

# RADIAÇÕES ELETROMAGNÉTICAS E CONTORNO DE PROTEÇÃO A VIDA NA FAIXA DE 50MHZ A 3GHZ

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À  
UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
COMO PARTE DOS REQUISITOS EXIGIDOS  
PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA.

por

Roberto da Costa e Silva

Abril 2001

# Abstract

This dissertation concerns about the behavior of a plane wave inciding on a human being. Based on the human body's dielectric constants and on the layer model that represents a human, the values of SAR and of induced electric field are calculated. Considering the communication system that uses the band between 50MHz and 3GHz, and being based on Anatel's policy as well as a large sort of articles, that cover the non-thermal effects of radiation and having in sight real measures of radiation taken at Salvador, it's proposed a outline of life protection, aiming to be part of FM's, TV's and wireless telephony's projects, in such a manner that the technical projects are conciliated with human helth.

# Resumo

Esta dissertação trata do comportamento de uma onda plana incidindo sobre um ser humano. Com base nas constantes dielétricas do corpo humano e do modelo em camadas adotado para representar um ser vivo, são calculados os valores induzidos de campo elétrico e SAR no corpo. Levando-se em consideração os sistemas de comunicações utilizados na faixa de 50MHz a 3GHz, e baseando-se na diretriz da Anatel bem como diversos artigos, que abordam os efeitos não térmicos das radiações e tendo em vista medidas reais de radiação obtidas em Salvador, um contorno de proteção a vida é proposto, visando fazer parte dos projetos de radio FM, Televisão e Telefonia sem fio, de modo a conciliar os projetos técnicos com a saúde humana.

# Agradecimentos

Ao Professor Antonio Cezar, pela orientação recebida durante o desenvolvimento deste trabalho.

A Professora Cristina Abreu pela ajuda nas pesquisas.

A Noris, minha eterna musa pela ajuda, apoio e incentivo.

# Lista de Símbolos

$E$  = campo elétrico em V/m

$W$  = energia da onda eletromagnética em J

$P$  = potência da onda eletromagnética em W

$W_v$  = densidade volumétrica de energia em J/m<sup>3</sup>

$P_v$  = densidade volumétrica de potência em W/m<sup>3</sup>

$v$  = volume do corpo onde a onda inside em m<sup>3</sup>

$m$  = massa do corpo em Kg

$\rho$  = densidade do corpo em Kg/m<sup>3</sup>

$\sigma$  = condutividade do corpo em S/m

$t$  = tempo em s

SAR = taxa de absorção específica

$c$  = calor específico do corpo em J/kg\*K

$E_f$  = energia do fóton em J

$h$  = constante de Plank em J/Hz

$\nu$  = frequência da onda em Hz

$D$  = densidade de fluxo elétrico em C/m

$P$  = polarização do meio em C/m

$\epsilon_0$  = constante dielétrica do vácuo em F/m

$\epsilon_r^*$  = constante dielétrica relativa

$\alpha_t$  = polarizabilidade media da célula  
 $\alpha_i$  = polarizabilidade devido aos íons  
 $\alpha_e$  = polarizabilidade devido aos elétrons  
 $C$  = capacitância em F  
 $G$  = condutância em  $\Omega^{-1}$   
 $\varepsilon_r$  = constante dielétrica relativa complexa  
 $\varepsilon$  = constante dielétrica complexa em F/m  
 $A$  = área em  $m^2$   
 $d$  = distância em m  
 $w$  = frequência angular em rad/s  
 $\tau_t$  = tempo de resposta em s  
 $\varepsilon'$  = parte real da constante dielétrica  
 $\varepsilon''$  = parte imaginária da constante dielétrica  
 $\varepsilon_i$  = constante dielétrica em frequência nula  
 $\varepsilon_f$  = constante dielétrica em frequência muito alta  
 $\sigma_i$  = condutividade em frequência nula  
 $\sigma_f$  = condutividade em frequência muito alta  
 $\sigma_i$  = condutividade em frequência  
 $W_d$  = densidade de energia em W/Hz  
 $v$  = velocidade em m/s  
 $m$  = mobilidade iônica em  $m^2/V * s$   
 $V$  = tensão em V  
 $I$  = corrente em A  
 $H$  = campo magnético em A/m  
 $\mu$  = permeabilidade magnética em h/m  
 $\gamma$  = constante de propagação do meio em  $m^{-1}$   
 $\alpha$  = fator de atenuação

$\beta$  = número de onda

$\eta$  = impedância intrínseca do meio

$Z$  = impedância em  $\Omega$

$\rho$  = coeficiente de reflexão

$\tau$  = coeficiente de transmissão

$L$  = distância em m

$m_f$  = índice de modulação de frequência

$m_a$  = índice de modulação de amplitude

$B$  = largura de banda em Hz

$\Delta F$  = desvio de frequência em Hz

$T_s$  = tempo de duração de um símbolo em s

$T_b$  = tempo de duração de um bit

$N_0$  = densidade espectral de ruído em W/Hz

$F$  = fator de ruído

$k$  = constante de Boltzmann

$Q$  = função erro

$P_e$  = probabilidade de erro

$\theta$  = fase em radianos

$E_b$  = energia por bit em J/bit

# Índice

<b>Abstract</b>	<b>ii</b>
<b>Resumo</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimentos</b>	<b>iv</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>v</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Comentários Iniciais . . . . .	1
1.1.1 Telefonia Celular como Bode Expiatório . . . . .	2
1.1.2 Normas de Proteção . . . . .	3
1.2 Apresentação do Problema . . . . .	9
1.3 Conteúdo desta Dissertação . . . . .	11
<b>2 Comportamento Elétrico do Corpo Humano</b>	<b>13</b>
2.1 Bioeletricidade . . . . .	13
2.1.1 Origem . . . . .	13
2.1.2 Moléculas . . . . .	15
2.1.3 Células . . . . .	16
2.1.4 Músculos e Sistema Nervoso Central . . . . .	18

2.1.5	Coração . . . . .	22
2.1.6	Cérebro . . . . .	23
2.2	Constantes do Corpo Humano . . . . .	23
2.3	Radiações Ionizantes e Não Ionizantes . . . . .	35
2.4	Resumo . . . . .	38
<b>3</b>	<b>Sistemas de Telecomunicações</b>	<b>40</b>
3.1	Objetivo . . . . .	40
3.2	Ondas Planas . . . . .	40
3.3	Ondas Moduladas . . . . .	49
3.4	Valores adotados em projetos . . . . .	57
<b>4</b>	<b>Normas Existentes</b>	<b>59</b>
4.1	Introdução . . . . .	59
4.2	Efeitos biológicos no corpo humano . . . . .	60
4.2.1	Sistema Nervoso . . . . .	60
4.2.2	Câncer . . . . .	63
4.2.3	Coração . . . . .	64
4.2.4	Reprodução . . . . .	64
4.3	Diretrizes para limitação a exposição de ondas eletromagnéticas . . . . .	66
4.3.1	Resumo da diretriz da Anatel . . . . .	67
4.3.2	Norma Russa . . . . .	72
4.3.3	Norma Italiana . . . . .	72
4.3.4	Norma Suíça . . . . .	72
4.3.5	Norma CEPRAM Bahia . . . . .	73
4.3.6	Leis Municipais . . . . .	73
4.4	Comentários . . . . .	73

<b>5</b>	<b>Campo Elétrico e Medidas Realizadas</b>	<b>75</b>
5.1	Modelo adotado . . . . .	75
5.2	Cálculo do campo elétrico . . . . .	78
5.2.1	Programa para o cálculo do campo elétrico e da distribuição da SAR na cabeça . . . . .	79
5.2.2	Programa para o cálculo do campo elétrico e da distribuição de SAR na perna . . . . .	86
5.2.3	Programa para o cálculo do campo elétrico e da distribuição da SAR no tórax . . . . .	93
5.2.4	Programa para calcular campo, variando-se a dimensão de uma camada . . . . .	102
5.3	Resultados obtidos . . . . .	108
5.3.1	Gráficos para o tórax . . . . .	108
5.3.2	Gráficos para a perna . . . . .	108
5.3.3	Gráficos para a cabeça . . . . .	109
5.3.4	Gráficos para variação da espessura de uma camada . . . . .	109
5.4	Variação do modelo padrão de pessoa . . . . .	115
5.4.1	Campo e SAR no tórax para uma pessoa gorda . . . . .	119
5.4.2	Campo e SAR no tórax em uma criança . . . . .	119
5.5	Variação para o modelo de uma camada . . . . .	120
5.5.1	Programa para calcular campo e SAR com uma só camada . . . . .	120
5.5.2	Campo e SAR em 100MHz . . . . .	123
5.5.3	Campo e SAR em 400MHz . . . . .	123
5.5.4	Campo e SAR em 1GHz . . . . .	123
5.5.5	Campo e SAR em 3GHz . . . . .	125
5.6	Medidas Realizadas . . . . .	125
5.6.1	Edifício Jardim da Colina . . . . .	126

5.6.2	Edifício Pedra do Bosque . . . . .	129
5.6.3	Escola Politécnica - UFBA . . . . .	131
5.6.4	Clube Português . . . . .	136
5.6.5	Direita da Piedade . . . . .	138
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>142</b>
6.1	Análise dos Dados . . . . .	142
6.2	Contorno de Proteção . . . . .	144
6.3	Comentários Finais . . . . .	146

# Lista de Tabelas

2.1	Concentração de íons numa célula . . . . .	17
3.1	Valores de campos elétricos usuais . . . . .	57
4.1	Valores de SAR . . . . .	70
4.2	Níveis de referência ocupacionais . . . . .	71
4.3	Níveis de referência para o público . . . . .	71
4.4	Valores adotados na URSS . . . . .	72
5.1	Camadas da cabeça . . . . .	76
5.2	Camadas para o tórax . . . . .	77
5.3	Camadas para a perna . . . . .	77
5.4	Constantes elétricas adotadas . . . . .	77
5.5	Densidade dos tecidos . . . . .	77
6.1	Valor de SAR máxima induzida por um campo de 10V/m . . . . .	143
6.2	Campo mínimo incidente para se induzir no corpo .08W/kg . . . . .	143
6.3	Campo mínimo incidente para produzir SAR induzida de .05W/kg . . . . .	144
6.4	Campo máximo suportável por um ser humano . . . . .	144
6.5	Valores de campo elétrico de proteção(RMS) . . . . .	145

# Lista de Figuras

1.1	Valores de tolerância no tempo . . . . .	10
2.1	Representação de uma célula . . . . .	16
2.2	Descarga e carga de uma célula . . . . .	18
2.3	Estrutura de um músculo . . . . .	20
2.4	Infiltração dos nervos nos músculos . . . . .	21
2.5	Ligações da Glia com os músculos pelas sinapses . . . . .	21
2.6	Redes que ligam os músculos ao cérebro . . . . .	22
2.7	Exame ECG normal . . . . .	23
2.8	Condutividade elétrica dos tecidos . . . . .	25
2.9	Constante dielétrica relativa dos tecidos . . . . .	26
2.10	Constante dielétrica relativa e resistência específica dos tecidos . . . . .	27
2.11	Densidade e calor específico dos tecidos . . . . .	28
2.12	Constante dielétrica relativa x frequência . . . . .	28
2.13	Resistência específica x frequência . . . . .	29
2.14	Modelo elétrico do tecido humano . . . . .	32
2.15	Representação elétrica de uma célula . . . . .	34
2.16	Alterações na corrente de uma célula devido a campo externo . . . . .	35
3.1	Onda plana . . . . .	41
3.2	Onda plana incidindo sobre outro meio . . . . .	43
3.3	Onda plana incidindo em meio de 2 camadas . . . . .	44

3.4	Onda plana incidindo em meio de várias camadas . . . . .	48
3.5	Sistema QPSK . . . . .	52
3.6	Sistema QPSK modificado . . . . .	53
5.1	Modelo adotado . . . . .	78
5.2	Campo e SAR no tórax em 100MHz . . . . .	109
5.3	Campo e SAR no tórax em 400MHz . . . . .	110
5.4	Campo e SAR no tórax em 1GHz . . . . .	110
5.5	Campo e SAR no tórax em 3GHz . . . . .	111
5.6	Campo e SAR na perna em 100MHz . . . . .	111
5.7	Campo e SAR na perna em 400MHz . . . . .	112
5.8	Campo e SAR na perna em 1GHz . . . . .	112
5.9	Campo e SAR na perna em 3GHz . . . . .	113
5.10	Campo e SAR na cabeça em 100MHz . . . . .	113
5.11	Campo e SAR na cabeça em 400MHz . . . . .	114
5.12	Campo e SAR na cabeça em 1GHz . . . . .	114
5.13	Campo e SAR na cabeça em 3GHz . . . . .	115
5.14	Variação do campo com a pele em 1GHz . . . . .	116
5.15	Variação do campo com a gordura em 1GHz . . . . .	116
5.16	Variação do campo com o músculo em 1GHz . . . . .	117
5.17	Variação do campo com o osso em 1GHz . . . . .	117
5.18	Variação do campo com o coração em 1GHz . . . . .	118
5.19	Variação do campo com o pulmão em 1GHz . . . . .	118
5.20	Campo e SAR para uma pessoa gorda . . . . .	119
5.21	Campo e SAR para uma criança . . . . .	120
5.22	Campo e SAR em 100MHz . . . . .	123
5.23	Campo e SAR em 400MHz . . . . .	124
5.24	Campo e SAR em 1GHz . . . . .	124

5.25 Campo e SAR em 3GHz . . . . .	125
5.26 Jardim da Colina . . . . .	128
5.27 Pedra do Bosque . . . . .	131
5.28 Escola Politécnica . . . . .	136
5.29 Clube Português . . . . .	139
5.30 Direita da Piedade . . . . .	141

# Capítulo 1

## Introdução

### 1.1 Comentários Iniciais

Como é do conhecimento popular, o Sol ilumina a Terra . Em termos técnicos esta iluminação é realizada numa larga faixa de frequências e na superfície da terra num dia ensolarado, o Sol emite cerca de  $1000 \text{ W/ m}^2$  ( $100 \text{ mw/cm}^2$ ) [1]. Isto quer dizer que o homem é submetido naturalmente a cerca de  $10^{-8} \mu\text{w/cm}^2$  por Hz, na faixa visível. Com a evolução da tecnologia e uso constante da eletricidade a vida humana passou a ser submetida também a radiações eletromagnéticas produzidas pelo próprio homem, ou seja, as radiações provenientes das estações de rádio AM e FM [12][13] , das estações de televisão e mais recentemente das estações de rádio móveis e estações celulares. A emissão de ondas AM remonta a época de 1920. Por volta de 1950 apareceram as emissões em FM e televisão, assim como as de rádio móveis também remontam desta data e as de telefonia celular a partir de 1980. Estas radiações tendem a aumentarem a partir do próximo milênio com os sistemas pessoais sem fio.

