diretivo) – Cenário 2 – Campus Praia Vermelha da UFF.

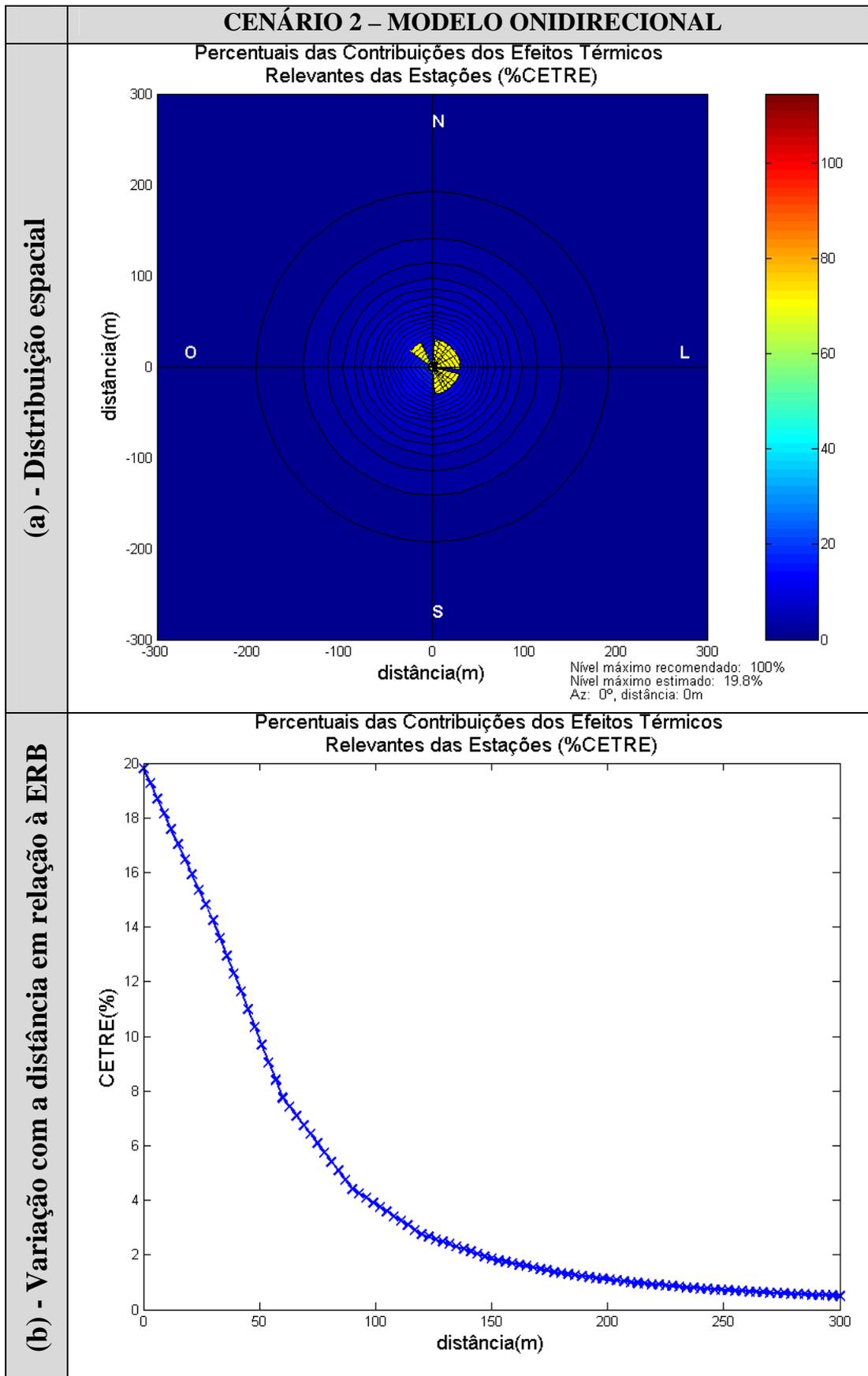


Figura 8.9 - Resultados teóricos (modelo onidirecional) – Cenário 2 – Campus Praia Vermelha da UFF.

### 8.1.2. Cenário 3 - Charitas

Para o cenário 3, foram considerados equipamentos instalados no bairro de Charitas, também localizado em Niterói/RJ. Trata-se de uma área residencial com as ERB's instaladas bastante próximas a estas residências, razão pela qual esta ERB foi escolhida para as medições. Próximo à estação encontra-se ainda uma ERB de outra operadora, que não está compartilhando sua infraestrutura com as demais.



**Figura 8.10 - Cenário 3 - Charitas.**

Para o cenário 3, com base nos dados enviados pelas operadoras de telefonia móvel à ANATEL, foram considerados os valores constantes da tabela 8.3.

A figura 8.11 (a) indica a ocorrência de picos de RNI correspondendo a 0,2 % dos níveis de exposição recomendados nos azimutes de 0 e 231 graus a uma distância de aproximadamente 190 metros da ERB. O mesmo pode ser observado na figura 8.11 (b). Já para a abordagem com antenas onidirecionais, figuras 8.12 (a) e (b), o pico ocorre exatamente abaixo da ERB e chega a valores correspondentes a 50,6 % dos níveis recomendados de exposição.

Tabela 8.3 - Dados técnicos das estações 683135589 (Oi), 674669452 (TIM) e 683934481 (Claro).

	SETORES								SETORES		SETORES			
	1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	1	2	3	4
<b>Entidade</b>	TNL PCS S.A.								TIM CELULAR S.A.		CLARO S.A.			
<b>Estação</b>	683135589								674669452		683934481			
<b>Banda</b>	1800MHz				2100MHz				1800MHz		800MHz		1800MHz	
<b>Az.</b>	0°	40°	230°	240°	0°	40°	230°	240°	0°	230°	240°	340°	240°	340°
<b>Ant.</b>	739 496	HBX-6516DS-VTM	741 794/APX19-1900/065 2T	HBX-6516DS-VTM	739 496	HBX-6516DS-VTM	741 794/APX 19-	HBX-6516DS-VTM	741 784/APX 18-	741 784/APX 18-	800 10305/AP X15-	800 10305/AP X15-	PCSD18-06516-2D	PCSD18-06516-2D
<b>G.</b>	18,0dBi	11,8dBi	15,0dBi	11,8dBi	18,0dBi	11,8dBi	15,0dBi	11,8dBi	17,5dBi	17,5dBi	15,0dBi	15,0dBi	17,7dBi	17,7dBi
<b>Tilt</b>	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	7°	7°	4°	4°	2°	2°
<b>Alt.</b>	31m	33m	31m	33m	31m	33m	31m	33m	30m	30m	38m	38m	38m	38m
<b>Equip.</b>	UltraSite GSM/EDGE 1800	UltraSite GSM/EDGE 1800	UltraSite GSM/EDGE 1800	UltraSite GSM/EDGE 1800	Nokia Flexi WCDMA Base Station	S30861-U2388-X	S30861-U2388-X	KRC 118 22/1	KRC 118 22/1	KRC 131 1003/1	KRC 131 1003/1			
<b>Pot.TRX (W)</b>	40	40	40	40	20	20	20	20	68	68	48,87	48,87	35	35
<b>P.Comb (dB)</b>	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
<b>P.dup (dB)</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P.Cabos (dB)</b>	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
<b>P.Conectores (dB)</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Num. TRX</b>	4	4	4	4	2	2	2	2	4	4	2	2	4	4
<b>EIRP (W)</b>	2511,9	616,6	1259	616,6	631	154,9	316,2	154,9	3890,4	3890,4	794,3	794,3	2041,8	2041,8
<b>EIRP (dBm)</b>	64,0	57,9	61,0	57,9	58,0	51,9	55,0	51,9	65,9	65,9	59,0	59,0	63,1	63,1

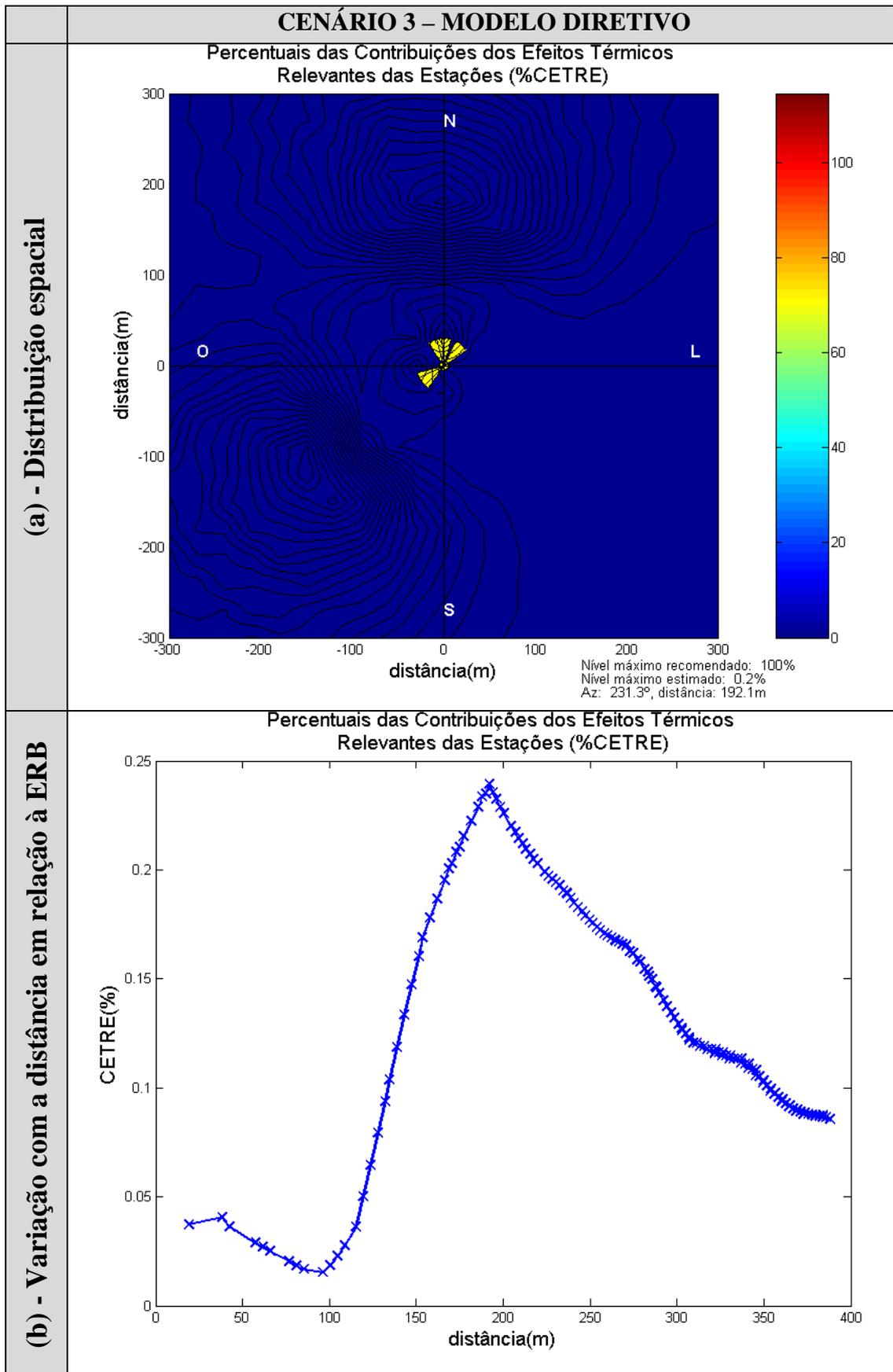


Figura 8.11 - Resultados teóricos (modelo diretivo) – Cenário 3 – Charitas.