De quanto são estas radiações? Está o homem apto a viver sobre seus efeitos? Por quê somente agora a preocupação com este fato? O que a engenharia pode fazer a

respeito de modo a não impedir o progresso e garantir uma boa qualidade de vida para a população? São estas as perguntas que pretende-se discutir nesta dissertação, propondo-se uma norma de engenharia (contorno de proteção a vida) a ser adotado nos projetos que contribuirá para resolver este problema.

### 1.1.1 Telefonia Celular como Bode Expiatório

A telefonia celular ajuda a responder a uma das perguntas formuladas por nós engenheiros a um certo tempo. Até o aparecimento da telefonia celular as cidades contavam apenas com as torres de televisão e rádio FM, uma vez que as torres de rádio AM se situam normalmente fora dos grandes centros. Por maior quantidade que seja estas torres, seu número é bastante reduzido face ao número de torres de telefonia celular, e a explicação para este fato é bastante simples, pois enquanto uma estação de FM ou TV [4] pode cobrir uma área de cerca de 40 km de raio, uma estação celular cobre áreas que vão de 100m á 5 Km de raio [5]. Com isto o número de torres é bastante grande dentro de uma cidade e a população despertou para o fato de ser vizinha de uma torre. Da constatação deste fato à dúvida sobre o que isto representa para a saúde foi um passo muito rápido. Isto é um fato, pois nossa experiência indica que as pessoas temem as estações repetidoras de celulares e não se queixam das torres de TV e FM.

Assim, no nosso entender a telefonia celular está simplesmente sendo o bode expiatório de um fato que já vem nos atingindo a algum tempo.

Quais os níveis destas radiações? Considerando-se como exemplo uma estação de televisão padrão que possua os seguintes parâmetros:

- Potência E.R.P. de 30 KW;
- Irradiação no espaço livre.

Pode-se afirmar neste caso que, uma pessoa situada a cerca de 1,5 m da antena, receberia uma radiação de cerca de  $1000 \text{ W/m}^2$ , ou seja radiação idêntica a que receberia do Sol a pino.

Supondo agora uma estação padrão repetidora de celular (ERB), com os seguintes parâmetros:

- Potência E.R.P. total de 500W;
- Irradiação no espaço livre.

a pessoa deveria estar próxima da antena cerca de 20cm para receber uma radiação idêntica a do Sol a pino.

A primeira vista poderia-se concluir que não existe problema, pois é praticamente inviável que alguém chegue a distâncias tão próximas das antenas.

Porém, o problema é bem mais complexo, e devemos levar em conta a frequência da radiação, que no caso do Sol está na faixa de  $10^{16} \text{ Hz}$  e no caso das estações de televisão na faixa de  $10^8 \text{ Hz}$  enquanto que no caso da telefonia celular na faixa de  $10^9 \text{ Hz}$ . O corpo humano não se comporta de uma mesma maneira nestas faixas de frequência.. Assim, para poder-se entender o problema, deve-se primeiramente estudar o comportamento do ser humano com a frequência..

### 1.1.2 Normas de Proteção

O primeiro programa de pesquisa sobre os perigos da radiação eletromagnética data de 1954 [6] e foi desenvolvido pelo exército americano. Este estudo envolvia, basicamente, estações de radares. Em 1960 foram divulgados os resultados deste programa e sugeriu-se como padrão de segurança o valor de  $10 \text{ mW/cm}^2$ , ou seja, um valor 10 vezes menor do que a radiação produzida pelo Sol a pino, que como foi visto é da ordem de  $100 \text{ mW/cm}^2$ . A primeira norma de segurança sobre radiação eletromagnética

foi elaborada pela American National Standards Institute (ANSI) no ano de 1966 [6], tendo adotado o valor de  $10\text{mW}/\text{cm}^2$  como padrão de segurança para radiação. À partir desta data começaram a aparecer normas sobre radiação eletromagnética de outros países e/ou entidades, tais como:

- ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists)
- NCRP (National Council on Radiation Protection and Measurements)
- IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers)
- IRPA (International Radiation Protection Association)
- ICNIRP (International Commission On Non-Ionizing Radiation Protection)
- CENELEC (European Committee For Electrotechnical Standardization)

Estas normas traziam o resultado dos estudos realizados nesta área sobre o efeito térmico da radiação, ou seja, o aumento da temperatura que a radiação provoca num ser vivo. A partir daí, definiu-se o SAR (Specific Absorption Rate) [2][3] como uma boa medida destes efeitos. O SAR funciona como o fator limitante da radiação no corpo humano e é medido em  $\text{W}/\text{kg}$  e indica que se o mesmo estiver entre valores de 1 a 4, produzirá no ser humano efeitos biológicos mensuráveis. O fator SAR está diretamente ligado ao aumento de temperatura produzido num ser humano pela radiação e é definido como:

$$SAR = \frac{dP}{dm} \quad (1.1)$$

como

$$P = \frac{dW}{dt} \quad (1.2)$$

assim

$$SAR = \frac{d}{dm} \left( \frac{dW}{dt} \right) = \frac{d}{dt} \left( \frac{dW}{dm} \right) \quad (1.3)$$

sabe-se que

$$\rho = \frac{dm}{dv} \quad (1.4)$$

e

$$dW = W_v dv \quad (1.5)$$

assim

$$SAR = \frac{d}{dt} \left( \frac{W_v dv}{\rho dv} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{dW_v}{dt} = \frac{P_v}{\rho} \quad (1.6)$$

da física [16] sabe-se que a densidade volumétrica de potência absorvida por uma substância vale:

$$P_v = \frac{dW_v}{dt} = \sigma E^2 \quad (1.7)$$

Estamos interessados em valores médios, pois os campos de um modo geral são senoidais, assim:

$$\overline{P}_v = \frac{1}{2} \sigma E_0^2 \quad (1.8)$$

onde foi suposto que o campo elétrico é da forma:

$$E = E_0 \cos \omega t \quad (1.9)$$

Deste modo o valor médio da SAR pode ser expresso por:

$$\overline{SAR} = \frac{\sigma}{2\rho} E_0^2 [W/kg] \quad (1.10)$$

Nestas equações considerou-se:

- E = Campo elétrico em V/m

- $W$  = Energia da onda eletromagnética em J
- $P$  = Potência da onda eletromagnética em W
- $W_v$  = Densidade volumétrica de energia em  $J/m^3$
- $P_v$  = Densidade volumétrica de potência em  $W/m^3$
- $v$  = Volume do corpo onde a onda inside em  $m^3$
- $m$  = massa do corpo em Kg
- $\rho$  = densidade do corpo em  $Kg/m^3$
- $\sigma$  = condutividade do corpo em  $S/m$
- $t$  = tempo em s

Sabe-se também da física que :

$$dW = mcdT \quad (1.11)$$

dividindo-se a equação acima por  $dt$  resulta

$$\frac{dW}{dt} = mc \frac{dT}{dt} = P \quad (1.12)$$

Considerando-se uma massa infinitesimal pode-se escrever:

$$\frac{dW}{dt} = dmc \frac{dT}{dt} \quad (1.13)$$

como viu-se que:

$$SAR = \frac{dP}{dm} \quad (1.14)$$

resulta:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{SAR}{c} \quad (1.15)$$

onde:

- T = Temperatura em K
- c = Calor específico do corpo em [ J/kg\*K ]

Deste modo, verifica-se que o SAR é proporcional a variação da temperatura no corpo, tornando-se uma referência para medir-se radiação. O SAR é obtido indiretamente, medindo-se o campo elétrico incidente no corpo. Na prática, medir o SAR significa medir o campo elétrico [2][3]. A dificuldade reside em se medir o campo elétrico no interior dos seres vivos.

Todas as normas citadas praticamente adotaram o valor de 4W/kg [3][6] como o máximo SAR suportável por um ser humano sem que hajam mudanças na temperatura do corpo que não possam ser reguladas pelo mesmo. Isto posto, adotou-se como valor máximo para uma exposição controlada (aquela em que as pessoas tem conhecimento que estão recebendo radiação) uma taxa de proteção 10 vezes menor, chegando-se ao valor de 0,4W/kg [3]. Para exposição não controlada (aquela em que as pessoas não tem conhecimento que estão expostas , ou seja, o valor adotado para o público em geral) um coeficiente de segurança 50 vezes menor , chegando-se ao valor limite de 0,08W/kg [3] .

O problema maior reside em como medir estes valores de SAR. Supondo-se campos distantes o valor de SAR, como foi visto é dado por:

$$SAR = \frac{\sigma}{\rho} |E|^2$$

onde :

$\sigma$  = Condutividade do corpo em S/m;

$\rho$  = Densidade do corpo em  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;

E = Campo elétrico eficaz em  $\text{V}/\text{m}$ .

Estudou-se também valores para SAR localizados [3] , como por exemplo, sobre os olhos. Deste modo procurou-se determinar valores máximos de campo elétrico a que uma pessoa possa ser submetida estando a radiação atingindo o corpo inteiro ou apenas parte do mesmo. Exemplificando para o caso da telefonia celular o aparelho transceptor concentra a radiação na cabeça da pessoa.

Todos estes estudos baseiam-se no efeito térmico produzido por estas radiações. Estudos mais recentes [7] indicam que as radiações produzem efeitos não térmicos sobre o corpo humano ou de animais, tais como :

- Alteração no exame EEG humano com taxas de radiação de  $50\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (Mann and Rochke-1996) [14];
- Alteração na capacidade produtiva de ratos submetidos a radiações de  $100\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (Gabovici -1979) [14];
- Alterações em testes de memória com níveis de  $10\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (Chiang - 1989) [14];
- Alterações no exame EKG em ratos expostos a radiações de  $0,06\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (Mcgree-1980) [14];
- Aumento da incidencia de câncer em pessoas submetidas a radiações de 0,2 a  $8\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (Hocking and Gordon - 1995) [8];
- Aumento da incidencia de catarata em seres humanos expostos a radiações menores que  $200\mu\text{W}/\text{cm}^2$ (Huai - 1979) [14];
- O efluxo de cálcio nas células é sensível a radiações com níveis de SAR até  $0,005\text{mW}/\text{kg}$ (Dutta et al.) [14],

Estes resultados, ainda não foram adotados pelas normas já citadas, porém indicam que a susceptibilidade humana à radiação é maior do que se pensava inicialmente.

## 1.2 Apresentação do Problema

De acordo com o que foi apresentado pode-se questionar: Qual a tolerância do ser humano à radiação? Como foi visto até 1966 não existiam normas sobre o assunto. No Brasil, a diretriz da Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL) [7], que abordou o assunto adotando a norma do ICNIRP, só foi publicada em dezembro de 1999. Até então, não se tinha uma norma oficial.

Acontece que todas as normas atuais baseiam-se no efeito térmico, embora todas reconheçam a existência do efeito atérmico, ainda não o consideram como um fator de risco para a saúde.

O conceito de risco para a saúde tem significado diferente do Ocidente para o Oriente [6][15]. Na antiga União Soviética (URSS), o valor adotado para limitação da população à radiação é de  $1\mu W/cm^2$  desde 1958[15] contra o valor de  $1mW/cm^2$  adotado nos E.E.U.U. em 1996. Este fator de risco 1000 vezes maior, só pode ser explicado por conceitos diferentes sobre a saúde. Entretanto estes conceitos estão mudando. Durante o ano 2000 dois países europeus adotaram valores máximos de  $21,5\mu W/cm^2$  (na Itália) e de  $4,2\mu W/cm^2$  (na Suíça) baseando-se no princípio da prevenção [11].

Neste trabalho se pretende mostrar que pode-se ter níveis de radiação mais baixos sem prejudicar o funcionamento dos equipamentos de comunicações e que, pelo princípio da prevenção, deve-se adotar níveis mais rigorosos de proteção.

O problema consiste em determinar este limite e sendo assim, criar-se a obrigatoriedade que os projetos de comunicações envolvendo radiações passem a conter

Figura 1.1: Valores de tolerância no tempo

um contorno de proteção à vida, dentro do qual não deveria existir a presença constante do ser humano. Pretende-se mostrar ainda, para Salvador, (nossa cidade de residência), quais os níveis de radiação atualmente encontrados próximos a ERB's e de estações de TV e FM. O gráfico da Figura 1.1 mostra decréscimo dos valores de tolerância das atuais normas com o decorrer do tempo.

Na ordenada vê-se os valores de tolerância estabelecidos desde a primeira norma da ANSI em 1966.

É digno de se registrar que desde 1982, quando a ANSI publicou uma revisão de sua norma, que já se sabia que os valores de SAR para a cabeça eram excedidos [7][8]. Talvez, por esta razão, adotou-se a famosa cláusula de exclusão dos 7 W, onde

a norma não era aplicada para aparelhos portáteis com potência inferior a esse valor. Casualidade ou não, foi em 1982 [5] que entrou em operação comercial, o primeiro sistema de telefonia celular usando tecnologia AMPS nos Estados Unidos, que viria a popularizar em tão pouco tempo este serviço.

Por todos estes fatos acredito que é imprescindível que nos projetos de telecomunicações seja necessário traçar-se o contorno de proteção à vida. Pretende-se nesta dissertação explorar os efeitos das radiações na faixa de 100 MHz a 3GHz , com ênfase nos equipamentos de televisão, rádios FM e telefonia celular. Será aplicado o conceito de campo distante pois o interesse está basicamente no problema de radiação das torres de televisão e rádios FM e das estações ERB's, uma vez que acreditamos que o problema de radiação dos aparelhos celulares [11][15] será resolvido à partir de 2001, com o uso de antenas apropriadas e carcaças bloqueadoras de radiação. Entretanto, permanecerá o problema da quantidade de radiação das torres existentes, provocada pelos mais diversos meios de comunicações em constante evolução, usando cada vez mais a tecnologia “sem fio”.

### 1.3 Conteúdo desta Dissertação

No Capítulo 2 desta dissertação é apresentado o funcionamento elétrico do corpo humano, assim como as constantes elétricas do corpo para algumas frequências dentro da faixa que se pretende estudar. No Capítulo 3 tem-se um resumo da teoria eletromagnética necessária para que se compreenda a propagação da onda no interior do corpo. Ainda neste capítulo são apresentados os tipos de modulação utilizados pelos sistemas de comunicações, bem como os valores de projeto para intensidade de campo elétrico adotados na prática. No Capítulo 4 tem-se um resumo das principais normas de proteção existentes, com destaque para a diretriz adotada no Brasil. É

---

apresentado também, um comentário sobre a referida diretriz. No Capítulo 5 é proposto um modelo simplificado de corpo humano e este modelo será irradiado por uma onda plana nas frequências de 100MHz, 450MHz, 1GHz, e 3GHz. Valores de sinais medidos em regiões próximas a torres de televisão , rádios FM e ERB's em Salvador, são apresentados, comprovando-se que valores altos de radiação são encontrados na prática. O valor de SAR é calculado para as diversas camadas que constituem este modelo. Finalizando, no Capítulo 6 apresentam-se as conclusões do trabalho visando a criação de um contorno de proteção à vida nos projetos de telecomunicações via rádio.

## Capítulo 2

# Comportamento Elétrico do Corpo Humano

### 2.1 Bioeletricidade

#### 2.1.1 Origem

A origem da bioeletricidade remonta a época do filósofo grego Hipócrates, que afirmava que todas as coisas vivas, eram resultado do estado de quatro líquidos do corpo humano: sangue, bílis-preta, bílis-amarela e suor. O primeiro tratado de anatomia humana foi escrito por volta de 1550 por Andreas Vesalius [17]. O trabalho de Vesalius foi o primeiro tratado de anatomia baseado em dissecação e de observações reais do corpo humano. É conveniente lembrar que datam de 1600 os trabalhos de William Gilbert onde se estabeleceu a diferença entre eletricidade e magnetismo. Também se situa nesta fase (1628) a descoberta feita por William Harvey, mostrando a circulação do sangue no corpo humano como um circuito fechado. Rene Descartes, também nesta mesma época por volta de 1650, foi o primeiro cientista a estudar biologia e física, tentando explicar conceitos da vida biológica através da

física e da matemática [17]. Descartes considerava que a vida era devida a efeitos mecânicos, que seriam controlados pelo cérebro e nervos. Ele acreditava que devia existir uma “força ” que daria origem a vida. Isto mostrava uma mudança no conceito de vida, de “estado de líquidos ” para força motora. É de 1731 o trabalho de Stephen Grey sobre condutores e isolantes. Contemporâneo de Grey, Stephen Hales um padre, estudou a circulação do sangue e postulou que a vida era devido a um “espírito vital ” que estaria localizado nos nervos. Data de 1775 a descoberta do “magnetismo animal ” por Franz Mesmer. O “magnetismo animal ” seria uma força que existiria no universo interagindo com humanos e animais, a qual seria a origem da vida. Em 1791 Luigi Galvani anuncia a descoberta da eletricidade animal. Galvani concluiu que a eletricidade era gerada dentro dos animais. Ele chamou sua descoberta de “eletricidade animal ” e a mesma seria a origem da “força vital ” que daria origem a vida. Em 1793 Alessandro Volta amplia a descoberta de Galvani mostrando a existência da mesma força (eletricidade) em outros materiais, e assim negando a existência da “eletricidade animal”. Desta maneira estava aberto o caminho para o estudo científico da bioeletricidade.

Giovanni Aldini, um sobrinho de Galvani torna-se a primeira pessoa a tratar a esquizofrenia com choques elétricos, usando pilhas elétricas, descobertas por Volta. Em 1820 Hans Christian Oersted, descobre o eletromagnetismo, ou seja que uma corrente elétrica produz um campo magnético. A controvérsia sobre a existência ou não da “eletricidade animal ” durou até 1847 quando Carlo Matteucci [17] um físico, demonstrou cabalmente que o corpo humano pode produzir eletricidade, entretanto a mesma não estava relacionada diretamente com o sistema nervoso central, e foi considerada de pouca relação com a “força vital ” que daria origem a vida.

A partir dos estudos de Matteucci, Du Bois Reymond descobre que quando um nervo é estimulado, produz um impulso elétrico que viaja em alta velocidade pelo sistema nervoso, provocando a contração dos músculos. Estava descoberto o impulso

nervoso, a pedra básica da transmissão pelo corpo humano. Von Helmholtz [17], um colega de Reymond, mediu pela primeira vez a velocidade destes impulsos obtendo um valor de 30m/s [20].

Em 1868 um discípulo de Reymond, Julius Bernstein, publicou o primeiro livro sobre bioeletricidade propriamente dita, como é conhecida hoje em dia. É deste trabalho a origem do conceito que a célula através de uma troca de íons entre seu interior e seu exterior produz e discemina os sinais elétricos pelo corpo. A bioeletricidade estava equacionada. Será apresentado um resumo do funcionamento do corpo humano, para que melhor se possa compreender, como uma onda eletromagnética externa pode influenciar a vida humana.

### 2.1.2 Moléculas

Da biofísica [20] sabe-se que as moléculas se dividem em polares e não polares. Moléculas polares são aquelas que se orientam na presença de um campo elétrico externo. As não polares são aquelas que não sofrem nenhuma alteração na presença de um campo elétrico externo. As moléculas podem ser ainda classificadas como ionizadas ou não ionizadas. A ionização é a responsável pela carga elétrica que uma molécula pode ter.

A maioria das moléculas que constituem o corpo humano são moléculas polares (Alcool, Amina, Ester ). Estas moléculas ionizadas possuem portadores majoritários e minoritários. Os portadores majoritários são o sódio ( $\text{Na}^+$ ) o cloro ( $\text{Cl}^-$ ) e o potássio ( $\text{K}^+$ ). Todo tecido humano é imerso em solução aquosa, onde existem moléculas ionizadas. A combinação destas moléculas produz uma célula.

Figura 2.1: Representação de uma célula

### 2.1.3 Células

A célula é a menor parte de um sistema que pode ser considerado vida. O bloco básico de formação de uma célula é o ATP (Adenosine Triphosphate), que contém todos os códigos genéticos da célula. O potencial elétrico em tecidos vivos está relacionado com a reação química que ocorre no interior de cada célula. Este processo é chamado de Osmose e nele o oxigênio, ( $O_2$ ) trazido pelo sangue, é absorvido pelas células, que por sua vez eliminam o gás carbônico ( $CO_2$ ) que é levado até o pulmão onde novamente é convertido em oxigênio. O potencial elétrico de cada célula é da ordem de 70 mV. Este ciclo vital é comandado por sinais elétricos. A energia para manter uma célula viva é encontrada no citoplasma, que está em volta das células. Assim, basicamente uma célula pode ser representada como na Figura 2.1

A célula é o protoplasma envolvido por uma membrana, que a separa do citoplasma, estando tudo imerso em uma solução aquosa, a qual contém íons de sódio, cloro e potássio. Deste modo, o processo da vida envolve o coração que bombeia o

Ions	Dentro	Fora
Potassio( $K^+$ )	400	20
Sodio( $Na^+$ )	40	400
Cloro( $Cl^-$ )	20	280

Tabela 2.1: Concentração de íons numa célula

sangue e o pulmão que faz a transformação de gas carbônico em oxigênio sendo todo o processo comandado pelo cérebro. A concentração de íons numa célula está mostrada na Tabela 2.1.

A membrana da célula é impermeável ao sódio ( $Na^+$ ) e permeável ao potássio ( $K^+$ ) e ao cloro ( $Cl^-$ ). O potencial no interior da célula é mais positivo que em relação ao seu exterior, sendo esta diferença da ordem de 70mV e é função da concentração destes íons no interior e exterior da célula. Assim, cada célula é como se fosse uma pequena pilha de 70mV. A concentração de íons em valores diferentes dentro e fora da célula, tem uma tendência a se equalizar, que é contrabalanceada pela carga elétrica dos mesmos. Deste modo, em repouso, a célula mantém uma diferença de potencial do seu interior para o seu exterior. Quando excitada uma célula se descarrega pela migração de íons do exterior para o seu interior e vice-versa. Este processo de descarga e recarga da célula, ilustrado na Figura 2.2, dura cerca de 1ms.

Quando isto acontece numa célula, o fenômeno se espalha para todas as demais células de um dado tecido ou órgão. Este processo de carga e descarga, depende da concentração de água ( $H_2O$ ) do corpo que é controlada pelo rim. Quando o limite de umidade do corpo humano é atingido, sensores informam ao cérebro que comanda o rim para eliminar mais ou menos água do corpo. Também temos sensores para monitorar os níveis de  $CO_2$ ,  $O_2$  e o pH do sangue. Os impulsos elétricos que trazem o comando para a carga e recarga das células dos tecidos e músculos que constituem o corpo humano, viajam através do

Figura 2.2: Descarga e carga de uma célula

sistema nervoso central do corpo. O tempo de propagação destes impulsos varia de 1ms á 100ms, a depender do diâmetro dos nervos e da temperatura do corpo. Deste modo, o fator temperatura do corpo influencia na velocidade de nossas reações.

#### **2.1.4 Músculos e Sistema Nervoso Central**

Os músculos são constituídos de milhares de células em paralelo. Existem no corpo humano 3 (três) tipos de músculos:

- esquelético
- liso
- cardíaco

Metade do peso de um ser humano é devido aos músculos esqueléticos. São estes os músculos responsáveis pelos movimentos voluntários do corpo

humano. O músculo liso é conhecido como músculo involuntário, sendo deste tipo os músculos do estômago e do intestino. O músculo cardíaco é encontrado somente no coração e também é um músculo involuntário. Os músculos involuntários (liso e cardíaco) não obedecem a ação da vontade, isto é trabalham já programados. Deste modo, o coração bate ritmicamente, independente da nossa vontade. A mesma coisa acontece com os músculos responsáveis pela digestão. Entretanto para andarmos, faz-se necessário nossa vontade de fazê-lo. A Figura 2.3 mostra a estrutura de um músculo.

Os nervos do sistema nervoso central fazem a ligação entre os músculos e o cérebro. O desenho apresentado na Figura 2.4 mostra como os nervos estão infiltrados nos músculos.

Deste modo, é através dos nervos que recebemos e enviamos informações para o cérebro. As informações enviadas são captadas através dos sensores do corpo. Além dos sensores já vistos temos sensores de visão, audição, tato, olfato e gustação. No cérebro e nos músculos fazendo a interface com o sistema nervoso central estão as células Glia. Estas células através da sinapse fazem o contato entre os músculos e o cérebro por intermédio das fibras nervosas conforme ilustrado na Figura 2.5.

O cérebro comanda os músculos. Nos músculos involuntários este comando é automático, e nos músculos esqueléticos, este comando depende da vontade do ser vivo.

A Figura 2.6 mostra a rede de informação que liga o cérebro aos músculos do corpo humano. Note-se que existem 2(duas) redes. Uma é responsável

Figura 2.3: Estrutura de um músculo

Figura 2.4: Infiltração dos nervos nos músculos

Figura 2.5: Ligações da Glia com os músculos pelas sinapses

Figura 2.6: Redes que ligam os músculos ao cérebro

pelo recebimento de informações dos sensores e a outra pelo envio de comandos para os músculos.

### 2.1.5 Coração

O músculo do coração é um músculo involuntário, isto é, para funcionar não necessita do comando da vontade do indivíduo. O nó sinotrial existente neste músculo age como um marca passo, gerando os impulsos elétricos que produzem o batimento cardíaco na razão de 60 a 80 batimentos por minuto. Um exame denominado ECG (eletro-cardiograma) mostra o funcionamento do coração. Um ECG normal tem o formato mostrado na Figura 2.7, onde os pontos marcados mostram os valores de pico do batimento cardíaco, notando-se 5 (cinco) pontos por ciclo. Alterações no número destes pontos indicam funcionamento incorreto do órgão.

Figura 2.7: Exame ECG normal

### 2.1.6 Cérebro

As células do cérebro são chamadas neurônios. Existem no cérebro neurônios para receberem as informações dos sensores do corpo e neurônios que enviam os comandos para os músculos. O cérebro humano possui aproximadamente 50 bilhões de neurônios. Estes neurônios comunicam-se através das ondas cerebrais que podem ser registradas num EEG (eletro-encefalograma). As ondas cerebrais foram descobertas por Hans Berger [20] em 1929. O cérebro produz duas ondas, uma de 90 ms e outra de 35 ms de duração. A onda maior foi denominada de estado “alfa” e a menor de estado “beta”. A frequência das ondas alfa é de 8 à 11 Hz, e sua amplitude de  $50\mu V$ . As ondas beta estão associadas ao estado de tensão do indivíduo e tem frequências entre 12 e 18 Hz. As ondas cerebrais só existem no cérebro e seu funcionamento é bastante sensível a temperatura do corpo humano. É através destas ondas que o cérebro controla o sistema nervoso central e deste modo comanda o corpo.

## 2.2 Constantes do Corpo Humano

Os valores das constantes elétricas e dos parâmetros de densidade e calor específico do corpo humano, apresentados nesta dissertação, foram coletados dos artigos

“The Absorption of Electromagnetic Energy in Body Tissues ” [9] e “Dielectric Properties of Tissues ” [3]. Baseados nestes artigos o primeiro fato a se enfatizar é que os valores foram medidos para o tecido morto, entretanto experiências mostraram que as propriedades elétricas dos tecidos não sofrem alterações até 2 (dois) dias após a morte. Outro fator digno de nota é o comportamento das constantes acima e abaixo de 300 MHz . Tal fato está relacionado com a polaridade das moléculas de água que possuem frequência de rotação na faixa de 20 GHz. Os valores obtidos constam das tabelas apresentadas nas Figuras 2.8, 2.9, 2.10 e 2.11.

Deve-se notar que o valor da condutividade elétrica da Figura 2.10 está expresso em “ $\Omega * cm$ ” (resistência específica) ao passo que os valores da Figura 2.8 estão em “S \* m ”. Para converter-se de uma unidade para a outra , usa-se a seguinte expressão:

$$\sigma = \frac{100}{\rho}$$

onde:

- $\sigma$  =condutividade em S/m
- $\rho$  =resistência específica em  $\Omega * cm$

É interessante notar que os valores apresentados mostram medidas realizadas a partir de 1935, e nota-se a existência de faixa de valores, devido ao fato dos seres humanos serem diferentes entre si.

Os gráficos das Figuras 2.12 e 2.13 mostram a variação dos valores das constantes para o músculo e gordura com a frequência.