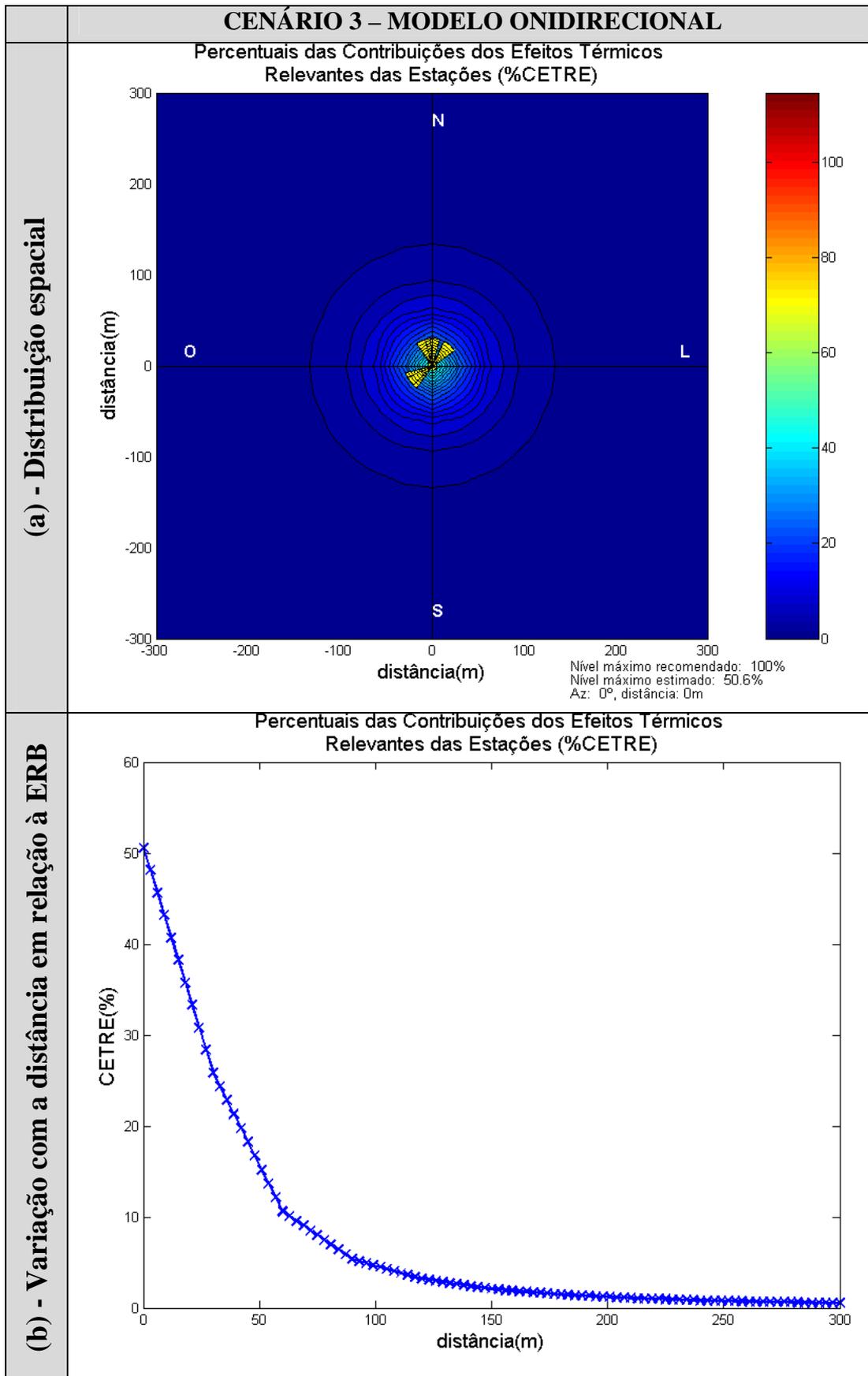
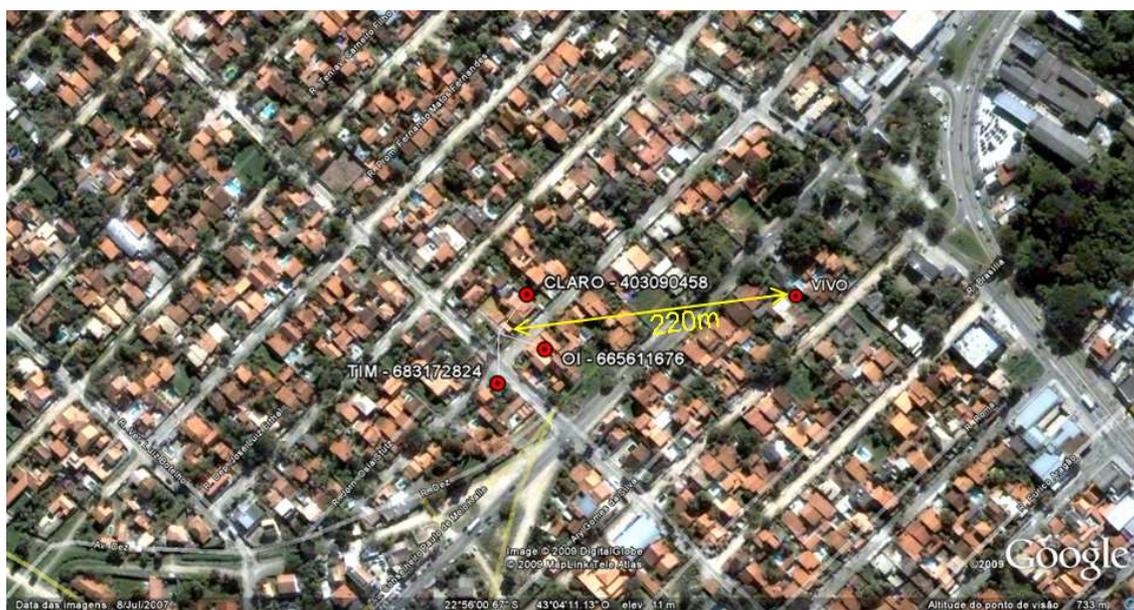


Figura 8.12 - Resultados teóricos (modelo onidirecional) – Cenário 3 – Charitas.

### 8.1.3. Cenário 4 - Piratininga

Para o cenário 4, foram considerados equipamentos instalados em uma ERB, localizada no bairro Piratininga, também em Niterói/RJ. Trata-se de uma área residencial com as ERB's bastante próximas a estas residências. O cenário apresenta, ainda, uma ERB de outra operadora, que não está compartilhando sua infraestrutura com as demais, situada a uma distância de, aproximadamente, 220 metros das ERB's em análise.



**Figura 8.13 - Cenário 4 - Piratininga.**

Com base nos dados enviados pelas operadoras de telefonia móvel à ANATEL, foram considerados os valores apresentados nas tabelas 8.4 e 8.5.

Na figura 8.14 (a), é possível perceber a distribuição do sinal em todas as direções, em função da existência de vários setores em conjunto. O modelo teórico indica que, neste caso, o azimute  $123,7^\circ$  seria considerado o mais crítico e apresentaria dois picos de concentração de densidade de potência nesta direção: o menor em torno de 50 m e um maior por volta dos 200 m de distância da ERB, com um valor de CETRE de 0,3 % em relação aos níveis de referência. Já na abordagem com antenas onidirecionais, figuras 8.15 (a) e (b), o pico ocorre imediatamente abaixo da ERB e chega a valores correspondentes a 75,9 % dos níveis recomendados de exposição.

Tabela 8.4 - Dados técnicos da estação 665611676 (Oi).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
<b>Entidade</b>	TNL PCS S.A.											
<b>Estação</b>	665611676											
<b>Banda</b>	1800MHz						2100MHz					
<b>Az.</b>	30°	50°	130°	140°	250°	280°	30°	50°	130°	140°	250°	280°
<b>Ant.</b>	HBX-6516DS-VTM	741 794/APX19-	HBX-6516DS-VTM	739 496	HBX-6516DS-VTM	739 496	HBX-6516DS-VTM	741 794/APX19-	HBX-6516DS-VTM	739 496	HBX-6516DS-VTM	739 496
<b>G.</b>	11.8dBi	15.0dBi	11.8dBi	18.0dBi	11.8dBi	18.0dBi	11.8dBi	15.0dBi	11.8dBi	18.0dBi	11.8dBi	18.0dBi
<b>Tilt</b>	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°	0°
<b>Alt.</b>	38m	34m	38m	34m	38m	34m	38m	34m	38m	34m	38m	34m
<b>Equip.</b>	UltraSite GSM/EDG E 1800	UltraSite GSM/EDG E 1800	UltraSite GSM 1800	UltraSite GSM 1800	UltraSite GSM 1800	UltraSite GSM 1800	Nokia Flexi WCDMA Base Station					
<b>Pot. TRX (W)</b>	40	40	28	28	28	28	20	20	20	20	20	20
<b>P. Comb (dB)</b>	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
<b>P. dup (dB)</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P. Cabos (dB)</b>	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
<b>P. Conectores (dB)</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Num. TRX</b>	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	2
<b>EIRP (W)</b>	616.6	1259	416.9	1737.9	416.9	1737.9	154.9	316.2	154.9	631	154.9	631
<b>EIRP (dBm)</b>	57.9	61.0	56.2	62.4	56.2	62.4	51.9	55.0	51.9	58.0	51.9	58.0

Tabela 8.5 - Dados técnicos das estações 683172824 (Tim) e 403090458 (Claro).

	SETORES														
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Entidade</b>	TIM CELULAR S.A.						CLARO S.A.								
<b>Estação</b>	683172824						403090458								
<b>Banda</b>	1800MHz			2100MHz			800MHz						1800MHz		
<b>Az.</b>	50°	120°	250°	50°	120°	250°	0°	45°	120°	240°	0°	120°	240°		
<b>Ant.</b>	APX16D WV- 16DWVS	APX16D WV- 16DWVS	APX16D WV- 16DWVS	APX16D WV- 16DWVS	APX16D WV- 16DWVS	APX16D WV- 16DWVS	739 658/APX1 1-880/090	800 10305/AP X15-	739 658/APX1 1-880/090	800 10305/AP X15-	739 658/APX1 1-880/090	800 10305/AP X15-	PCSD18- 06516-2D	PCSD18- 06516-2D	PCSD18- 06516-2D
<b>G.</b>	17.0dBi	17.0dBi	17.0dBi	17.0dBi	17.0dBi	17.0dBi	11.5dBi	15.0dBi	11.5dBi	15.0dBi	11.5dBi	15.0dBi	17.7dBi	17.7dBi	17.7dBi
<b>Tilt</b>	8°	8°	8°	8°	8°	8°	0°	4°	4°	4°	4°	4°	2°	2°	2°
<b>Alt.</b>	38m	38m	38m	38m	38m	38m	40m	36m	40m	36m	40m	36m	40m	40m	40m
<b>Equip.</b>	S30861- U2388-X	S30861- U2388-X	S30861- U2388-X	RRU3801 C- QWEM1R RUC	RRU3801 C- QWEM1R RUC	RRU3801 C- QWEM1R RUC		KRC 118 22/1		KRC 118 22/1		KRC 118 22/1	KRC 131 1003/1	KRC 131 1003/1	KRC 131 1003/1
<b>Pot.TRX (W)</b>	68	68	68	49.1	49.1	49.1	10	48.87	30	48.87	30	48.87	28.18	28.18	28.18
<b>P.Comb (dB)</b>	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
<b>P.dup (dB)</b>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P.Cabos (dB)</b>	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5	2.5
<b>P.Conect ores (dB)</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>Num. TRX</b>	4	4	4	2	2	2	21	2	21	2	21	2	4	4	4
<b>EIRP (W)</b>	3388.4	3388.4	3388.4	1259	1259	1259	758.6	794.3	2187.8	794.3	2187.8	794.3	1659.6	1659.6	1659.6
<b>EIRP (dBm)</b>	65.3	65.3	65.3	61.0	61.0	61.0	58.8	59.0	63.4	59.0	63.4	59.0	62.2	62.2	62.2

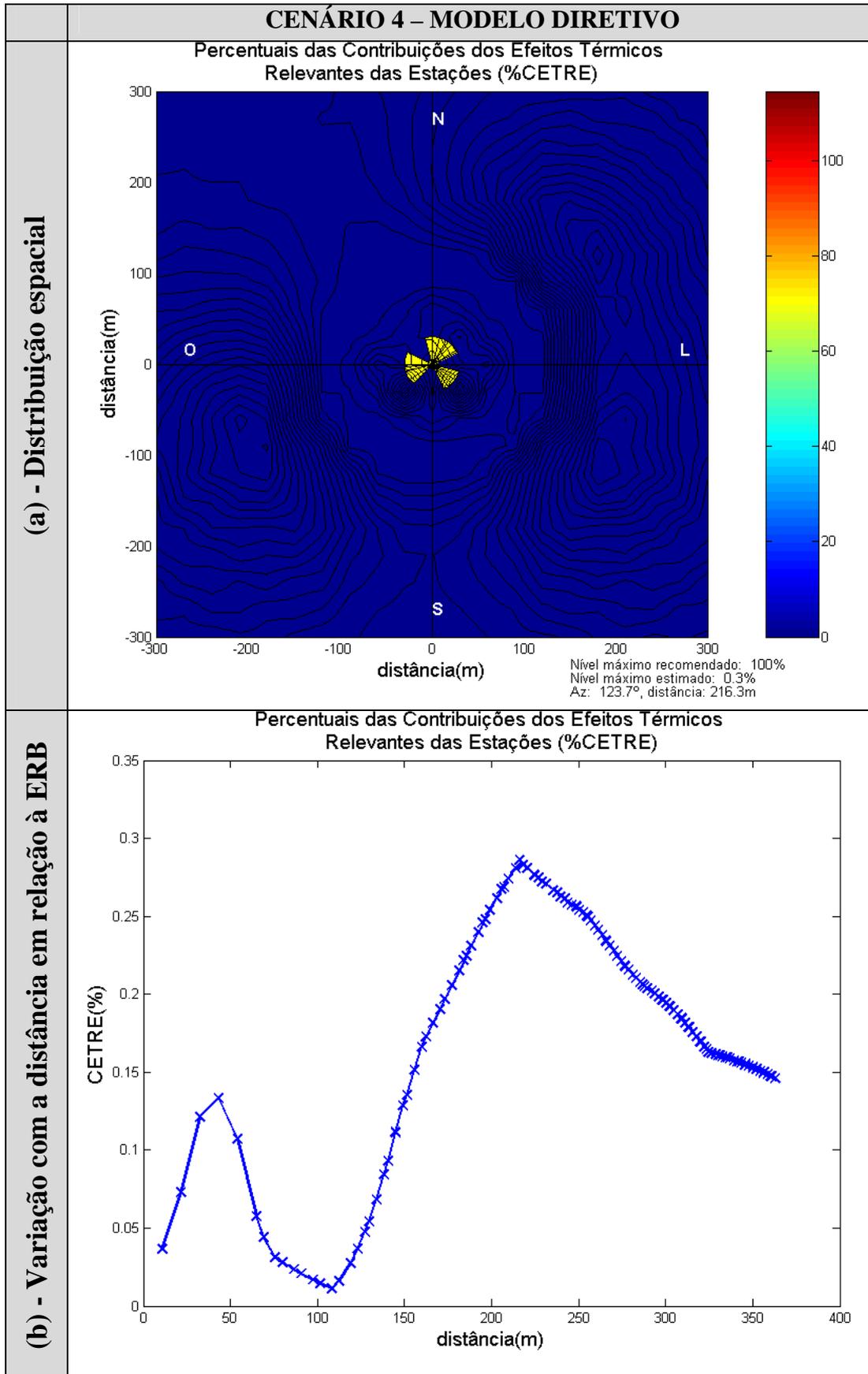


Figura 8.14 - Resultados teóricos (modelo diretivo) – Cenário 4 – Piratininga.

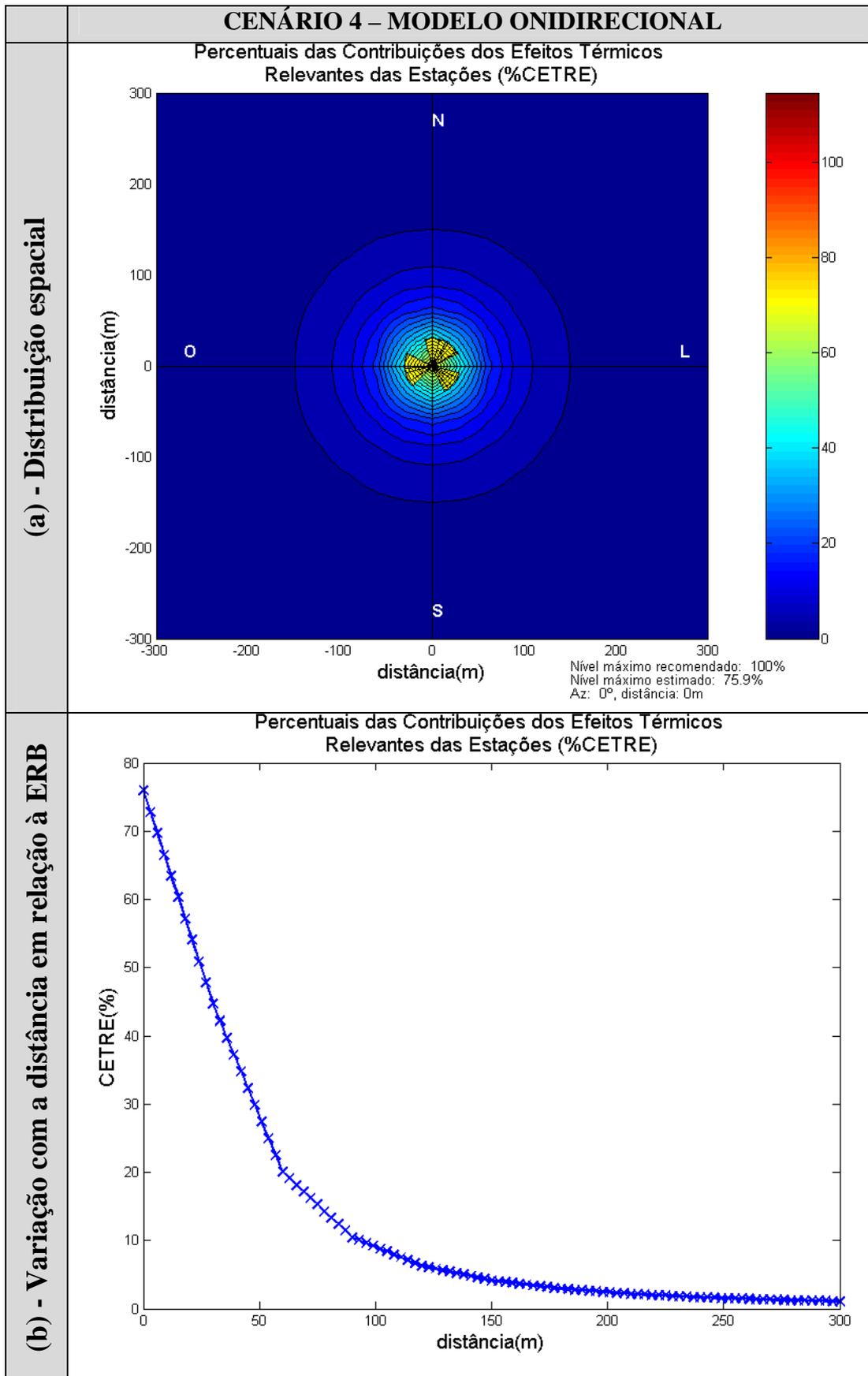


Figura 8.15 - Resultados teóricos (modelo onidirecional) – Cenário 4 – Piratininga.

## 8.2. Campanha de medições de campo

A fim de avaliar o modelo teórico apresentado no capítulo 6, foi realizada uma campanha de medições, em pontos próximos às estações, nos dias 12/03/2009 e 26/03/2009. O instrumento utilizado para a realização das medições foi o SRM-3000, fabricado pela Narda Safety Test Solutions GmbH.



**Figura 8.16 - Equipamento SRM-3000, utilizado nas medições.**

O equipamento SRM-3000 apresenta, como principais vantagens, a possibilidade de análise seletiva por banda de frequência e a verificação direta da densidade de potência e do atendimento aos níveis recomendados, sem a necessidade de cálculos adicionais. Isto ocorre em função do conhecimento de todos os seus parâmetros internos de recepção, para todas as faixas de frequências de operação (100 kHz a 3 GHz).

As medições foram realizadas em pontos específicos e foi adotado, como critério básico de escolha, que o ponto de análise deveria possuir, no mínimo, visada direta para a estação, para configurar uma situação de pior caso. Para cada ponto de medida foram

registradas, também, suas coordenadas geográficas, com o auxílio de um equipamento GPS. Assim, durante a etapa de pós-processamento dos dados, seria possível associar um registro do instrumento de medição a uma determinada coordenada geográfica.

Nas figuras 8.17 a 8.24 são mostradas as ERB's e os pontos onde foram realizadas as medições.



Figura 8.17 - ERB's do cenário 1 – Campus do Gragoatá da UFF.