Figura~2.8: Condutividade elétrica dos tecidos

Figura 2.9: Constante dielétrica relativa dos tecidos

Figura 2.10: Constante dielétrica relativa e resistência específica dos tecidos

Os valores apresentados foram medidos e modelos físicos foram então criados para explicá-los [3]. A seguir é apresentado um resumo da teoria que permite calcular a variação das constantes elétricas do corpo humano em função da frequência. Sabe-se da física que:

$$D = \varepsilon_0 E + P \quad (2.1)$$

$$D = \varepsilon_r \varepsilon_0 E = \varepsilon E \quad (2.2)$$

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \frac{P}{E} = \varepsilon_0 \left( 1 + \frac{P}{\varepsilon_0 E} \right) \quad (2.3)$$

Figura 2.11: Densidade e calor específico dos tecidos

Figura 2.12: Constante dielétrica relativa x frequência

Figura 2.13: Resistência específica x frequência

onde:

- E = campo elétrico
- D = densidade de fluxo elétrico
- P = polarização do meio

Considerando-se:

$$\varepsilon_r = 1 + gN\alpha_t \quad (2.4)$$

onde:

- g = relação entre o campo interior e o exterior numa célula
- N = número de células por unidade de volume

- $\alpha_t$  = polarizabilidade média da célula

O valor de  $\alpha_t$  é dado por :

$$\alpha_t = \alpha_e + \alpha_i + \frac{p^2}{3KT} \quad (2.5)$$

onde:

- $\alpha_i$  = polarizabilidade devido aos íons
- $\alpha_e$  = polarizabilidade devido aos elétrons
- $p$  = dipolo permanente da molécula se existir
- $K$  = constante de Boltzman(  $1.38 * 10^{-23} J/K$ )
- $T$  = temperatura

Este modelo foi obtido, considerando-se que um tecido pode ser representado por um capacitor de área “A ” e espessura “d ”, conforme ilustrado na Figura 2.14. Deste modo considerando-se perdas, e supondo-se que o tecido tenha sido submetido a uma tensão “V ”, têm-se

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d} \quad (2.6)$$

$$G = \sigma \frac{A}{d} \quad (2.7)$$

onde:

- $C$  = capacitância
- $G$  = condutância

Deste modo a admitância do tecido vale:

$$Y = G + jwC = \frac{A}{d}(\sigma + jw\varepsilon_0\varepsilon_r) \quad (2.8)$$

$$Y = \frac{Ajw}{d}(\varepsilon_0\varepsilon_r + \frac{\sigma}{jw}) \quad (2.9)$$

A capacitância complexa  $C^*$  (capacitor com perda) pode ser expressa por:

$$C^* = \frac{Y}{jw} = \frac{A}{d}(\varepsilon_r\varepsilon_0 + \frac{\sigma}{jw}) \quad (2.10)$$

$$C^* = \frac{A\varepsilon_0}{d}(\varepsilon_r - \frac{j\sigma}{w\varepsilon_0}) = \frac{A\varepsilon_0\varepsilon_r^*}{d} \quad (2.11)$$

onde, a constante dielétrica relativa complexa  $\varepsilon_r^*$  vale:

$$\varepsilon_r^* = \varepsilon_r - j\frac{\sigma}{w\varepsilon_0} = \varepsilon_r - j\varepsilon_r'' \quad (2.12)$$

Assim a constante dielétrica complexa  $\varepsilon$  de um tecido pode ser expressa por:

$$\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_r^* = \varepsilon_0\varepsilon_r - j\frac{\sigma}{w} \quad (2.13)$$

ou:

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.14)$$

- $\varepsilon'$  = parte real da constante dielétrica.
- $\varepsilon''$  = parte imaginária da constante dielétrica. É a responsável pelas perdas.

onde :

$$\varepsilon' = \varepsilon_0\varepsilon_r \quad (2.15)$$

Figura 2.14: Modelo elétrico do tecido humano

$$\varepsilon_r'' = \frac{\sigma}{\omega\varepsilon_0} \quad (2.16)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma}{\omega} \quad (2.17)$$

Para melhorar ainda mais o modelo, vamos supor que a tensão aplicada seja do tipo degrau, deste modo esta se verificando o comportamento do tecido com a frequência.

Neste caso, tem-se o aparecimento de um valor instantâneo e de um valor estacionário para a constante dielétrica. Estes valores devem estar relacionados com o tempo de resposta  $\tau_t$  que o tecido leva para atingir o regime permanente, após ter sido excitado pelo degrau de tensão. A permissividade elétrica pode ser expressa por [3]

$$\varepsilon = \varepsilon_f + \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_f}{1 + j\omega\tau_t} - \frac{\sigma_i}{j\omega} \quad (2.18)$$

Comparando-se esta equação com

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (2.19)$$

Chega-se as seguintes expressões:

$$\varepsilon' = \varepsilon_f + \frac{\varepsilon_i - \varepsilon_f}{1 + (\omega\tau_t)^2} \quad (2.20)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma_i}{w\varepsilon_0} + \frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_f)w\tau_t}{1 + (w\tau_t)^2} \quad (2.21)$$

$$\sigma = \sigma_i + \frac{(\sigma_f - \sigma_i)(w\tau_t)^2}{1 + (w\tau_t)^2} \quad (2.22)$$

onde  $\varepsilon_i, \varepsilon_f, \sigma_i, \sigma_f$ , são relacionados por:

$$\frac{(\varepsilon_i - \varepsilon_f)\varepsilon_0}{\tau} + \sigma_i = \sigma_f \quad (2.23)$$

Os valores de  $\varepsilon_i$  e  $\tau_i$  referem-se a um estímulo DC (frequência nula) e os valores  $\varepsilon_f$  e  $\sigma_f$  referem-se a uma frequência  $\infty$  (frequência muito alta).

Estas equações já explicam o porque do comportamento das constantes elétricas dos tecidos do corpo humano variarem com a frequência. É conveniente notar-se que o modelo aqui apresentado pode ser aplicado para qualquer material. Caso não exista variação com a frequência da constante dielétrica do material, basta fazer  $\varepsilon_i = \varepsilon_f$ . Para estudar um material sem perda basta considerar  $\sigma = 0$ . O modelo apresentado pode ainda ser melhorado considerando-se que as células possuem uma parte interior e uma exterior, onde a concentração de íons é diferente. Desta maneira pode-se calcular valores diferentes de  $\varepsilon$  e  $\sigma$  do interior para o exterior de uma célula. Pelo que foi visto, uma célula pode ser representada do ponto de vista elétrico por [9] conforme mostra a Figura 2.15.

A resistência  $R_0$  apresenta condutância da ordem de  $10^{-8}\mathcal{U}/m$  e a resistência  $R_i$  apresenta condutância da ordem de  $1\mathcal{U}/m$ . Os valores de  $C_o$  e  $C_i$  estão na faixa de  $1\mu F/cm^2$ , e como viu-se variam com a frequência.  $R_0$  e  $C_0$  representam o exterior da célula e  $R_i$  e  $C_i$  representam o interior da célula. O diodo representa a capacidade da célula em demodular sinais com modulação de amplitude. Os estudos neste sentido foram iniciados a partir de 1949. Pesquisas demonstraram que o efeito retificador de uma célula é dado por:

Figura 2.15: Representação elétrica de uma célula

$$I = I_0(e^{\frac{V}{\eta V_T}} - 1) \quad (2.24)$$

onde:

- $V$  = tensão aplicada a célula
- $I$  = corrente na célula
- $V_T \cong .026$  V
- $\eta$  = constante, variando de .25 á 1

Assim, aplicando-se na célula uma tensão  $V = V_0 + V_1 \cos wt$ , a corrente na célula é dada por:

$$I = \frac{I_0}{\eta V_T} \left( V_0 + \frac{V_1^2}{2\eta V_T} + V_1 \cos wt + \frac{V_0 V_1 \cos wt}{2\eta V_T} + \dots \right) \quad (2.25)$$

expressão esta oriunda da fórmula acima, por transformações matemáticas. Deste modo a variação da corrente  $I_0$  da célula é dada por:

$$\Delta I = \frac{I_0}{4} \left( \frac{V_1}{\eta V_T} \right)^2 \quad (2.26)$$

Figura 2.16: Alterações na corrente de uma célula devido a campo externo

Assim um sinal AC do tipo  $V_1 \cos wt$ , produz mudanças substanciais na corrente da célula, e isto provoca variações nas concentrações dos íons das células. O gráfico da Figura 2.16, [3] mostra o aparecimento de perturbações nas células em função da frequência e da amplitude do campo eletromagnético.

Resumindo, viu-se que uma célula, comporta-se de modo diferente com a frequência e além do mais tem a capacidade de demodular sinais elétricos modulados em amplitude.

## 2.3 Radiações Ionizantes e Não Ionizantes

Define-se potencial de ionização, como a energia necessária para que um eletron seja arrancado da órbita de um átomo. Este potencial é variavel de acordo com a substância, sendo de 13.6 eV para o hidrogênio e de 5.1 eV para o sódio gasoso. É normalmente aceito o valor de 10eV como parâmetro para se considerar que uma radiação seja ou não ionizante. A energia do fóton de uma onda eletromagnética é dada por:

$$E_f = h\nu \quad (2.27)$$

onde:

- $E_f$  = energia do fóton de uma onda eletromagnética
- $h$  = constante de Plank =  $6.63 \cdot 10^{-34}$  J/hz
- $\nu$  = frequência da onda eletromagnética

Assim, uma radiação é considerada ionizante, se a energia dos seus fótons for maior que 10 eV. Pode-se facilmente verificar que as ondas eletromagnéticas entre 100 KHz e 3 GHz são tipicamente não ionizantes, pois a energia de seus fótons são bem menores que 10 eV.

$$E_f = 6.63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^9 \cong 2 \cdot 10^{-24} \text{ Joules} = 1.25 \cdot 10^{-5} \text{ eV}$$

Isto não significa que estas radiações não podem produzir efeitos em organismos vivos. Estas radiações podem provocar efeitos, através da excitação de modos vibracionais ou rotacionais das células humanas, e necessitam energias bem menores para serem produzidas. Exemplos destes fenômenos que ocorrem em organismos vivos são:

- Aquecimento dos tecidos
- Despolarização das membranas das células
- Saturação dielétrica
- “Stress” mecânico dos tecidos

Isto acontece, porque a ionização em tecidos humanos devido a radiações, pode ser provocada por:

- Absorção da energia eletromagnética

- Colisão entre as partículas da matéria que constituem as células
- Alteração da polarização dos tecidos em soluções aquosas

A primeira causa da ionização é a que vimos anteriormente e é a mais conhecida. A segunda causa da ionização é chamada de ionização por aquecimento, e é motivada pelo movimento Browniano das moléculas. A radiação provoca um aumento no movimento das moléculas, aumentando a colisão entre as partículas. Sabe-se que a densidade de energia de uma molécula devido a este movimento é dada por :

$$W_d = KT \quad (2.28)$$

Onde :

W = Densidade de energia em J / Hz

K = Constante de Boltzmann =  $1.38 * 10^{-23} J/K$

T = Temperatura

Toda partícula do corpo possui uma energia cinética média W, devido ao movimento browniano dada por KT. Esta energia cinética está relacionada com a temperatura. Partículas submetidas a campos externos tem sua velocidade aumentada por:

$$v = mE \quad (2.29)$$

onde:

- v = velocidade em m/s
- m = mobilidade iônica da partícula em  $m^2/V * s$
- E = campo elétrico externo em V/m

O campo elétrico externo provoca um aumento de velocidade nas partículas, e faz aumentar o número de colisões entre as mesmas, e deste modo a temperatura se eleva. A ionização ocorre quando a energia resultante do aumento de temperatura, atinge valores na faixa ionizante. Este efeito só ocorre, quando o espaço percorrido pelas partículas aceleradas para atingir a velocidade de ionização é menor que o caminho médio dos elétrons. Devido as particularidades do tecido humano, este tipo de ionização ocorre para energias da ordem de  $.1\text{eV}$ , e embora ocorra para valores menores, exige a existência de campos elétricos bastante altos da ordem de  $10^7\text{V/m}$  para se manifestar. Viu-se anteriormente, que o tecido orgânico é basicamente composto de matéria em solução aquosa e deste modo o terceiro tipo de ionização é o que está atualmente sendo mais estudado em seres humanos. Este tipo de ionização é responsável pelo chamado efeito atômico das radiações. Para o aparecimento deste tipo de ionização, são necessários apenas energias na faixa de  $0.00006\text{ eV}$ , energias estas que são alcançadas por ondas eletromagnéticas já na frequência de GHz.

## 2.4 Resumo

Apresentou-se neste capítulo, uma origem da bioeletricidade juntamente com o progresso do estudo da física da eletricidade. Foi mostrado também um modelo para a célula humana e seu comportamento com a frequência. Mostrou-se também o conceito de ionização onde foi ressaltado, que a mesma em tecidos orgânicos, pode ser conseguida com níveis de radiações bem menores que  $10\text{ eV}$ . Demonstrou-se que os efeitos atômicos são devidos a esta ionização, que pode ser provocada por campos eletromagnéticos de baixa energia.

No tocante ao funcionamento do corpo humano, viu-se que o coração impulsiona o sangue que alimenta as células. Os nervos transportam os impulsos elétricos emitidos pelo cérebro que comandam o movimento dos músculos. É também através dos

nervos, que os sensores existentes no corpo, enviam suas mensagens para o cérebro. É importante notar que a velocidade de propagação dos sinais elétricos bem como o funcionamento das ondas cerebrais são influenciadas pela temperatura do corpo. Por último verificou-se, que ondas de baixa energia podem afetar a troca de íons nas células modificando com isso seu funcionamento.

# Capítulo 3

## Sistemas de Telecomunicações

### 3.1 Objetivo

É apresentado neste capítulo, um resumo da teoria eletromagnética para campos distantes, de modo que possa ser entendido o modo pelo qual os campos elétricos se propagam no interior do corpo humano. Mostra-se também qual o tipo de modulação usado nos principais sinais eletromagnéticos existentes como a televisão as rádios FM e os sinais de telefonia celular. São analisados os principais aspectos de projeto usando-se estas tecnologias. Deste modo pretende-se mostrar que os sinais úteis são bastante pequenos em relação aos sinais de perturbação nos seres humanos.