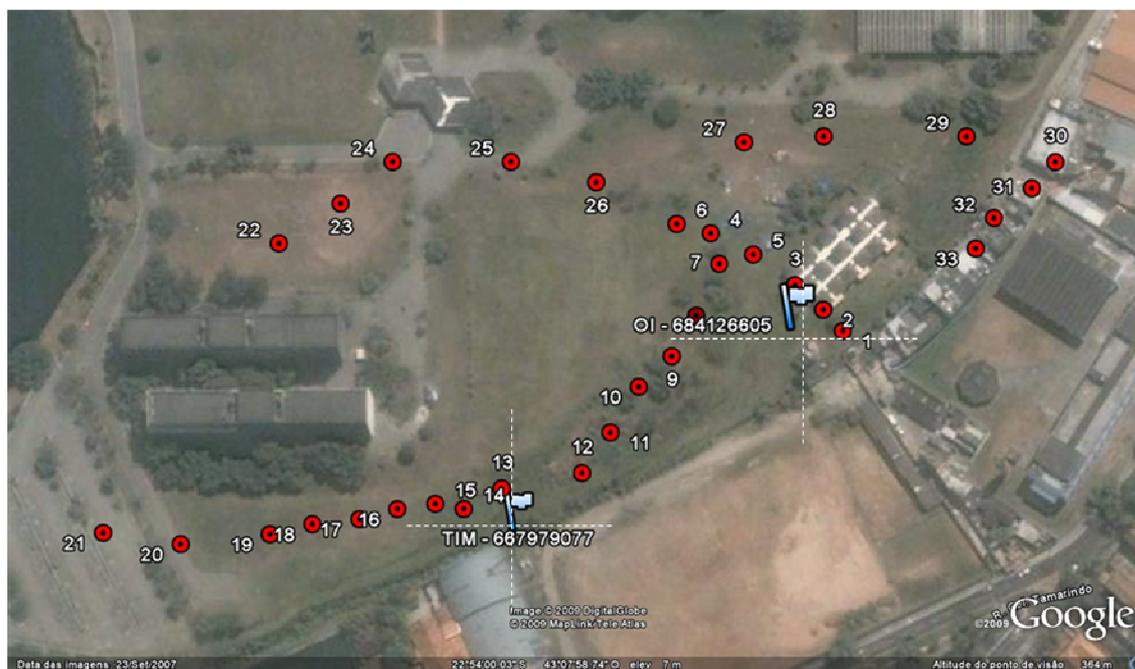


Figura 8.18 - Pontos de medição escolhidos para o cenário 1 – Campus do Gragoatá da UFF.



Figura 8.19 - ERB do cenário 2 – Campus da Praia Vermelha da UFF.

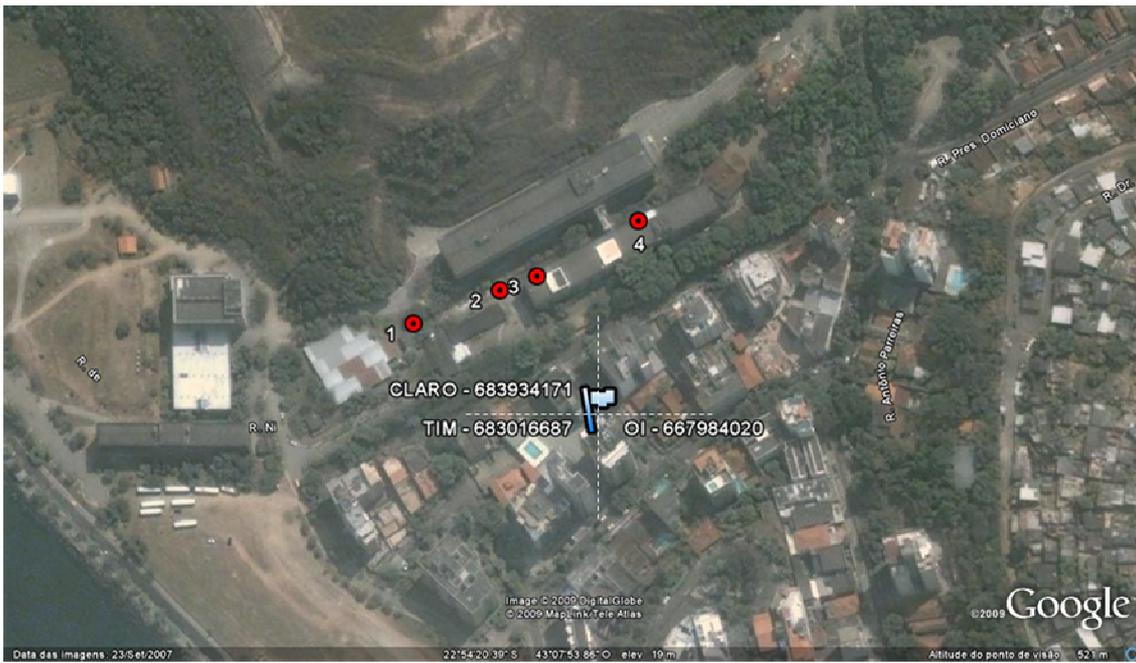


Figura 8.20 - Pontos de medição escolhidos para o cenário 2 – Campus da Praia Vermelha da UFF.



Figura 8.21 - ERB do cenário 3 – Charitas.



Figura 8.22 - Pontos de medição escolhidos para o cenário 3 – Charitas.



Figura 8.23 - ERB do cenário 4 – Piratininga.

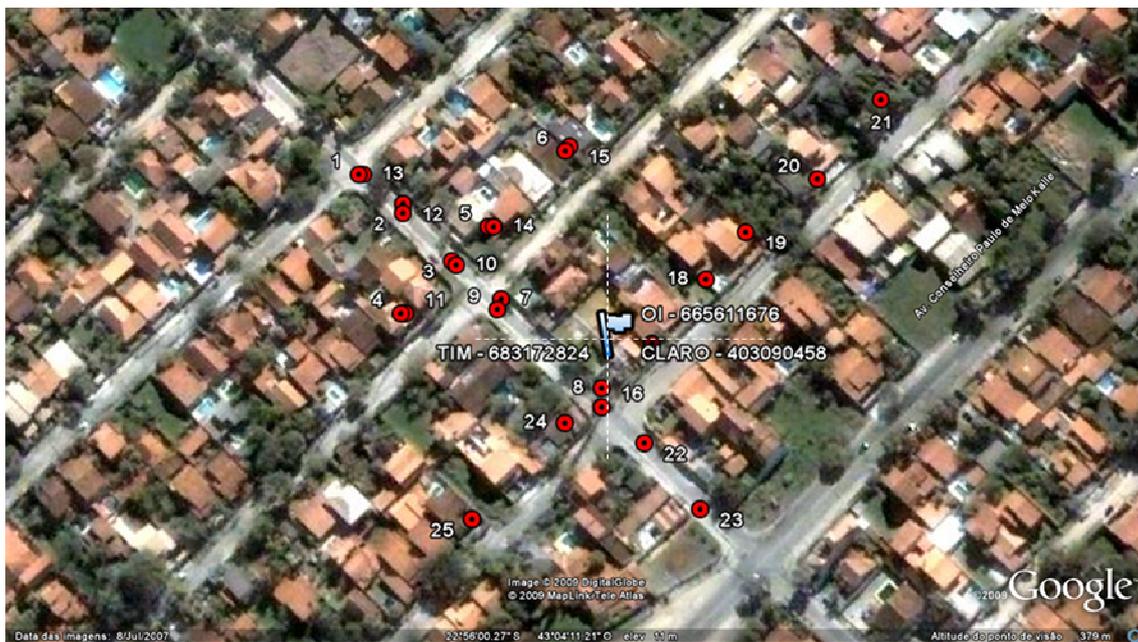


Figura 8.24 - Pontos de medição escolhidos para o cenário 4 – Piratininga.

### 8.3. Processamento das medições

Para cada ponto de medição descrito no item 8.2, os valores foram coletados de dois modos: Análise Espectral e Avaliação de Segurança.

A Análise Espectral registra os valores medidos de densidade de potência para uma determinada faixa de frequências. De posse destes valores, é possível visualizar,

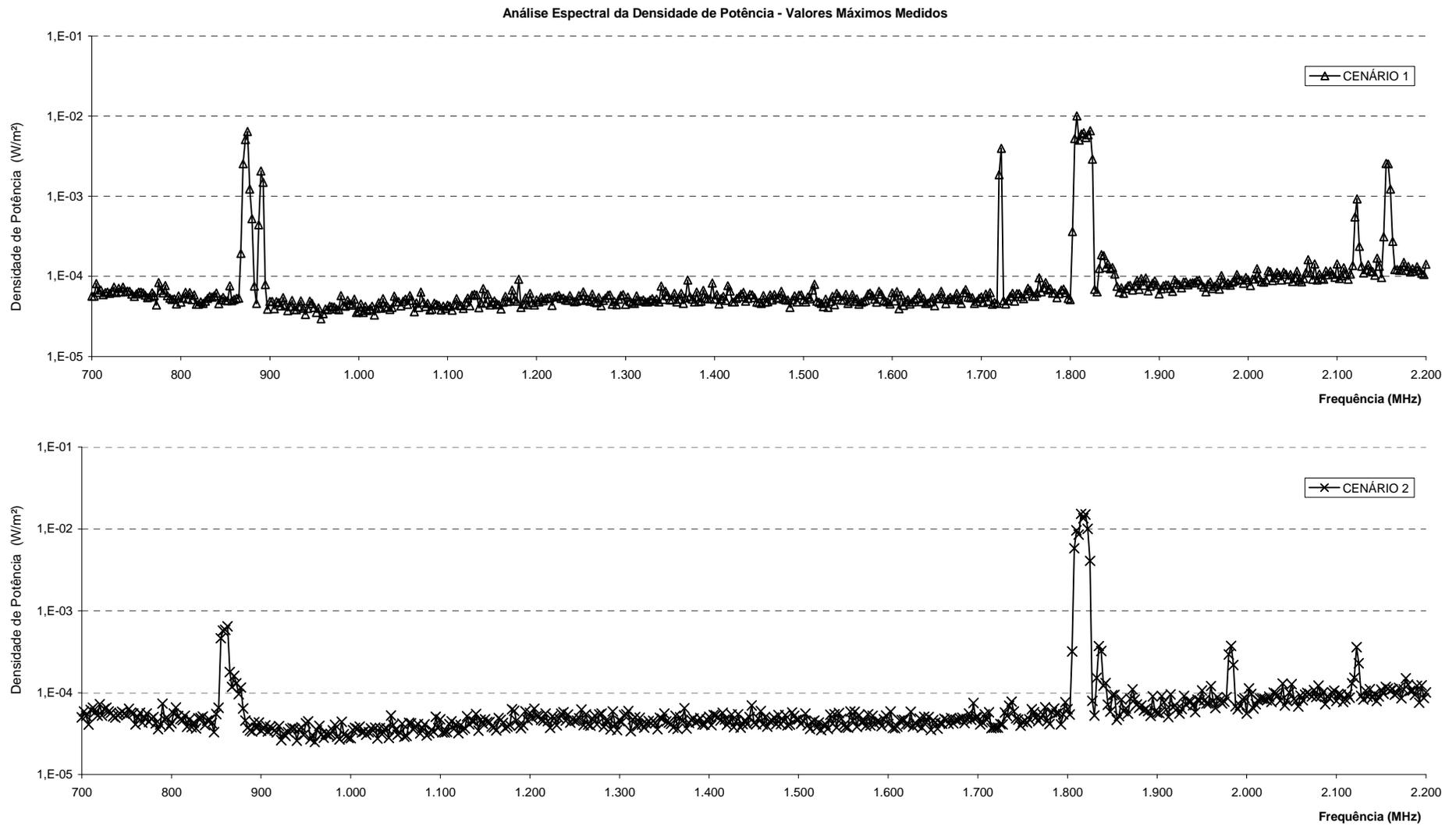
para cada frequência, qual é o valor de densidade de potência máximo observado durante o intervalo de medição. Os valores são registrados conforme mostra a tabela 8.6.

**Tabela 8.6 - Campos dos registros - análise espectral.**

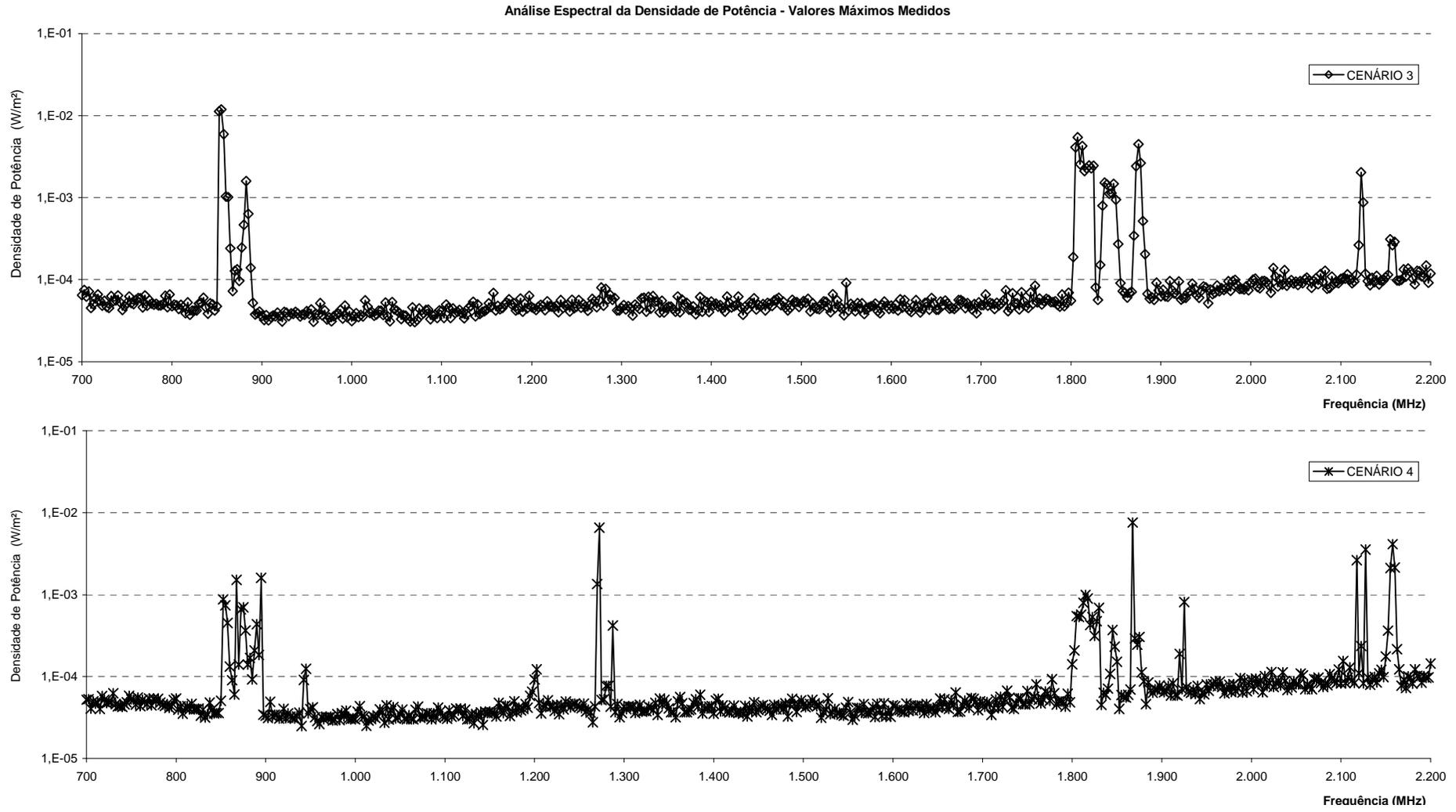
Index	249,1
Dataset Version	3
Dataset Type	SPEC
Store Mode	MAN
Date	03/26/2009
Time	15:01:36
Fmin [Hz]	700000000
Fmax [Hz]	2200000000
RBW [Hz]	5000000
Meas. Range [W/m <sup>2</sup> ]	1,60E-02
Unit	W/m <sup>2</sup>
Result Type	MAX
Average Type	NUMBER
Average Time [s]	360
Number of Averages	4
Threshold [W/m <sup>2</sup> ]	2,50E-05
Y-Scale Ref [W/m <sup>2</sup> ]	1,60E-02
Y-Scale Range [dB]	100
Axis	RSS
Standard Name	
Service Table Name	Full Band EU
Device Serial No.	M-0036
Device Calibration Date	10/17/2007
Device Firmware Version	SRM-FW V1.5.6
Cable Name	
Cable Serial No.	
Cable Calibration Date	
Antenna Name	3AX 75M-3G
Antenna Serial No.	H-0192
Antenna Calibration Date	10/9/2007
Comment	
No. of SAVG:	0
Average Flag	OK
Overdrive Flag	OK
Frequency Resolution [Hz]	2500000
Frequency [Hz]	Value [W/m <sup>2</sup> ]
700000000	1,31E-07
702500000	1,36E-07
705000000	6,73E-08
...	...
...	...
...	...
2190000000	3,33E-07
2192500000	2,05E-07
2195000000	2,10E-07
2197500000	3,08E-07
2200000000	3,95E-07

Na tabela 8.6, inicialmente são apresentados os parâmetros configurados e, em seguida, os valores da frequência em Hz e os valores de densidade de potência, em W/m<sup>2</sup>. As figuras 8.25 e 8.26 ilustram os resultados para os cenários com base nos registros de Análise Espectral obtidos. Nela, pode-se observar os picos de densidade de

potência nas faixas de 800 MHz (bandas A e B de telefonia móvel), 1800 MHz (bandas D, E e subfaixas de extensão) e 2100 MHz (bandas F,G,H,I e J).



**Figura 8.25 - Valores máximos medidos de densidade de potência para os cenários 1 e 2.**



**Figura 8.26 - Valores máximos medidos de densidade de potência para os cenários 3 e 4.**

A segunda forma de coleta de dados, a Avaliação de Segurança, fornece uma visão geral dos valores de densidade de potência por “serviço”, o que permite uma imediata avaliação de conformidade indicando as contribuições de cada banda de frequência de interesse para o nível de exposição geral. Os valores são registrados conforme apresenta a tabela 8.7:

**Tabela 8.7 - Campos dos registros - avaliação de segurança.**

Index	252,1			
Dataset Version	3			
Dataset Type	TAB			
Store Mode	MAN			
Date	03/26/2009			
Time	15:04:38			
Fmin [Hz]	876000000			
Fmax [Hz]	2170000000			
RBW [Hz]	500000			
Meas. Range [W/m <sup>2</sup> ]	1,60E-02			
Unit	W/m <sup>2</sup>			
Result Type	MAX			
Average Type	NUMBER			
Average Time [s]	360			
Number of Averages	4			
Noise Threshold Factor [dB]	0			
Noise Threshold	OFF			
Threshold [W/m <sup>2</sup> ]	1,60E-04			
Display	DETAIL			
Axis	RSS			
Standard Name				
Service Table Name	Full Band EU			
Device Serial No.	M-0036			
Device Calibration Date	10/17/2007			
Device Firmware Version	SRM-FW V1.5.6			
Cable Name				
Cable Serial No.				
Cable Calibration Date				
Antenna Name	3AX 75M-3G			
Antenna Serial No.	H-0192			
Antenna Calibration Date	10/9/2007			
Comment				
No. of SAVG:	0			
Average Flag	OK			
Overdrive Flag	OK			
Total Value [W/m <sup>2</sup> ]	2,95E-04			
Total Noise Flag	UNCHECKED			
Others Value [W/m <sup>2</sup> ]	4,17E-05			
Other Noise Flag	UNCHECKED			
Value [W/m <sup>2</sup> ]	Noise Flag	Service Name	Lower Frequency [Hz]	Upper Frequency [Hz]
1,05E-05	UNCHECKED	GSM-R	876000000	880000000
3,65E-05	UNCHECKED	GSM 900	890000000	960000000
1,16E-04	UNCHECKED	GSM 1800	1710000000	1880000000
4,51E-06	UNCHECKED	UMTS-TDD	1900000000	2025000000
8,57E-05	UNCHECKED	UMTS DL	2110000000	2170000000

Assim como na Análise Espectral, na tabela 8.7 são apresentados os parâmetros configurados. Entretanto, neste modo, os valores de densidade de potência, em W/m<sup>2</sup>,

são somados para toda a banda de frequências que identifica um determinado serviço. Desta forma, é possível visualizar a contribuição total para cada serviço configurado no equipamento.

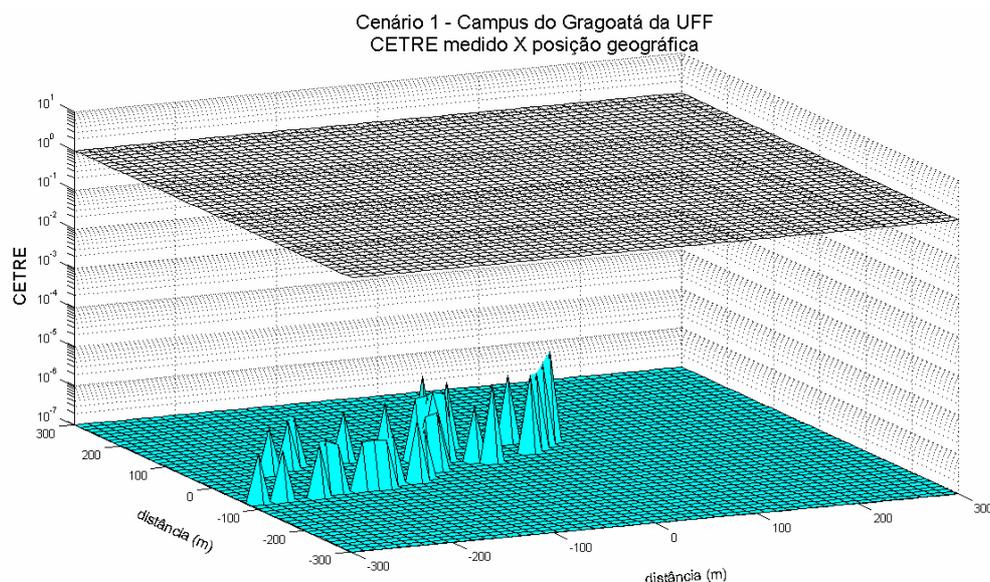
Para cada ponto analisado, foram registradas as duas formas de medição, além da posição associada a cada ponto.