### 3.2 Ondas Planas

É necessário rever-se as equações de uma onda plana propagando-se num meio qualquer. Considere-se a Figura 3.1

Suponha-se uma onda plana com campo elétrico na direção “ x ”, propagando-se na direção “z ”:

Figura 3.1: Onda plana

$$E_x = E'_0 e^{j\omega t - \gamma z} = E'_0 e^{j\omega t} e^{-\gamma z} = E_0 e^{-\gamma z} \quad (3.1)$$

$$\gamma^2 = j\omega\mu\sigma - \omega^2\mu\varepsilon \quad (3.2)$$

$$\frac{E_x}{H_y} = \eta = \frac{j\omega\mu}{\gamma} = \left( \frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon} \right)^{1/2} \quad (3.3)$$

onde:

- $E_x$  = campo elétrico
- $H_y$  = campo magnético
- $z$  = direção de propagação
- $\omega$  = frequência da onda
- $\gamma$  = constante de propagação do meio

- $\eta$  = impedância intrínseca do meio
- $\sigma$  = condutividade elétrica do meio
- $\mu$  = permeabilidade magnética do meio
- $\varepsilon$  = constante dielétrica do meio

A constante de propagação pode ser expressa por:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (3.4)$$

$$\alpha = w \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{w\varepsilon}\right)^2} - 1 \right]} \quad (3.5)$$

$$\beta = w \sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2} \left[ \sqrt{1 + \left(\frac{\sigma}{w\varepsilon}\right)^2} + 1 \right]} \quad (3.6)$$

onde:

- $\alpha$  = fator de atenuação
- $\beta$  = número de onda

Também foi visto que a constante dielétrica na sua forma complexa pode ser expressa por:

$$\varepsilon_c = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (3.7)$$

onde:

- $\varepsilon' = \varepsilon$
- $\varepsilon'' = \frac{\sigma}{w}$

Suponha-se agora que esta onda esteja incidindo sobre um outro meio conforme mostra a Figura 3.2

Figura 3.2: Onda plana incidindo sobre outro meio

Esta incidência provoca o aparecimento das ondas refletida e transmitida. As expressões dos campos elétrico e magnético para o meio “1” valem:

$$E_x(z) = E_d e^{-\gamma_1 z} + E_r e^{-\gamma_1 z} \quad (3.8)$$

$$H_y(z) = \frac{1}{\eta_1} (E_d e^{-\gamma_1 z} - E_r e^{-\gamma_1 z}) \quad (3.9)$$

e para o meio “2” valem:

$$E_x(z) = E_t e^{-\gamma_2 z} \quad (3.10)$$

$$H_y(z) = \frac{E_x(z)}{\eta_2} \quad (3.11)$$

O coeficiente de reflexão é expresso por:

$$\rho = \frac{E_r}{E_d} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (3.12)$$

e o coeficiente de transmissão por:

$$\tau = \frac{E_t}{E_d} = \frac{2Z_L}{Z_L + Z_0} \quad (3.13)$$

No caso em estudo:

- $Z_0 = \eta_1 =$  impedância intrínseca do meio 1
- $Z_L = \eta_2 =$  impedância intrínseca do meio 2

Figura 3.3: Onda plana incidindo em meio de 2 camadas

Analizando a situação apresentada na Figura 3.3, a onda plana proveniente do meio 1, incide no meio 2, de comprimento “ L ”, que por sua vez faz fronteira com

o meio 3. Através da analogia com a teoria das linhas de transmissão pode-se deduzir as equações que regem a propagação para este caso. Sabe-se [24] que a impedância de entrada de um meio é dada por:

$$Z_i = Z_0 \left[ \frac{Z_L \cosh \gamma L + Z_0 \sinh \gamma L}{Z_0 \cosh \gamma L + Z_L \sinh \gamma L} \right] \quad (3.14)$$

onde:

- $Z_i$  = impedância de entrada do meio em consideração.
- $Z_L$  = impedância de carga para o meio considerado.
- $Z_0$  = impedância intrínseca do meio em consideração.

Aplicando-se esta fórmula para o caso em estudo, onde a impedância de entrada do meio 2, é a impedância de carga para o meio 1, resulta:

$$Z_{i_2} = Z_{L_1} = \eta_2 \left[ \frac{\eta_3 \cosh \gamma_2 L + \eta_2 \sinh \gamma_2 L}{\eta_2 \cosh \gamma_2 L + \eta_3 \sinh \gamma_2 L} \right] \quad (3.15)$$

onde:

- $Z_L = \eta_3$  = impedância de carga do meio 2
- $Z_0 = \eta_2$  = impedância intrínseca do meio 2
- $Z_{i_2}$  = impedância de entrada do meio 2
- $Z_{L_1}$  = impedância de carga do meio 1

Assim, a onda que penetra no meio 2 pode ser calculada através dos coeficientes de transmissão e reflexão entre os meios. Tomando-se o plano  $z = 0$  como referência, tem-se como coeficiente de reflexão para onda que é transmitida para meio 2

$$\tau_{12}(0) = \frac{2Z_{L_1}}{Z_{L_1} + \eta_1} \quad (3.16)$$

Enquanto a onda transmitida para o meio 3, tomando-se o plano de referência  $z = L$ , é dado por

$$\tau_{23}(L) = \frac{2Z_{L_2}}{Z_{L_2} + \eta_2} \quad (3.17)$$

Se o plano fo  $z = 0$ , obtém-se

$$\tau_{23}(0) = 1 + \frac{\eta_3 - \eta_2}{\eta_3 + \eta_2} e^{-2\gamma_2 L} \quad (3.18)$$

e

$$\rho_{23}(0) = \frac{\eta_3 - \eta_2}{\eta_3 + \eta_2} e^{-2\gamma_2 L} \quad (3.19)$$

onde  $\eta_3$  é a impedância intrínseca do meio 3. O campo elétrico dentro do meio 2 [25] pode ser expresso por

$$E_x(z) = \frac{\tau_{12}(0)}{\tau_{23}(0)} E_d [e^{-\gamma_2 z} + \rho_{23}(0)e^{\gamma_2 z}] \quad (3.20)$$

A expressão é válida para  $0 \leq z \leq L$ .

O campo elétrico no meio 3, pode ser expresso por

$$E_x(z) = \frac{\tau_{12}(0)}{\tau_{23}(0)} \tau_{23}(L) E_d e^{-\gamma_2 L} e^{-\gamma_3 z} \quad (3.21)$$

onde a expressão é válida para  $z \geq L$ . Nas expressões apresentadas,  $E_d$  é o valor do campo incidente na primeira interface.

A expressão do campo elétrico no meio 1, devido a presença dos meios 2 e 3 vale:

$$E_x(z) = E_d e^{-\gamma_1 z} + E_r e^{\gamma_1 z} \quad (3.22)$$

onde:

$$E_r = \rho_{12}(0)E_d \quad (3.23)$$

e:

$$\rho_{12}(0) = \frac{Z_{L_1} - \eta_1}{Z_{L_1} + \eta_1} \quad (3.24)$$

Este método pode ser usado para um número qualquer de meios, sendo suficiente que se repita as operações indicadas, considerando-se sempre o caso de 3 meios, onde o meio 3 é substituído por sua impedância de entrada.

Esta modelagem com onda plana, será aplicada para calcular-se o campo elétrico no interior do corpo humano. O corpo humano será considerado formado por diversos tecidos, cada qual com suas constantes dielétricas. O corpo humano será considerado formado por diversas camadas, entre os quais destacam-se:

- pele;
- gordura;
- músculos;
- ossos;

Na Figura 3.4 vê-se uma onda plana incidindo sobre um corpo humano, aí representado por um sólido composto por meios distintos de dimensões .2 x .5 x 1.7m. Assim pode-se calcular o campo elétrico em qualquer parte do corpo, e fazendo-se uso da equação:

$$SAR = \frac{\sigma}{2\rho} |E_x(z)|^2 \quad (3.25)$$

Figura ~3.4: Onda plana incidindo em meio de várias camadas

pode-se calcular o valor da SAR em qualquer parte do corpo e comparar este valor com os valores máximos estabelecidos pelas normas de proteção. Diversos outros métodos existem para se calcular o valor do campo elétrico no interior do corpo humano. Destacam-se os seguintes:

- método dos momentos
- método da impedância
- método das diferenças finitas
- método da transformada rápida de fourier
- TLM , método dos elementos finitos

O método aqui apresentado é suficiente para provar o que se pretende

### 3.3 Ondas Moduladas

Na faixa entre 100MHz e 3GHz, objeto desta dissertação, as principais ondas eletromagnéticas existentes de irradiação omnidirecional são provenientes de:

- rádios FM
- emissoras de televisão
- telefonia celular
- sistemas de rádios móveis
- sistemas “wireless ”

As rádios FM, ocupam o espectro de 88 à 108MHz e apresentam potências ERP de 25W à 100kW. Os sinais de televisão ocupam as faixas de 54 à 88MHz, 170 à 216MHz e 470 à 790MHz, possuindo potência ERP de 5W à 100kW. Os rádios móveis ocupam as faixas de 148MHz à 173MHz, 450 à 470MHz, 800MHz à 820MHz e 900 à 920MHz, apresentando potências ERP de 10 à 200W por canal de radio frequência. O sistema de telefonia celular ocupa a faixa de 824MHz à 885MHz, apresentando potência ERP de 10 à 100W por canal de rádio frequência. Os sistemas “wireless ”, atualmente em operação na Brasil operam na faixa de 1.7 à 1.9GHz e apresentam potência ERP de 10 à 100W.

Os sistemas das rádios FM, utilizam modulação do tipo frequência modulada, sendo seu sinal dado por:

$$s_{fm}(t) = E_c \cos (2\pi f_c t + m_f \sin 2\pi f_m t) \quad (3.26)$$

$$m_f = \frac{\Delta F}{f_m} \quad (3.27)$$

$$\Delta F = K_f E_m \quad (3.28)$$

onde:

- $m_f$  = índice de modulação
- $\Delta F$  = desvio de frequência
- $f_c$  = frequência da portadora
- $f_m$  = frequência do sinal modulante
- $E_c$  = amplitude da portadora
- $E_m$  = amplitude do sinal modulante
- $K_f$  = constante do modulador

O sinal modulante ocupa uma banda de 10KHz, e o sinal modulado ocupa uma faixa de 200KHz, com desvio de 75KHz.

O sinal de televisão usa modulação AM para o sinal de vídeo e modulação FM para o sinal de áudio. A equação de um sinal de amplitude modulada é dado por:

$$s_{am}(t) = E_c (1 + m_a) \cos(2\pi f_c t) \quad (3.29)$$

$$m_a = \frac{E_m}{E_c} \cos(2\pi f_m t) \quad (3.30)$$

onde:

- $m_a$  = índice de modulação
- $f_c$  = frequência da portadora

- $f_m$  = frequência do sinal modulante
- $E_c$  = amplitude da portadora
- $E_m$  = amplitude do sinal modulante

Deste modo uma estação de televisão, possui uma portadora de vídeo e uma portadora de áudio. A diferença de frequência entre estas portadoras é de 4.5MHz, sendo a portadora de áudio a portadora de frequência mais elevada.

Os sinais de rádio móvel, bem como os sinais de celulares da primeira geração, adotam sistema de modulação FM, com largura de canal de 30KHz e desvio efetivo de 5KHz por canal, utilizando sinais modulantes de até 10KHz de banda.

O espectro de frequência de um sinal FM, na teoria ocuparia uma banda infinita, sendo que na prática, esta banda está limitada pela amplitude de seus componentes. Despreza-se componentes com amplitudes menores de 1% da amplitude da frequência fundamental modulada, isto significa que a largura de banda de um sinal FM modulado é dada por:

$$B = 2 (\Delta F + f_m) \quad (3.31)$$

Os sinais de telefonia celular de segunda geração utilizam modulação digital. Em Salvador são utilizadas modulações digitais do tipo QPSK e DSSS. Os sistemas do tipo QPSK, ocupam uma faixa de 30KHz, podendo conter no futuro até seis canais de voz dentro desta faixa. Atualmente opera-se com apenas três canais de voz por cada portadora. Este tipo de modulação recebe o nome genérico de TDMA (time division modulation access). A equação de um sinal QPSK vale:

$$s_{qpsk}(t) = \sqrt{E_s} \cos \left[ (i-1) \frac{\pi}{2} \right] \phi_1(t) - \sqrt{E_s} \sin \left[ (i-1) \frac{\pi}{2} \right] \phi_2(t) \quad (3.32)$$

equação esta válida para  $i = 1, 2, 3, 4$  e onde:

Figura 3.5: Sistema QPSK

$$\phi_1(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \cos(2\pi f_c t) \quad (3.33)$$

$$\phi_2(t) = \sqrt{\frac{2}{T_s}} \sin(2\pi f_c t) \quad (3.34)$$

sendo:

- $f_c$  = frequência da portadora
- $T_s$  = tempo de duração de um símbolo

Neste sistema, o tempo de duração de um símbolo é o dobro do período de um bit. Este sistema transmite dois bits de informação por cada símbolo. Sistemas deste tipo podem apresentar esquemas de modulação conforme mostrado nas Figuras 3.5 e 3.6

A energia de cada bit de informação é dada por:

Figura 3.6: Sistema QPSK modificado

$$E_b = \frac{A_c^2 T_b}{2} \quad (3.35)$$

onde:

- $A_c$  = amplitude da portadora
- $T_b$  = tempo de duração do bit

Nos sistemas QPSK, tem-se:

$$E_s = 2E_b \quad (3.36)$$

ou seja, a energia de cada símbolo é o dobro da energia do bit, já que cada símbolo contém 2 bits de informações. A probabilidade de erro em sistemas deste tipo é dada por:

$$P_e = Q \left[ \sqrt{\frac{2E_b}{N_0}} \right] \quad (3.37)$$

onde:

- $P_e$  = probabilidade de erro
- $E_b$  = energia do bit
- $N_0$  = densidade espectral de ruído
- $Q$  = função erro

A densidade espectral de ruído é dada por:

$$N_0 = kT_e \quad (3.38)$$

A função erro é dada por:

$$Q = \frac{1}{2\pi} \int_x^\infty e^{-\frac{z^2}{2}} dz \quad (3.39)$$

onde:

- $k$  = constante de Boltzmann
- $T_e$  = temperatura equivalente de ruído na entrada do receptor

A temperatura equivalente de ruído na entrada do receptor é dada pela seguinte fórmula:

$$T_e = \frac{T_a}{at} + \left(1 - \frac{1}{at}\right) T_c + T_r \quad (3.40)$$

sendo:

$$T_r = (F - 1) 290 \quad (3.41)$$

onde:

- $T_a$  = temperatura de ruído da antena
- $a_t$  = atenuação do cabo ou guia de onda que liga a antena ao receptor
- $T_c$  = temperatura do cabo ou guia
- $T_r$  = temperatura de ruído do receptor
- $F$  = fator de ruído do receptor

Na prática é mais conhecido o termo de figura de ruído, que nada mais é do que o logaritmo do fator de ruído.