#### **8.4. Análise comparativa entre o modelo teórico e as medições realizadas**

De posse dos valores reais medidos e dos valores calculados, resta fazer uma análise comparativa entre ambos. A seguir, serão expostos os resultados obtidos para cada cenário. Conforme já foi discutido na introdução do capítulo 8, espera-se que os valores obtidos nas medições sejam menores ou, em caso extremo, iguais aos valores teóricos, uma vez que durante toda a modelagem foram consideradas condições de “pior caso”, ou seja, condições extremamente conservadoras.

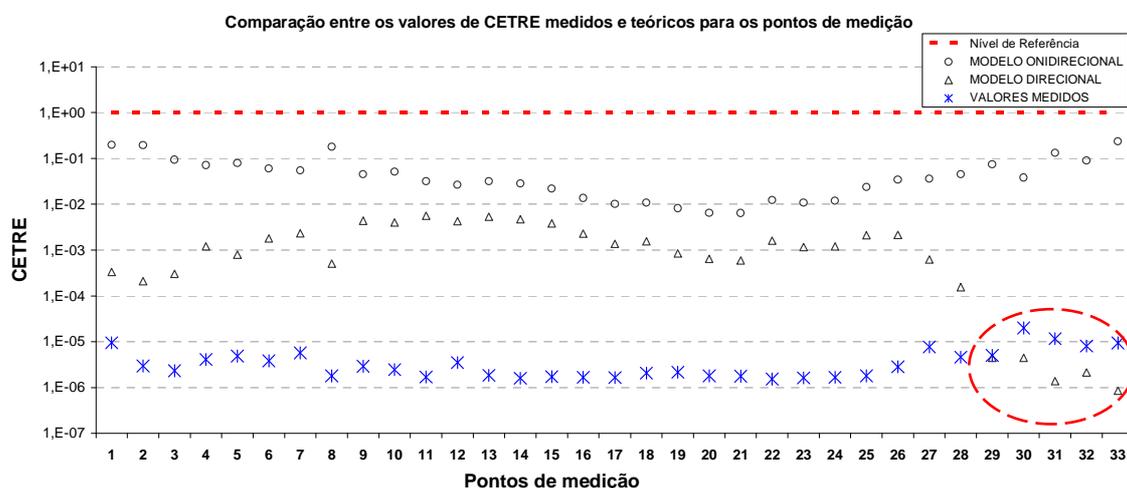
##### **8.4.1. Cenário 1 – Campus do Gragoatá da UFF**

A figura 8.27 mostra a distribuição espacial dos valores medidos para cada ponto de análise do cenário 1, bem como o nível de referência para atendimento às normas vigentes (plano superior em  $CETRE = 10^0$ ). As distâncias, para o caso deste cenário, são relativas à Estação Rádio Base da Oi (684126605), a qual está situada, desta forma, nas coordenadas (0,0) da figura. É possível observar que os valores encontram-se bem abaixo do nível de referência.



**Figura 8.27 - Valores medidos do CETRE para cada ponto de análise do cenário 1 – Campus do Gragoatá da UFF.**

A figura 8.28 apresenta uma análise comparativa entre os valores medidos em cada ponto (P1 a P33) e os valores calculados por modelagem utilizando o modelo que considera as propriedades diretivas das antenas (modelo direcional) e o modelo onidirecional, que considera todas as antenas como sendo antenas onidirecionais com ganho máximo igual ao da respectiva antena diretiva (modelo conservador).



**Figura 8.28 - Resultados obtidos para o cenário 1 – Campus do Gragoatá da UFF.**

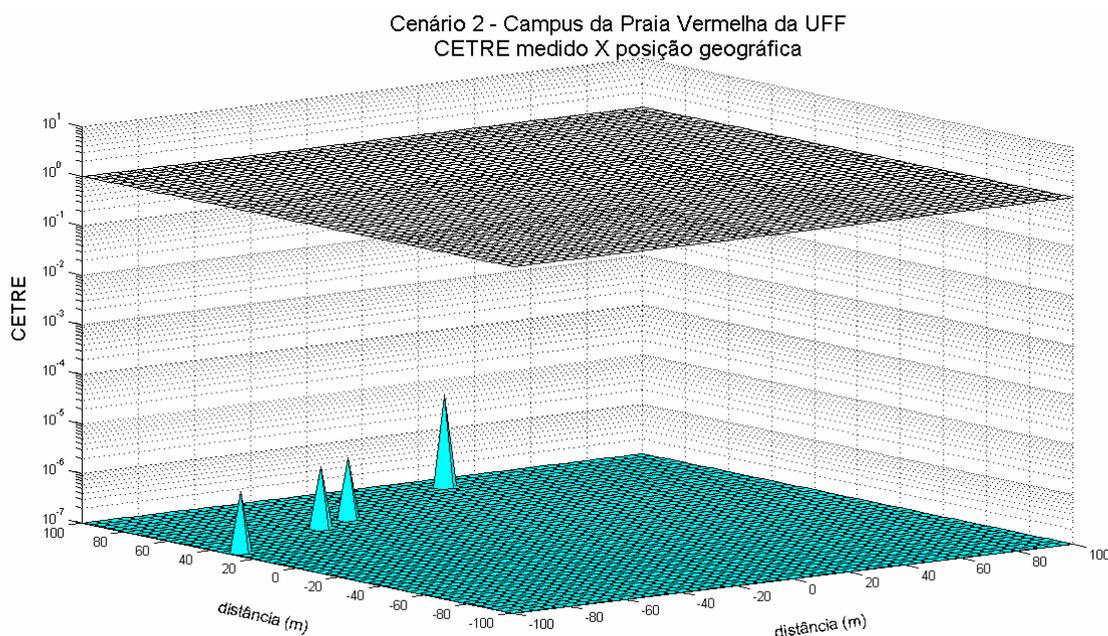
É possível observar que, em alguns pontos de medição (P29 a P33), os valores medidos ultrapassam os obtidos por simulação, o que não era esperado, uma vez que o modelo durante toda sua concepção assume as condições de “pior caso”. A justificativa para tal distorção se dá pelo fato de ter sido observado, durante as medições, que as informações de antenas constantes na base de dados da ANATEL não correspondem às

verificadas no local. Os pontos P25 a P33, localizados ao norte em relação à ERB, foram medidos justamente com o objetivo de identificar os níveis de campo recebidos em função da existência de uma antena direcionada para o norte na ERB 667979077 (Oi) da figura 8.18. Conforme mostra a tabela 8.1, que apresenta os valores cadastrados na ANATEL e a representação gráfica destes setores na figura 8.3(a), pode-se verificar a inexistência da antena nesta direção.

Outro fato observado é que o modelo direcional produz resultados mais próximos aos medidos, quando comparado ao modelo onidirecional.

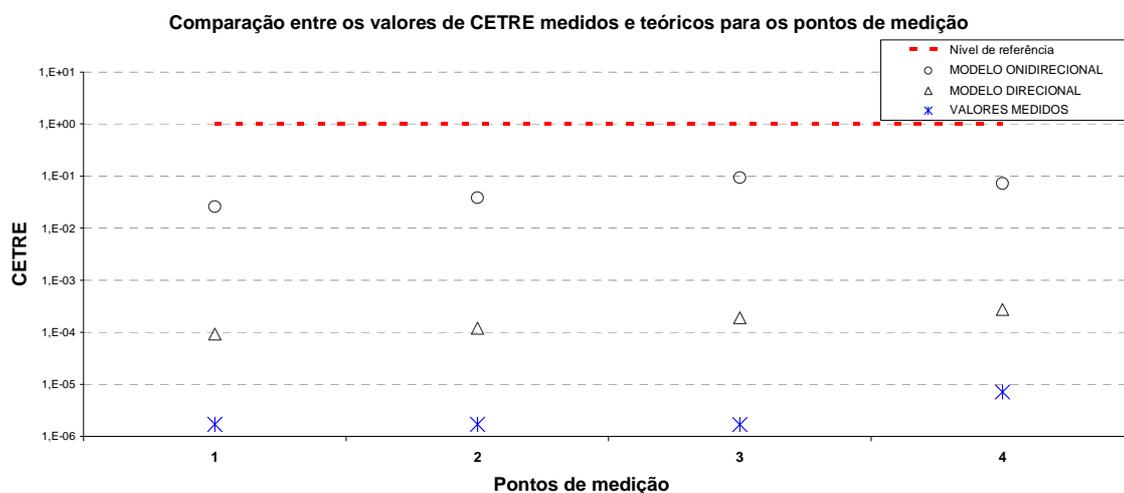
#### 8.4.2. Cenário 2 – Campus Praia Vermelha da UFF

O cenário 2 possui vegetação intensa, apresentando elevado grau de obstrução da linha de visada e absorção da potência irradiada pelas antenas das ERB's. Desta forma, foram encontrados poucos pontos de medição, em função da necessidade de visada direta do instrumento de medição à antena. A figura 8.29 mostra a distribuição espacial dos valores medidos para cada ponto de análise do cenário 2, bem como o nível de referência para atendimento às normas vigentes (plano superior em CETRE =  $10^0$ ). As distâncias são relativas à Estação Rádio Base, a qual está situada, desta forma, nas coordenadas (0,0) da figura. É possível observar que os valores encontram-se bem abaixo do nível de referência.



**Figura 8.29 - Valores medidos do %CETRE para cada ponto de análise do cenário 2 – Campus Praia Vermelha da UFF.**

A figura 8.30 apresenta a análise comparativa entre os valores medidos em cada ponto (P1 a P4) e os valores calculados por modelagem:

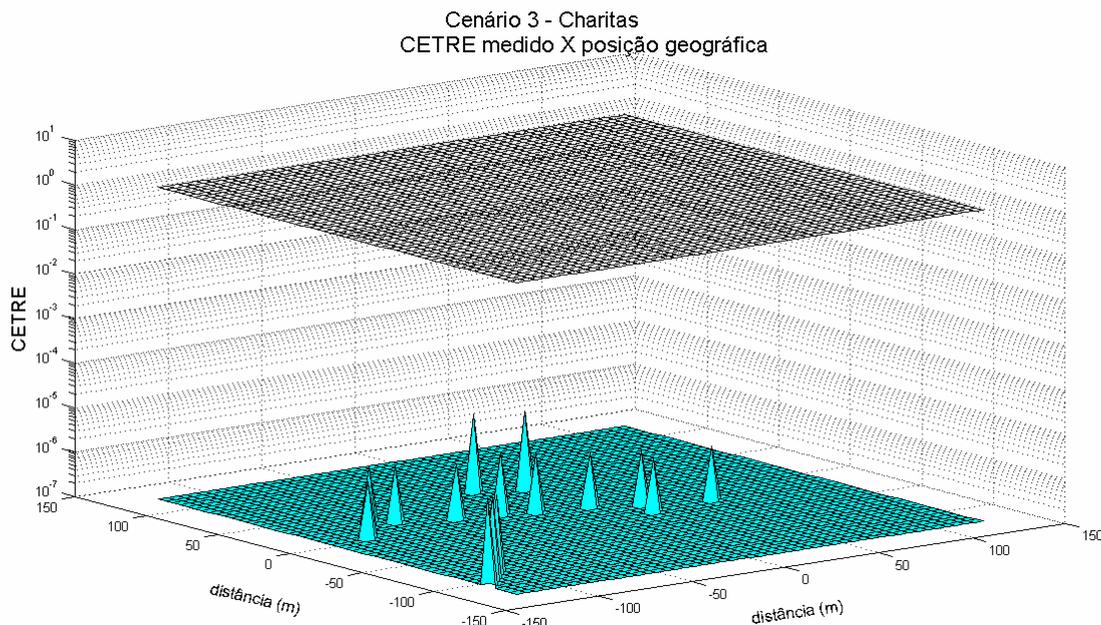


**Figura 8.30 - Resultados obtidos para o cenário 2 – Campus Praia Vermelha da UFF.**

A comparação entre os modelos teóricos (direcional e onidirecional) mostra a permanência dos valores medidos abaixo dos calculados e muito abaixo do nível de referência.