Nos sistemas pulsados, a qualidade da transmissão do sinal é função da probabilidade de erro, que por sua vez, é função da energia do bit e da densidade espectral de ruído. Nos sistemas analógicos, a qualidade é função direta da relação sinal-ruído. O espectro da densidade de potência de um sinal QPSK é na teoria infinito, ficando na prática limitado pela pequena amplitude de seus componentes, tal qual os sistemas FM. A amplitude dos sinais QPSK é na teoria constante, na prática contudo [19] devido a troca de fase de  $\pi$  radianos a amplitude do sinal pode passar por um valor nulo em um dado instante, e deste modo ocasiona problemas de sincronismo afetando a demodulação dos sinais. Do ponto de vista da radiação é interessante notar-se que a perda de sincronismo causa uma modulação AM nos sinais TDMA. Alterações nesta técnica de modulação foram introduzidas para se corrigir o problema da perda momentânea de sincronismo, surgindo os sistemas OFFSETQPSK ( OPSK ) e  $\frac{\pi}{4}$ QPSK. O sistema de modulação adotado atualmente é o  $\frac{\pi}{4}$ QPSK o qual possui vantagens sobre o OPSQ. Este sistema minimiza esta perda de sincronismo e deste modo diminui a modulação residual AM existente no sinal.

Outro tipo de modulação usado em telefonia celular é o CDMA (code division multiple access). A equação de um sinal com modulação deste tipo vale:

$$s_{ss}(t) = \sqrt{\frac{2E_s}{T_s}} m(t)p(t) \cos(2\pi f_c t + \theta) \quad (3.42)$$

onde:

- $m(t)$  = é a seqüência de dados a serem transmitidos
- $p(t)$  = é a seqüência de código pseudo randômica
- $f_c$  = frequência da portadora
- $\theta$  = fase da portadora
- $T_s$  = duração de cada pulso de dados
- $E_s$  = amplitude dos pulsos de dados

A duração de cada pulso da seqüência de código pseudo randômica vale  $T_c$ . A razão  $\frac{T_s}{T_c}$  é muito maior que a unidade e representa o ganho de processamento da modulação. Este tipo de modulação, na sua primeira geração, espalha um sinal de 30KHz de largura de banda em um sinal com 1.23Mhz de banda, sobrepondo varios sinais com códigos diferentes nesta mesma banda. É interessante notar que esta técnica de modulação apresenta efeitos de modulação AM no sinal. A probabilidade de erro de um sistema deste tipo é dada por:

$$P_e = Q \left[ \frac{1}{\sqrt{\frac{k-1}{3N} + \frac{N_0}{2E_b}}} \right] \quad (3.43)$$

onde:

- $N$  = número de bits da seqüência pseudo randômica,  $p(t)$
- $k$  = número de usuários por canal de RF

- $E_b$  = energia por bit do sinal de dados  $m(t)$
- $N_0$  = densidade espectral de ruído

É conveniente notar-se que este tipo de modulação é mais eficaz quanto maior for a energia do bit e quanto maior for a sequência pseudo randômica.

Os sistemas “wireless” adotam sistemas de modulação do tipo TDMA ou CDMA. É interessante ressaltar é que os sistemas modernos apresentam modulação AM em seus sinais, e que o corpo humano pode detectar sinais com modulação AM.

### 3.4 Valores adotados em projetos

Para sinais de radio FM, os valores de campos elétricos adotados em projetos variam de 54 dbu, correspondendo a  $501\mu V/m$ , até 74dbu, correspondendo a  $5010\mu V/m$ . Para sinais de televisão, os valores de campo situam-se entre 54dbu, á 80dbu, correspondendo a  $10000\mu V/m$ . Para sinais de rádios móveis, telefonia celular e sistemas “wireless” os valores de potência mínima de recepção adotados, situam-se na faixa de -65 á -85dbm, o que considerando antenas de recepção de  $\frac{\lambda}{4}$  equivalem a campos elétricos de recepção entre  $270\mu V/m$  á  $2700\mu V/m$ , correspondentes a 48.6dbu e 68.6dbu. A Tabela 3.1 resume os valores adotados para projeto nas áreas em estudo.

Estação	FM	TV	Radio
Campo elétrico ( $\mu V/m$ )	501 á 5010	501 á 10000	270 á 2700

Tabela 3.1: Valores de campos elétricos usuais

É conveniente ressaltar que valores de intensidade de campo muito elevados, que produzam valores de tensão nos receptores da ordem de 20mV [21] produzem uma recepção ruim, pois o receptor passa a apresentar problemas de intermodulação, degradando deste modo a qualidade da transmissão. Para exemplificar, no caso da

telefonia celular os aparelhos podem apresentar intermodulações com campos maiores que 1V/m. Deste modo os equipamentos devem operar dentro de certos limites de campo elétrico, para que não haja degradação do sinal de recepção, seja por falta de campo elétrico ou por excesso do mesmo. Outro fator digno de nota, é que os sistemas celulares a partir da segunda geração, apresentam sistemas de regulação de potência de saída, ou seja, se o aparelho portátil estiver próximo da estação radio base, esta emitirá menos potência e enviará um comando para o aparelho proceder da mesma forma. Deste modo sempre se tenderá a manter o campo elétrico na faixa pretendida pelo projeto economizando-se potência. Também é digno de nota se ter em mente que os sistemas de telefonia celular e sistemas “wireless ” a potência máxima de saída da estação radio base, irá depender do tráfego da estação. Deste modo para que se possa avaliar corretamente a emissão de intensidade de radiação de uma dada estação deve-se ter certeza que a mesma está operando com tráfego máximo. Para isto faz-se necessário que as medidas sejam feitas na hora de maior movimento (HMM).

Finalizando deve-se ressaltar que nas estações de radio FM e estações de TV as normas técnicas exigem que se apresente os contornos de três regiões:

- contorno primário
- contorno secundário
- contorno rural

Para os sistemas de telefonia celular os aparelhos possuem sete posições automáticas de controle de potência, indicando assim a existência de sete contornos. Todos estes contornos visam economizar potência, mantendo-se um ótimo nível de recepção. Deste modo vê-se claramente que existem contornos distintos nos diferentes sistemas, faz-se apenas necessário que os cuidados com a vida humana sejam inseridos neste contexto.

# Capítulo 4

## Normas Existentes

### 4.1 Introdução

Neste capítulo será abordado as principais diretrizes das normas existentes sobre radiações. Se verá com detalhe a diretriz para limitação da exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos variáveis no tempo (até 300GHz), publicada na revista *Health Physics* vol. 74 número 4, 1998 e tomada como diretriz para o Brasil pela Anatel (Agência Nacional de Telecomunicações) desde dezembro de 1999.

Estas normas são baseadas no efeito térmico das radiações, não levando-se em consideração, o efeito atérmico das mesmas. Pode-se encontrar na literatura várias publicações que sugerem haver ligação entre a irradiação de campos elétricos e magnéticos (tanto de alta quanto de baixa frequência) e efeitos biológicos de natureza não térmica (como por exemplo os citados na página 8 desta dissertação). Porém existem tantos outros que afirmam não haver ligação nenhuma, ou pelo menos estatisticamente tal ligação não pode ser comprovada. Diversos experimentos [8] indicaram, que a exposição de seres humanos por cerca de 30 minutos a uma onda eletromagnética com radiação de corpo inteiro entre 1 a 4W/kg, resulta num aumento de temperatura do corpo de  $1^{\circ}\text{C}$ . Este dado fundamental é a base dos valores restritivos adotados pelas

diversas normas.

## 4.2 Efeitos biológicos no corpo humano

Neste tópico será mostrado um resumo dos principais estudos já realizados sobre efeitos atérmicos nos seres vivos. Os seguintes sintomas foram apontados por diversas pessoas quando submetidas a radiações eletromagnéticas: dor de cabeça, fadiga, perturbação do sono, irritabilidade, depressão, dificuldade de memorização e instabilidade de pressão.

### 4.2.1 Sistema Nervoso

- Bachurim (Influence of small doses of electromagnetic waves on some human organs and systems, *jprs*, 75515, 1979) Em estudo clínico com pessoas que trabalhavam em rádio e televisão foram notados distúrbios descritos acima para níveis de radiação entre 20 e 60  $\mu W/cm^2$ .
- Huai (Biological effects and dosimetry of nonionizing radiation, Nato conference, Italy, 1981) notou mesmos distúrbios em pessoas que trabalhavam em fábricas submetidas a níveis de radiação menores que 50  $\mu W/cm^2$ .
- Bourgeois (The effect of microwave exposure upon the auditory threshold of humans, Baylor Univ., phd dissertation, 1967) fez experiências com jovens e constatou que radiações de 500 $\mu W/cm^2$  irradiadas durante 2 minutos provocavam alterações substanciais no nível do limiar de audição.
- Mann and Roschke (Effects of pulsed high frequency electromagnetic fields on human sleep, *Neuropsychobiology*, 33, 1996) detectaram alterações no exame EEG de pessoas submetidas a radiações de ondas eletromagnéticas provenientes de

equipamentos celulares com níveis de  $50\mu W/cm^2$ . Estas alterações provocavam distúrbios no sono.

- Dumanskij and Shandala (Biologic effects and health hazards of microwave radiation, Symposium Warsaw, 1973) relataram alterações no exame EEG de ratos e coelhos, quando submetidos a níveis de radiações de até  $.06\mu W/cm^2$ .
- Gabovich et al. (Gigiyena i Sanitariya, jprs, 75515, 1979) reportaram que ratos submetidos a  $100\mu W/cm^2$ , durante 2 horas por dia apresentavam distúrbios nos reflexos e no sono.
- Chiang et al. (Health effects of Environmental eletromagnetic fields, journal of bioelectricity, 8, 1989) pesquisaram pessoas morando perto de antenas de radares, submetidas a níveis de radiação de  $10\mu W/cm^2$  e reportaram perda em testes de memória e perda em testes de reação visual.
- Kunjilwuar et al. (Effect of amplitude modulated RF radiation on cholinergic system of developing rats, Brain Researct, 601, 1993) reportaram alterações no efluxo de íons de cálcio do tecido cerebral quando o mesmo era submetido a níveis de radiação de até  $.0005mW/g$ . A frequência de teste foi de 915MHz.
- Bawin et al. (Effects of modulated VHF fields on the central nervous system, ANN NY Acad. Sci, 247, 1975) reportou que a exposição de galinhas a ondas de 147MHz, com modulação de 16Hz causavam efluxo de cálcio.
- Blackmam et al. (Induction of calcium-ion efflux from brain tissue by radiofrequency radiation, Radio Sci, 14, 1979) confirmou a experiência de Bawin e verificou que o máximo efeito se apresentava com modulação de 16hz. Foram testados sinais modulantes entre 3 e 30 hz .

- Kittel et al. (Qualitative enzyme histochemistry and microanalysis reveals changes in ultra-structural distribution of calcium and calcium activated ATPases after microwave irradiation of the medial habenula, *Acta Neuropathol*, 92, 1996) fizeram experiências com macacos na frequência de 2.45GHz modulada com 16Hz e confirmaram variação no efluxo de cálcio das células do cérebro.
- Adey et al. (Effects of weak amplitude modulated microwave fields on calcium efflux from awake cat cerebral cortex, *Bioelectromagnetics*, 3, 1982) confirmou o efluxo de cálcio nas células do cérebro de gatos expostos a radiação de 450MHz com modulação AM de 16Hz e com SAR de .29mW/g.
- Preece et al. (Effect of a 915MHz simulated mobile phone signal on cognitive function in man, *Int J Radiat Biol.*, 75, 1999) reportaram alterações em teste de memória realizada com voluntários quando irradiados por ondas provenientes de telefones celulares portáteis, com potências de 1 e .125W, na frequência de 915MHz.
- Koivisto et al. (The effects of electromagnetic field emitted by GSM phones on working memory, *Neuro Report*, 11, 2000) reportou alterações em testes com voluntários, similares ao da experiência de Preece.
- Sienkiewicz et al. (*Neuro Report*, 2000) reportaram que ratos expostos a ondas de 900MHz pulsadas a taxa de 217Hz com SAR de .05mW/kg, apresentavam performance fraca em realizar tarefas quando comparados a animais não irradiados.
- Hansson Mild et al. (Comparison of symptoms experienced by users of analogue and digital mobile phones, *Arbetslivsrapport*, 23, 1998) reportaram pesquisa realizada com 11000 usuários de telefone celular e concluíram que havia relação entre dores de cabeça e sensação de fadiga com o uso dos aparelhos. Notaram

também forte relação entre os sintomas e a quantidade de horas de uso do celular.

#### 4.2.2 Câncer

- Robinette et al.[8] estudaram a mortalidade por câncer em pessoas que na guerra da coréia trabalhavam com radiações de até  $1\text{mW}/\text{cm}^2$ . O estudo indicou pouca relação entre a incidência de câncer e a radiação.
- Lagorio et al. [8] estudaram a incidência de câncer em operários da indústria que trabalhavam com radiações superiores a  $1\text{mW}/\text{cm}^2$ . Foram detectadas evidências entre a incidência de câncer e a radiação, embora a pesquisa ressalte o pequeno universo da amostra.
- Repacholi et al. ( Lymphomas in  $E_{\mu}$ -Pim 1 Transgenic mice exposed to pulsed 900Mhz eletromagnect fields, Radiation, 147, 1997) relataram a maior incidência de linfomas em ratos submetidos a SAR entre .01 e  $4.2\text{W}/\text{kg}$ , na frequência de 900MHz, estudados num período de 18 meses.
- Rothman et al.(Overall mortality of cellular telephone customers, Epidemiology, 7, 1996) estudaram o uso de fones de ouvido em aparelhos celulares. Analizaram um universo de 250000 pessoas e concluíram que a incidência de câncer entre os usuários de fones de ouvido eram menores do que os que não usavam este artifício, porém os dados não foram estatisticamente significantes.
- Hardell et al.(Use of cellular telephones and the risk for brain tumours, Int J Oncol,15, 1999) estudaram pacientes com tumores no cérebro e concluíram que não havia evidência de relação entre os tumores e o uso do equipamento celular.
- Hocking et al. (Cancer incidence and mortality and proximity to TV Towers, Med J Aust, 165, 1996) realizaram pesquisas em Sidnei, Austrália, com pessoas

que moravam perto de torres de transmissão de estações de televisão. Concluíram que a incidência de casos de leucemia entre crianças era maior entre as que moravam perto das torres.

- Dolk et al. (Cancer incidence near radio and television transmitters in Great Britain, *Am J Epidemiol*, 145, 1997) relataram pesquisa feita em Londres entre pessoas que moravam perto de torres de televisão ou rádio e concluíram que até 2km das torres havia maior incidência de casos de leucemia em crianças, quando comparado com estatísticas da cidade inteira.