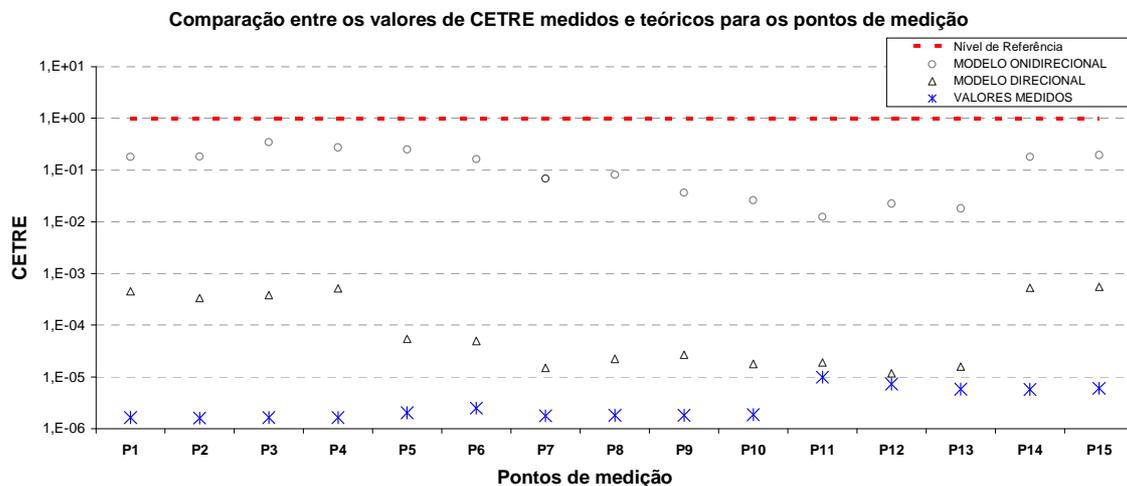
### 8.4.3. Cenário 3 – Charitas

A figura 8.31 mostra a distribuição espacial dos valores medidos para cada ponto de análise do cenário 3, bem como o nível de referência para atendimento às normas vigentes (plano superior em  $\text{CETRE} = 10^0$ ). As distâncias são relativas à Estação Rádio Base, a qual estaria situada nas coordenadas (0,0) da figura. Observa-se que os valores encontram-se bem abaixo do nível de referência.



**Figura 8.31 - Valores medidos do %CETRE para cada ponto de análise do cenário 3 – Charitas.**

Neste cenário, da mesma forma como nos demais, todos os valores medidos estão abaixo dos valores calculados para cada ponto, o que corrobora a eficácia do modelo, conforme pode ser observado na figura 8.32.

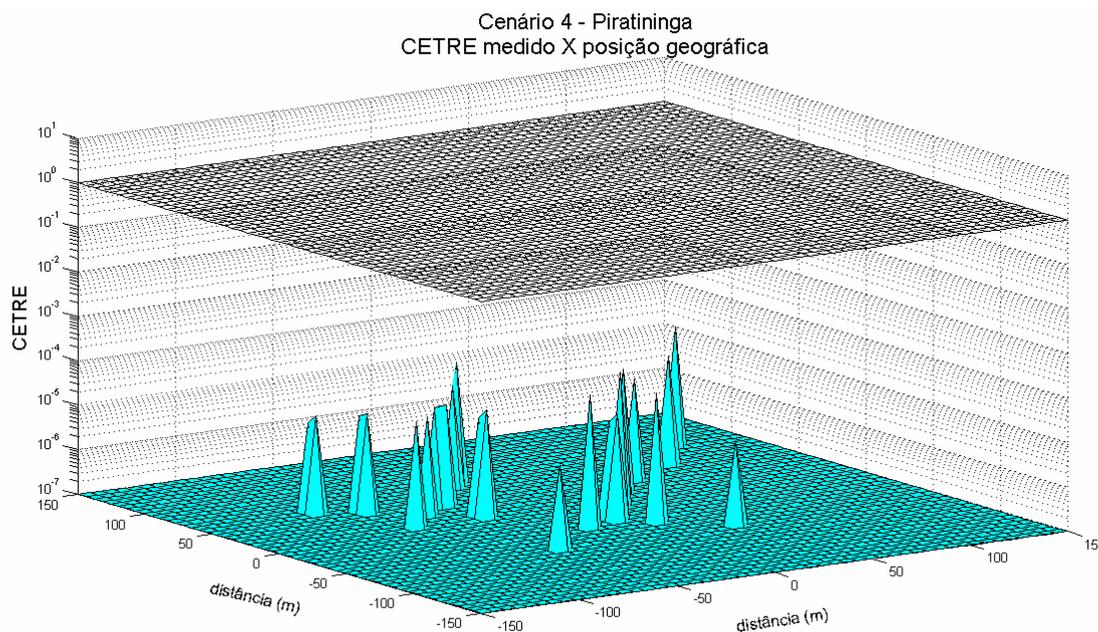


**Figura 8.32 - Resultados obtidos para o cenário 3 – Charitas.**

Foram observados valores bem próximos aos calculados em alguns pontos. Os pontos 14 e 15 foram medidos, com autorização dos proprietários, dentro de residência próxima ao local de instalação da ERB, dada a constatação da existência de antenas direcionadas para estas residências. Todos os valores medidos encontram-se abaixo do nível de referência, mas nestes pontos, especificamente, foram verificados valores mais altos.

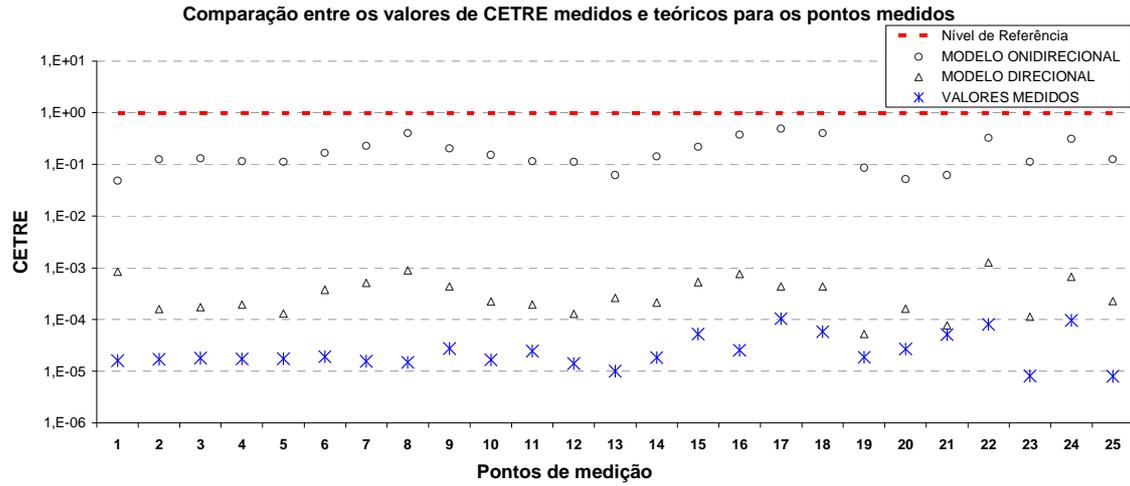
#### 8.4.4. Cenário 4 – Piratininga

A figura 8.33 mostra a distribuição espacial dos valores medidos para cada ponto de análise do cenário 4, bem como o nível de referência para atendimento às normas vigentes (plano superior em %CETRE =  $10^0$ ). As distâncias são relativas à Estação Rádio Base, a qual está situada nas coordenadas (0,0) da figura. Observa-se que os valores encontram-se bem abaixo do nível de referência.



**Figura 8.33 - Valores medidos do %CETRE para cada ponto de análise do cenário 4 – Piratininga.**

O cenário 4, apresentado na figura 8.35, da mesma forma que os anteriores, apresenta valores mais conservadores e próximos dos níveis de referência para o modelo isotrópico e resultados próximos aos medidos para o modelo direcional.



**Figura 8.34 - Resultados obtidos para o cenário 4 – Piratininga.**

## 9. Conclusões

Esta dissertação reflete um trabalho de investigação profundo sobre as Radiações Não Ionizantes (RNI) e os efeitos térmicos causados por CEMRF, gerados por sistemas celulares instalados em locais multiusuários, sob os pontos de vista teórico e prático. O desenvolvimento foi feito através de uma abordagem técnica, envolvendo o desenvolvimento de um programa computacional para verificação do atendimento aos níveis de referência exigidos pela ANATEL e a realização de medições em campo.

Este trabalho apresentou, inicialmente, um paralelo entre a evolução dos sistemas celulares e o aumento da preocupação da população com eventuais danos à saúde decorrentes dos efeitos térmicos, em função do crescimento do número de ERB's.

Para estabelecer uma base de conhecimento sobre os níveis de referência adotados mundialmente, foi realizada uma análise comparativa entre os mesmos. Foi ressaltada a diferença acentuada entre os níveis de referência adotados por países mais conservadores, como a Rússia e a China, e os recomendados pela ICNIRP, os quais foram efetivamente adotados pela maioria dos países, entre eles o Brasil, através da Resolução 303/02 da ANATEL. Foram discutidos, ainda, os aspectos técnicos desta Resolução, que estabelece os níveis de referência para a exposição humana a CEMRF entre 9 kHz e 300GHz.

Com base na análise da Resolução 303/02 da ANATEL, com especial enfoque no que tange aos ambientes multiusuários, ou seja, compartilhamento de infraestrutura por operadoras de sistemas celulares, gerando campos de frequências múltiplas, foram discutidas todas as principais variáveis que podem exercer influência significativa no cálculo dos níveis de radiação e, conseqüentemente, na verificação do atendimento aos níveis recomendados. Como resultado desta discussão, foi proposto um modelo que considera todas estas variáveis. Foi apresentado, ainda, o conceito de “Zonas de Concentração” como resposta ao conceito de “distância mínima segura”, uma vez que os máximos de densidade de potência ocorrem a diferentes distâncias da ERB, dependendo, principalmente, das características de irradiação das antenas, formando zonas de concentração de RNI. Foi mostrado que a análise da distância mínima segura se mostra excessivamente mais restritiva, caso seja adotada a proposta de se considerar

todas as antenas como sendo onidirecionais e com ganho máximo igual ao da antena diretiva.

A fim de possibilitar a aplicação direta dos modelos propostos, foi desenvolvido um programa computacional, capaz de gerar relatórios técnicos para a verificação do atendimento aos níveis de referência recomendados pela ANATEL, em uma estação composta por diversos equipamentos, antenas e tecnologias. Foi realizada, ainda, uma campanha de medições na cidade de Niterói / RJ, com o intuito de verificar a eficácia tanto dos modelos teóricos propostos, quanto do programa computacional desenvolvido.

Os resultados apresentados no decorrer deste trabalho permitem concluir que o Modelo Onidirecional revela-se bastante conservador, com valores muito acima dos valores reais medidos, ao passo que o Modelo Direcional apresenta-se como uma boa aproximação para os valores reais medidos, por considerar as propriedades de irradiação das antenas. Permite, ainda, a determinação das zonas de concentração de RNI, ou seja, áreas críticas, onde existe uma maior probabilidade de exposição a níveis mais altos deste tipo de radiação. Desta forma, o modelo direcional representa, mais precisamente, o comportamento dos CEMRF em um ambiente multiusuário.

As diversas medições dos CEMRF realizadas demonstraram que a população está normalmente exposta a níveis muito baixos de radiação nos ambientes próximos às ERB's. Entretanto, existe a necessidade de se conhecer estes níveis, e o desenvolvimento de novas ferramentas baseadas no modelo proposto neste trabalho pode ajudar a predizê-los com razoável grau de precisão. A utilização destas ferramentas deve ser feita na fase de planejamento e teste de uma ERB, introduzindo, assim, a consideração de aspectos de segurança nos sistemas de planejamento atuais.

A aplicação do modelo proposto, neste trabalho, na esfera governamental pode ajudar a direcionar melhor as equipes de fiscalização do órgão responsável (ANATEL, no caso do Brasil) para as estações que apresentem maiores níveis de radiação, aumentando, desta forma, a eficiência na utilização de recursos, face ao elevado número de ERB's atualmente existentes. Há, ainda, a possibilidade da adoção, pela ANATEL, de um modelo padrão para avaliação de RNI para ambientes multiusuários, baseado neste trabalho.

## **9.1. Sugestões para trabalhos futuros**

Sugere-se, para a realização de trabalhos futuros:

- Inclusão de análise baseada nos modelos de propagação para os diferentes cenários;
- Avaliação do modelo em Sistemas Wi-Max e outros sistemas e faixas de frequências;
- Consideração das características geográficas no entorno da ERB, para os cálculos, como, por exemplo, relevo, construções, etc.

## Bibliografia

- [1] MILARÉ, Édís; SETZER, Joana. ACEL - Campos eletromagnéticos: aplicação do princípio da precaução. Brasília, 2005.
- [2] CVS - Centro de Vigilância Sanitária. Relatório Final do Grupo Técnico de Trabalho criado pela Portaria CVS n. 13, de 28 de julho de 2003. Boletim Epidemiológico Paulista. São Paulo: comunicado CVS 042/2004. Disponível em: [http://www.cve.saude.sp.gov.br/agencia/bepa\\_suple.htm](http://www.cve.saude.sp.gov.br/agencia/bepa_suple.htm). Acesso em: 27 Nov. 2008.
- [3] OMS. Estabelecendo um diálogo sobre riscos de campos eletromagnéticos. 2002
- [4] BALZANO, Q ;FARAONE, A. - IEEE - Human exposure to cellular base station antennas, Electromagnetic Compatibility, 1999 IEEE International Symposium on, Ago. 1999
- [5] A. FARAONE, et al.: Estimation of the Average Power Density in the Vicinity of Cellular Base Station Antenna, IEEE Trans. On Vehicular Technology, Vol. 49, No 3, pp. 984 - 996, Mai. 2000.
- [6] BERNARDI, P; CAVAGNARO, M; PISA, S; PIUZZI, E. - IEEE - Human exposure to radio base-station antennas in urban environment, Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on - Nov. 2000
- [7] COOPER, J; MARX, B; BUHL, J; HOMBACH, V. Determination of safety distance limits for a human near a cellular base station antenna, adopting the IEEE standard or ICNIRP guidelines - Bioelectromagnetics Volume 23, Issue 6 , Pages429 - 443 Fev. 2002.
- [8] ROJE, V. Wire Antenna Theory Applied to the Assessment of the Radiation Hazard in the Vicinity of the GSM Base Stations - Serbian Journal of Electrical Engineering Vol. 1, No. 1, 15 - 26, Nov. 2003
- [9] S. MICLAUS; P. BECHET. Estimated and measured values of the radiofrequency radiation power density around cellular base station, 7th International Balkan Workshop on Applied Physics; Romênia – Set. 2006
- [10] IEC, Determination of RF Fields in the Vicinity of Mobile Communication Base Stations for the Purpose of Evaluating Human Exposure, IEC62232 Ed.1 CD, 2008.
- [11] DIAS, M. H. C ; SIQUEIRA, G. L. Considerações sobre os efeitos à saúde Humana da Irradiação Emitida por Antena de Estações Rádio-Base de Sistemas Celulares. Revista científica periódica - Telecomunicações Volume 05 Número 01- Jun. 2002.
- [12] TERADA, MARCO A. B. Propriedades Direcionais de Irradiação de Antenas Rádio-Base. Brasília, Revista Científica Periódica - Telecomunicações, Vol. 09, No. 02, Jul. 2007.

- [13] ULBRICH, H. J. G. Formação e Ocupação de Bandas para Telefonia Celular - Tutoriais Teleco, 2007
- [14] PINHEIRO, P. R. G. Ciclos Evolutivos das Telecomunicações - Tutoriais Teleco, 2004
- [15] ANATEL. Agência Nacional de Telecomunicações, Dados do SMP. Fev. 2009.
- [16] ANATEL. Missão, atribuições e características, disponível em [www.anatel.gov.br](http://www.anatel.gov.br), acesso em Nov. 2008.
- [17] ANATEL. Regulamento sobre Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de Radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz, Resolução N.º 303, de 2 de julho de 2002.
- [18] WHO. EMF Project - <http://www.who.int/peh-emf/>. Acesso em Março de 2009.
- [19] GIULIANI, L. ISPEL - Reasons for Disagreement Between European Council and Italy Concerning Protection Against Health Impacts from EMF, National Institute of Occupational Safety and Prevention. 1999.
- [20] GRIGORIEV, Y. RNCNIRP - New conditions of EMF RF exposure and guarantee of the health to population. 2008.
- [21] ICNIRP. Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz), Health Phys., vol. 74, pp. 494–522, 1998.
- [22] DURNEY, C. H; MASSOUDI, H; LSKANDER, M. F. Radiofrequency Radiation Dosimetry Handbook, Electrical Engineering Department - The University of Utah, Salt Lake City. Out. 1986.
- [23] ANATEL. Regulamento sobre Condições de Uso de Radiofrequências nas Faixas de 800 MHz, 900 MHz, 1.800 MHz, 1.900 MHz e 2.100 MHz., Resolução N.º 454, de 11 de Dez. 2006.
- [24] BALANIS, C.A. Antenna Theory - Analysis And Design (2nd Ed) - John Willey & Sons Inc, 1997.

## Obras consultadas

ARPANSA. Levels of Radiofrequency Radiation from GSM Mobile Telephone Base Stations - Per Line, Wayne A. Cornelius, Michael J. Bangay and Monica Grollo. Jan. 2000.

ANATEL. Agência Nacional de Telecomunicações, Diretrizes para Limitação da Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos Variáveis no Tempo (Até 300 GHz). Disponível em: [http://www.anatel.gov.br/Tools/frame.asp?link=/radiofrequencia/diretriz\\_radiacao.pdf](http://www.anatel.gov.br/Tools/frame.asp?link=/radiofrequencia/diretriz_radiacao.pdf) - Acesso em 11 de fevereiro de 2008.

CARDOSO, S. A. Radiações Não Ionizantes emitidas pelas Estações Rádio Base do Sistema Móvel Celular. Monografia (Curso de Especialização em Regulação de Telecomunicações) - Departamento de Engenharia Elétrica. Brasília: Universidade de Brasília, 2004.

JAKHU, R. S. International Regulatory Aspects of Radio Spectrum Management. Disponível em: <http://www.law.mcgill.ca/institutes/csri/paper-jakhu-international.php3>. Acesso em 29 de agosto de 2008.

KATZ, E. Biosensors & Bioelectronics. The Hebrew University of Jerusalem – Faculty of Science – Institute of Chemistry. Disponível em: <http://chem.ch.huji.ac.il/~eugeniik/history/arsonval.html>. Acesso em 18 de maio de 2005.

MC. Ministério das Comunicações. Exposição de Motivos nº 231, documento de encaminhamento da Lei Geral das Telecomunicações. Dez. 1996

PAULINO, J. O. S. Radiações Eletromagnéticas Não Ionizantes emitidas pelas Antenas Fixas de Telefonia Celular. Departamento de Engenharia Elétrica – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. 2001.

OLOLOSKA, L; JANEV, L; LOSKOVSKA, S. IEEE - A determination and analysis of high frequency EMF influence on human exposed on plane wave incident field. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2005 IEEE. Volume 3A, 3-8, Páginas (s):823 - 826 vol. 3A. Jul. 2005

LOSKOVSKA, S; OLOLOSKA, L; JANEV, L. IEEE - Visualization of electromagnetic fields in individuals exposed to radio frequency electromagnetic fields. Antennas and Propagation Society International Symposium, 2002. IEEE. Volume 1, 16-21, páginas 456 - 459 vol.1. Jun. 2002.

THORS, B; STRYDOM, M.L; HANSSON, B; MEYER, F; KARKKAINEN, K.; ZOLLMAN, P; ILVONEN, S; TORNEVIK, C. On the Estimation of SAR and Compliance Distance Related to RF Exposure From Mobile Communication Base Station Antennas. Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on Volume 50, Issue 4, páginas 837 – 848. Nov. 2008.

CENELEC. Basic Standard for the Calculation and Measurement of Electromagnetic Field Strength and SAR Related to Human Exposure From Radio Base Stations and Fixed Terminal Stations for Wireless Telecommunication Systems (110MHz to40GHz), CENELECEN50383, B.Tech.Committee 211, European Committee for Electrotechnique Standardization, Ago. 2002.

OLIVEIRA C; CARPINTEIRO G; CORREIA L. Exposição à radiação eletromagnética de antenas de estação base de GSM e UMTS - IX Jornadas da Sociedade Portuguesa de Proteção contra Radiações, Lisboa, Nov. 2002.

WAYNE A; MICHAEL J; GROL. M. Levels of Radiofrequency Radiation from GSM Mobile Telephone Base Stations - Australian radiation protection and nuclear safety agency, Technical Report 129, Jan. 2000.