### 4.2.3 Coração

- Zmyslony et al. (Evaluation of selected parameters of circulatory system function in various occupations groups exposed to high frequency electromagnetic fields, *Medycyna Pracy*, 47, 1996) reportaram que trabalhadores em estações de rádio, apresentaram 6 vezes mais risco de distúrbios no exame ECG quando comparados a trabalhadores não expostos a radiação.
- McRee (Soviet and Eastern European research on biological effects of microwave radiation, *Proc. IEEE*, 68, 1980) reportou que coelhos submetidos a radiações de 2375MHz, durante 60 dias com níveis de  $.6 \mu W/cm^2$ , apresentaram alterações no exame do ECG.

### 4.2.4 Reprodução

- Lai and Singh [8] relataram que ratos submetidos a SAR entre .6 e 1.2W/kg, apresentavam quebra na molécula de DNA nas células do cérebro.
- Danniells et al. (Transgenic nematodes as biomonitors of microwave induced stress, *Mutat Res*, 399, 1998) reportaram que genes expostos ao aquecimento

provocado por radiação de 750MHz/.5W, modulada ou não, por poucas horas, apresentavam alterações na proteína.

- Grundler et al. (Mechanisms of electromagnetic interaction with cellular systems, *Naturwissenschaften*, 79, 1992) reportaram que células submetidas a radiação de baixa potência na frequência de 41Ghz, apresentavam alterações na sua taxa de crescimento.
- Kwee and Raskmark (Changes in cell proliferation due to environmental non ionizing radiation, *Bioelectrochem Bioenerg*, 44, 1998) reportaram uma diminuição na taxa de proliferação de células quando submetidas a radiação.
- Malyapa et al. (Measurements of DNA damage following exposure to electromagnetic radiation in the cellular communications frequency band, *Radiat Res*, 148, 1997) reportaram a quebra de moléculas DNA quando irradiadas por ondas eletromagnéticas na faixa de 836MHz, com modulação CDMA.

Além destas experiências a ciência tem conhecimento de pessoas que “ouvem ” frequências de ondas portadoras, como descrito por Justeson (*Behavioral and psychological effects of microwave radiation*, *Bull. NY acad. Med*, 55, 1979) e Firstenberg (*What does electromagnetic sensitivity have to do with porphyria?*, *Electrical sensitivity news*, 2, 1996) sendo que este último estimou que 2% da população é suscetível a tornar-se sensível a radiação.

Estes são argumentos fortes que apontam para o fato de que os efeitos atômicos, devem ser levados em consideração na limitação de valores para a radiação máxima suportável pelo ser humano. Entretanto, volto a ressaltar que existem outros estudos indicando que ainda não existe uma ligação comprovada entre estes experimentos e o efeito atômico.

### 4.3 Diretrizes para limitação a exposição de ondas eletromagnéticas

A absorção de energia pelo corpo a taxas superiores a  $4\text{W/kg}$ , faz com que a temperatura do corpo aumente para em seguida se estabilizar por efeito da ativação de mecanismos termoreguladores. A exposição prolongada acaba conduzindo ao colapso destes mecanismos termoreguladores. As alterações nestes mecanismos podem ter início quando a temperatura sobe entre  $.2$  e  $.3^\circ\text{C}$ . Por esta razão o efeito térmico é o que baliza as atuais normas de proteção existentes, embora já se reconheça alguns efeitos atérmico, conforme relatado no tópico anterior. O valor de  $4\text{W/kg}$ , foi adotado pelas principais normas:

- ACGHI;
- IRPA;
- IEEE;
- ICNIRP,

como sendo o máximo valor de radiação suportável pelo ser humano. Deste modo a norma do ICNIRP, escolhida pela Anatel como o padrão a ser adotado no Brasil, adota um fator de segurança 10 vezes menor, ao limitar em  $.4\text{W/kg}$ , a quantidade de radiação máxima que um ser humano deve ser exposto em condições controladas. Entende-se como tal, a situação em que o indivíduo sabe que está sendo exposto a radiação, é o caso das pessoas que trabalham com radiações e que portanto devem saber se proteger. Para o público em geral, a norma adota um fator de segurança 50 vezes menor, fixando a radiação máxima que um ser humano pode suportar em  $.08\text{W/kg}$ .

### 4.3.1 Resumo da diretriz da Anatel

O conselho diretor da Anatel, em sua reunião de 15 de julho de 1999, decidiu adotar, como referência provisória para avaliação da exposição humana a campos eletromagnéticos, os limites propostos pela Comissão Internacional para Proteção Contra Radiações Não Ionizantes-ICNIRP. Os limites mencionados constam da publicação “ Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic, and Electromagnetic Fields (up to 300GHz), Health Physics Vol.74, número 4, 1998 ”. Um resumo desta publicação é apresentado com ênfase na faixa de frequência entre 100MHz e 3000 MHz, objeto desta dissertação. O artigo aborda os campos eletromagnéticos (CEM) , desde os campos de baixa frequência (50/60Hz), até as frequências altas de 300GHz. O artigo, a depender da faixa de frequência, recomenda a medição da densidade de corrente (J), da taxa de absorção específica (SAR) e da densidade de potencia (S), como grandezas físicas ideais para especificar estas restrições. Na faixa de 100KHz á 10GHz, o estudo recomenda o uso da SAR. No tocante a influência da radiação sobre o corpo humano,o estudo na página 7 diz : “ A ICNIRP concluiu no caso dos efeitos potenciais da exposição a longo prazo, tais como aumento de risco de câncer ,que os dados disponíveis são insuficientes para prover uma base para fixar restrições a exposição, embora pesquisas epidemiológicas tenham produzido evidências sugestivas, mas não convincentes, de uma associação entre possíveis efeitos carcinogênicos e a exposição a densidade de fluxo magnético de 50/60Hz em níveis substancialmente inferiores ao recomendado nestas diretrizes. Por esta razão, estas diretrizes são baseadas em efeito na saúde de caráter imediato, a curto prazo, tais como estimulação dos nervos e músculos e elevação da temperatura nos tecidos, resultante da absorção de energia durante exposição a campos eletromagnéticos ”. Com respeito a absorção de energia pelo corpo humano, nas frequências de 20 a 300MHz, pode ocorrer uma absorção relativamente alta no corpo todo. Para frequências entre 300MHz e 10GHz, ocorre absorção local significativa e não uniforme. Deve-se notar

que nestas faixas de frequência estão as estações transmissoras de ondas eletromagnéticas, objeto de estudo desta dissertação. O documento, na sua página 21, inicia o estudo para frequência de 100KHz a 300GHz. Na sua página 23, o documento aponta : “Estudos realizados com trabalhadores em ambientes termicamente estressantes, mostraram que a elevação da temperatura corporal, até níveis próximos ao estresse fisiológico devido ao calor, piora o desempenho de tarefas simples ”. Na sua página 24, anota-se: ”A exposição prolongada de animais a radiação de microondas, em níveis de intensidade que elevam a temperatura do corpo, acaba conduzindo ao colapso destes mecanismos termoreguladores. Vários estudos com roedores e macacos, demonstraram também uma componente comportamental nas respostas termoreguladoras. Foi observada uma queda no desempenho de tarefas por macacos e ratos, para valores de SAR entre 1 e 3 W/Kg (Stern et al. 1979 ; Adair e Adams 1980; de Lorge e Ezell 1980; D ’Andrea et al. 1986). Nos macacos, as alterações no comportamento termoregulador começam quando a temperatura na região do hipotálamo aumenta apenas .2-.3°C (Adair et al. 1984). O hipotálamo é considerado como sendo o centro de controle de processos termoreguladores normais, e sua atividade pode ser modificada por um pequeno aumento da temperatura local, sob as mesmas condições em que a temperatura retal permanece constante. Sob condições de exposição parcial do corpo a CEM intensos, pode ocorrer um dano térmico significativo em tecidos sensíveis, tais como encontrados nos olhos e nos testículos. Cataratas nos olhos de coelhos, resultaram da exposição a microondas, com 2-3 horas de duração e SAR de 100-140W/Kg, causando temperaturas lenticulares de 41-43°C (Guy et al.) ”. Na página 25 encontra-se a seguinte citação, envolvendo diretamente equipamentos celulares: “ Tem havido recentemente interesse considerável nos possíveis efeitos carcinogênicos da exposição a campos de microondas com frequências na faixa ocupada por sistemas de comunicação largamente utilizados, incluindo telefones móveis portáteis e estações rádio base. Os resultados de pesquisas nestas áreas foram sumariados pela ICNIRP

(1996). Resumidamente, há muitos relatórios sugerindo que os campos de microondas não são mutagênicos, e que portanto é improvável que a exposição a estes campos possa iniciar a carcinogênese. Em contraste, alguns relatórios recentes sugerem que a exposição de roedores a campos de microondas, em níveis de SAR na ordem de 1W/kg, podem produzir rupturas no filamento de DNA de testículos e de tecidos do cérebro (Sakar et al. 1994; Lai e Singh 1995,1996). Contudo, estes relatórios apresentaram deficiências metodológicas que podem ter afetado seus resultados de forma significativa”. Ainda nesta mesma página, o estudo faz referência a campos pulsados. Este tipo de modulação indica que um mecanismo não-térmico pode estar agindo. O estudo afirma que tal fato ainda precisa ser investigado. Na página 26, é digna de nota a seguinte citação: “ Os campos pulsados de microondas, comparados com a radiação de onda contínua (CW), com a mesma taxa média de absorção de energia nos tecidos, são geralmente mais eficazes em provocar uma resposta biológica, especialmente quando há um limiar bem definido que deve ser superado para evidenciar o efeito. O “efeito auditivo de microondas” é um exemplo bem conhecido (Frey 1961; Frey e Messenger 1973; Lin 1978) que pessoas com audição normal, podem perceber pela audição campos modulados por pulsos, com frequências de aproximadamente 200MHz a 6.5GHz. A sensação auditiva tem sido descrita de diversos modos como um sumbido, estalo, ou estouro, dependendo das características de modulação do campo. A exposição repetitiva ou prolongada, a efeitos auditivos de microondas, pode ser estressante e potencialmente nociva. Alguns relatórios sugerem que retina, iris e endotélio da córnea dos olhos dos primatas, são sensíveis a radiação de microondas pulsadas de nível baixo (Keus et al. 1985). Foram relatadas alterações degenerativas nas células da retina sensíveis a luz, para níveis de energia absorvida tão baixos quanto 26mJ/kg. Entretanto, uma tentativa feita num laboratório independente, para reproduzir parcialmente estes resultados para campos não-pulsados, não teve sucesso (Kamimura et al. 1994). Portanto, é impossível no momento avaliar as implicações

potenciais para a saúde, dos resultados iniciais de Kues et al. ” . Finalizando, o artigo conclui na página 27 o seguinte sobre campos pulsados: “ Em resumo, a literatura sobre efeitos atérmicos de campos eletromagnéticos AM é tão complexa, a validade dos efeitos relatados tão precariamente estabelecida, e a importância dos efeitos para a saúde humana tão incerta, que é impossível usar este volume de informações como base para estabelecer limites sobre exposição humana a estes campos. ”

Na página 31 é digno de nota: “ Efeitos biológicos e na saúde, estabelecidos na faixa de frequências de 10MHz até alguns GHz, são consistentes com respostas a uma elevação da temperatura corporal superior a  $1^{\circ} C$ . Em condições ambientais moderadas, este nível de aumento de temperatura resulta da exposição de pessoas a uma SAR de corpo inteiro de aproximadamente 4W/kg durante cerca de 30 minutos. Por esta razão, uma SAR média, de corpo inteiro, de .4W/kg, foi escolhida como sendo a restrição que garante proteção adequada no caso de exposição ocupacional. Um fator de segurança adicional, igual a 5, foi introduzido para a exposição do público em geral, resultando, assim, um limite de .08W/kg para a SAR média do corpo inteiro. ” As restrições básicas para SAR média de corpo inteiro e SAR localizada, para frequências entre 10MHz e 10GHz constam da Tabela 4.1. Observe-se que:

<b>Exposição</b>	<b>Frequência</b>	<b>corpo todo</b>	<b>cabeça e tronco</b>	<b>membros</b>
Ocupacional	10MHz -10GHz	.4W/kg	10W/kg	20W/kg
Público em geral	10MHz-10GHz	.08W/kg	2W/kg	4W/kg

Tabela 4.1: Valores de SAR

- Todas os valores de SAR devem ter sua média avaliada ao longo de qualquer intervalo de 6 minutos.
- No cálculo do valor médio da SAR localizada, deve ser utilizada massa de 10g de tecido contíguo.

A norma também apresenta níveis de referência obtidos das restrições básicas acima por modelamento matemático e e por extrapolação de resultados de investigações de laboratório em frequências específicas. Os níveis são dados para a condição de máximo acoplamento entre o indivíduo e o campo eletromagnético, fornecendo desta forma , o máximo de proteção. A Tabela 4.2 mostra os níveis de referência para exposição ocupacional, sendo que:

Frequência	campo E	campo H	Densidade de Potência
10-400MHz	61V/m	.16A/m	10W/m <sup>2</sup>
400-2000MHz	$3\sqrt{f}V/m$	$.008\sqrt{f}A/m$	$\frac{f}{40}W/m^2$
2-300GHz	137V/m	.36A/m	50W/m <sup>2</sup>

Tabela 4.2: Níveis de referência ocupacionais

- Os valores devem ser calculados em qualquer periodo de 6 minutos.
- O valor da frequência deve ser em MHz.

A Tabela 4.3 mostra os valores de referência para exposição do público em geral onde:

Frequência	campo E	campo H	campo B	Densidade de Potência
10-400MHz	28V/m	.073A/m	.092 $\mu T$	2W/m <sup>2</sup>
400-2000MHz	$1,375\sqrt{f}V/m$	$.0037\sqrt{f}A/m$	$.0046\sqrt{f}\mu T$	$\frac{f}{200}W/m^2$
2-300GHz	61V/m	.16A/m	.2 $\mu T$	10W/m <sup>2</sup>

Tabela 4.3: Níveis de referência para o público

- Os valores devem ser calculados em qualquer periodo de 6 minutos.
- O valor da frequência deve ser em MHz.

Finalizando, o estudo recomenda para cálculo de radiações provenientes de várias fontes emisoras, que seus valores sejam considerados cumulativamente.

### 4.3.2 Norma Russa

A antiga URSS adota, desde 1959, os valores de proteção, apresentados na Tabela 4.4

Proteção	$\frac{Densidade}{\mu W/cm^2}$
Ocupacional	10
Público	1

Tabela 4.4: Valores adotados na URSS

Estes valores sinalizam que o público em geral, não deve ficar exposto a campos elétricos com intensidade superior a  $1.94V/m$ . Todos os outros países do antigo bloco comunista adotavam valores idênticos a estes [15], para o público em geral, e um pouco superiores para proteção ocupacional ( $25\mu W/cm^2$ ).

### 4.3.3 Norma Italiana

Em 1998, a Itália, adotou como norma de proteção [11] o valor de:  $10\mu W/cm^2$ , que não deve ser exedido para exposição do público em geral. Esta grandeza indica um valor de campo elétrico máximo de  $6V/m$ , como o valor limite que o público em geral deve suportar.

### 4.3.4 Norma Suíça

A Suíça, [11]seguindo o exemplo da Itália, adotou em 2000 o valor de:  $4.2\mu W/cm^2$ , correspondendo a um campo elétrico de  $4V/m$ , como valor limite para exposição ao público em geral.

### 4.3.5 Norma CEPRAM Bahia

O Conselho Estadual do Meio Ambiente do Estado da Bahia - CEPRAM adotou os seguintes valores como normas de proteção, na sua resolução de número 2494 de 22 de setembro de 2000, válida para equipamentos celulares.

- Em hospitais, creches e clínicas médicas, o nível de radiação não poderá ultrapassar :  $1.94\text{V/m}$  ou  $.01\text{W/m}^2$
- Em qualquer unidade habitacional, o nível de radiação não poderá ultrapassar :  $9\text{V/m}$  ou  $.21\text{W/m}^2$ .

### 4.3.6 Leis Municipais

A cidade de Campinas, promulgou em 22 de dezembro de 1997, uma lei que trata sobre o assunto. Porto Alegre também promulgou em 19 de janeiro de 2000 uma lei, que regulamenta os limites de radiação de equipamentos celulares.

## 4.4 Comentários

Neste capítulo foram apresentados diversos estudos que demonstram a importância dos efeitos atômicos, efeitos estes ainda não levados em consideração pela principais normas mundiais que se ocupam do tema. O resumo do artigo da revista Health Physics ressalta bem este fato. É digno de nota que a lei municipal, do município de Porto Alegre, bem como a norma estadual do meio ambiente do estado da Bahia, só tenham abordado o assunto das estações de telefonia celular, sem mencionar as outras fontes de radiações existentes nesta faixa. Isto só vem a reforçar o comentário feito no início desta dissertação, sobre o fato da telefonia celular, ter se tornado o foco de atenção do problema de radiação de ondas eletromagnéticas. O potencial poluidor das

estações de FM e TV é maior, mas no entretanto não tem causado tanta polêmica. É interessante se notar, que o assunto preocupa a população em geral, haja visto a proliferação de leis municipais a respeito. Finalizando, é conveniente ressaltar-se, que países como a Itália e a Suíça foram os primeiros do bloco ocidental a acompanharem os valores adotados pelos países orientais, talvez baseados no princípio da precaução que diz: “Precaução é um critério de abordagem de riscos aplicado em circunstâncias com alto grau de incerteza científica, refletindo a necessidade de tomar atitudes face a riscos potencialmente sérios, sem esperar resultados da pesquisa científica”.

# Capítulo 5

## Campo Elétrico e Medidas Realizadas

Neste capítulo será proposto um modelo para o corpo humano, que será submetido a uma onda plana. Será verificado como se comporta o campo elétrico induzido neste modelo, bem como a distribuição da SAR dentro do corpo. Pretende-se analisar o comportamento do modelo nas frequências de 100MHz, 400MHz, 1GHz e 3GHz. Desta forma se estará estudando as faixas de frequência atualmente mais usadas no cotidiano da vida humana.

### 5.1 Modelo adotado

De acordo com a teoria que foi apresentada no Capítulo 2, e considerando o que preconiza o atlas do corpo humano [23], o corpo humano está dividido em três partes:

- Cabeça
- Tronco
- Membros

Para a cabeça foram consideradas as camadas descritas na Tabela 5.1 com suas respectivas dimensões para uma pessoa padrão.

camada	dimensão(mm)
músculo	2
gordura	4
osso	9
tecido cerebral	110
osso	9
gordura	4
músculo	2

Tabela 5.1: Camadas da cabeça

Para o tronco foi considerada a região torácica com suas respectivas camadas e dimensões conforme Tabela 5.2 .

Para os membros foram consideradas as pernas com as seguintes camadas e dimensões, conforme Tabela 5.3.

As constantes elétricas das diversas camadas, foram tiradas das Figuras 2.8, 2.9 e 2.10 apresentadas no Capítulo 2, adotando-se uma media dos valores apresentados e as constantes adotadas nesta dissertação são mostrados na Tabela 5.4.

Evidentemente, as camadas de músculo e gordura são variáveis de acordo com a aparência do indivíduo. Os valores ora adotados como referência neste estudo são valores medios.

Para a densidade dos tecidos, foram considerados os valores [3] apresentados na Figura 2.11 no Capítulo 2. Para os demais tecidos foi adotado a densidade do sangue [2] . Os valores usados são mostrados na Tabela 5.5.

Camada	Dimensão(mm)
Pele	2
Gordura	20
Músculo	20
Osso	15
Coração	70
Pulmão	90
Osso	15
Músculo	20
Gordura	20
Pele	2

Tabela 5.2: Camadas para o tórax

camada	dimensão(mm)
pele	2
gordura	10
músculo	30
osso	90
músculo	30
gordura	10
pele	2

Tabela 5.3: Camadas para a perna

Frequência(MHz)	100	400	1000	3000
Camada				
Pele $\frac{\sigma}{\epsilon}$	$\frac{1}{73}$	$\frac{1.15}{53}$	$\frac{1.3}{51}$	$\frac{2.22}{47}$
Gordura $\frac{\sigma}{\epsilon}$	$\frac{.044}{5}$	$\frac{.054}{5.5}$	$\frac{.11}{6.4}$	$\frac{.15}{5.6}$
Musculo $\frac{\sigma}{\epsilon}$	$\frac{1}{73}$	$\frac{1.15}{53}$	$\frac{1.3}{51}$	$\frac{2.22}{47}$
Osso $\frac{\sigma}{\epsilon}$	$\frac{.027}{7}$	$\frac{.04}{6}$	$\frac{.06}{5.8}$	$\frac{.16}{5}$
Pulmão $\frac{\sigma}{\epsilon}$	$\frac{.53}{35}$	$\frac{.6}{35}$	$\frac{.73}{35}$	$\frac{.8}{35}$
Coração $\frac{\sigma}{\epsilon}$	$\frac{.95}{63}$	$\frac{1.08}{54}$	$\frac{1.2}{52}$	$\frac{2}{48}$
Tecido cerebral $\frac{\sigma}{\epsilon}$	$\frac{.53}{82}$	$\frac{.6}{50}$	$\frac{.79}{34.4}$	$\frac{2.09}{32.8}$

Tabela 5.4: Constantes elétricas adotadas

Tecido	Músculo	Gordura	Osso	Demais órgãos
Densidade(kg/m <sup>3</sup> )	700	940	1790	1060

Tabela 5.5: Densidade dos tecidos

## 5.2 Cálculo do campo elétrico

Para o cálculo do campo elétrico e da SAR no interior do corpo humano, foi adotada a teoria apresentada no Capítulo 3, considerando a incidência de uma onda plana no modelo proposto, conforme mostrado na Figura 5.1.

Figura 5.1: Modelo adotado

Foram criados na linguagem do Matlab, os programas apresentados a seguir onde com o uso dos mesmos pode-se calcular os valores de campo elétrico e de SAR no interior do corpo humano. Foram criados programas para cálculo na região da cabeça, do tórax e das pernas. Desenvolveu-se também um programa capaz de calcular o campo elétrico que penetra no corpo, variando-se a dimensão padrão de qualquer camada dentro do intervalo de 50% do seu valor. Deste modo pode-se verificar a influência do comprimento das camadas com o campo elétrico. Finalmente foi desenvolvido outro programa, para cálculo do campo e SAR, para o modelo de uma só camada.

### 5.2.1 Programa para o cálculo do campo elétrico e da distribuição da SAR na cabeça

Este programa permite o cálculo do campo elétrico e da distribuição de SAR no interior da cabeça com base no modelo criado. Os dados de entrada para o mesmo são frequência, campo elétrico incidente na cabeça e a espessura das primeiras quatro camadas do modelo.

```
%Cálculo do campo elétrico na cabeça
%E=cabeca(f,Ei,m)
%A frequência f é dada em MHz, escolhida entre 100, 400, 1000 e 3000
%O campo elétrico incidente E é dado em V/m
%Os valores dos meios m, são suas espessuras, dados em mm para 4 camadas
%sendo: pele, gordura, osso, cérebro.
function E=cabeca(f,Ei,d2,d3,d4,d5)
u0=4*pi*10^-7;
e0=8.842*10^-12;
f=f*10^6;
n1=377;
n9=377;
t=f/10^6;
d6=d4;
d7=d3;
d8=d2;
if t==100
m2=[73 1 d2];
m8=m2;
m3=[5 .044 d3];
```

```
m7=m3;
m4=[73 1 d4];
m6=m4;
m5=[82 .6 d5];
elseif t==400
m2=[53 1.15 d2];
m8=m2;
m3=[5.5 .054 d3];
m7=m3;
m4=[53 1.15 d4];
m6=m4;
m5=[50 .6 d5];
elseif t==1000
m2=[51 1.3 d2];
m8=m2;
m3=[6.4 .11 d3];
m7=m3;
m4=[51 1.3 d4];
m6=m4;
m5=[34.4 .79 d5];
elseif t==3000
m2=[47 2.22 d2];
m8=m2;
m3=[5.6 .15 d3];
m7=m3;
m4=[47 2.22 d4];
m6=m4;
```

```

m5=[32.8 2.09 d5];
end
n2=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m2(2)+i*pi*f*e0*m2(1)));
n8=n2;
n3=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m3(2)+i*pi*f*e0*m3(1)));
n7=n3;
n4=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m4(2)+i*pi*f*e0*m4(1)));
n6=n4;
n5=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m5(2)+i*pi*f*e0*m5(1)));
j1=i*2*pi*f*u0/n1;
j9=j1;
j2=i*2*pi*f*u0/n2;
j8=j2;
j3=i*2*pi*f*u0/n3;
j7=j3;
j4=i*2*pi*f*u0/n4;
j6=j4;
j5=i*2*pi*f*u0/n5;
ZL7=n8*(n9+n8*tanh(j8*.001*m8(3)))/(n8+n9*tanh(j8*.001*m8(3)));
ZL6=n7*(ZL7+n7*tanh(j7*.001*m7(3)))/(n7+ZL7*tanh(j7*.001*m7(3)));
ZL5=n6*(ZL6+n6*tanh(j6*.001*m6(3)))/(n6+ZL6*tanh(j6*.001*m6(3)));
ZL4=n5*(ZL5+n5*tanh(j5*.001*m5(3)))/(n5+ZL5*tanh(j5*.001*m5(3)));
ZL3=n4*(ZL4+n4*tanh(j4*.001*m4(3)))/(n4+ZL4*tanh(j4*.001*m4(3)));
ZL2=n3*(ZL3+n3*tanh(j3*.001*m3(3)))/(n3+ZL3*tanh(j3*.001*m3(3)));
ZL1=n2*(ZL2+n2*tanh(j2*.001*m2(3)))/(n2+ZL2*tanh(j2*.001*m2(3)));
r1=(ZL1-n1)/(ZL1+n1);
r2=(ZL2-n2)/(ZL2+n2);

```

$$r3=(ZL3-n3)/(ZL3+n3)$$

$$r4=(ZL4-n4)/(ZL4+n4);$$

$$r5=(ZL5-n5)/(ZL5+n5);$$

$$r6=(ZL6-n6)/(ZL6+n6);$$

$$r7=(ZL7-n7)/(ZL7+n7);$$

$$r8=(n1-n8)/(n1+n8);$$

$$t1=1+r1;$$

$$t2=1+r2;$$

$$t3=1+r3;$$

$$t4=1+r4;$$

$$t5=1+r5;$$

$$t6=1+r6;$$

$$t7=1+r7;$$

$$t8=1+r8;$$

$$r2d2=r2*\exp(j2*-2*d2*.001);$$

$$r3d3=r3*\exp(j3*-2*d3*.001);$$

$$r4d4=r4*\exp(j4*-2*d4*.001);$$

$$r5d5=r5*\exp(j5*-2*d5*.001);$$

$$r6d6=r6*\exp(j6*-2*d6*.001);$$

$$r7d7=r7*\exp(j7*-2*d7*.001);$$

$$r8d8=r8*\exp(j8*-2*d8*.001);$$

$$t2d2=1+r2d2;$$

$$t3d3=1+r3d3;$$

$$t4d4=1+r4d4;$$

$$t5d5=1+r5d5;$$

$$t6d6=1+r6d6;$$

$$t7d7=1+r7d7;$$

```

t8d8=1+r8d8;
for n=1:(2*d2+2*d3+2*d4+d5+1)
z=(n-1)*.001;
M(n)=z;
if n<=d2+1
E(n)=(Ei*t1/t2d2)*exp(j2*-1*z)+(Ei*t1*r2d2/t2d2)*exp(j2*z);
Ed(n)=(Ei*t1/t2d2)*exp(j2*-1*z)
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m2(2)*Er^2/(2*700);
K(n)=SAR;
elseif (n>(d2+1))&(n<=(d2+d3+1))
z=((n-1)-d2)*.001;
Ei=Ed(d2);
E(n)=(Ei*t2/t3d3)*exp(j3*-1*z)+(Ei*t2*r3d3/t3d3)*exp(j3*z);
Ed(n)=(Ei*t2/t3d3)*exp(j3*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m3(2)*Er^2/(2*940);
K(n)=SAR;
elseif (n>(d2+d3+1))&(n<=(d4+d3+d2+1))
z=((n-1)-(d2+d3))*0.001;
Ei=Ed(d2+d3);
E(n)=(Ei*t3/t4d4)*exp(j4*-1*z)+(Ei*t3*r4d4/t4d4)*exp(j4*z);
Ed(n)=(Ei*t3/t4d4)*exp(j4*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;

```

```

SAR=m4(2)*Er^2/(2*1790);
K(n)=SAR;
elseif (n>(d4+d3+d2+1))&(n<=(d5+d4+d3+d2+1))
z=((n-1)-(d4+d3+d2))*0.001;
Ei=Ed(d2+d3+d4);
E(n)=(Ei*t4/t5d5)*exp(j5*-1*z)+(Ei*t4*r5d5/t5d5)*exp(j5*z);
Ed(n)=(Ei*t4/t5d5)*exp(j5*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m5(2)*Er^2/(2*1060);
K(n)=SAR;
elseif (n>(d5+d4+d3+d2+1))&(n<=(d6+d5+d4+d3+d2+1))
z=((n-1)-(d5+d4+d3+d2))*0.001;
Ei=Ed(d2+d3+d4+d5);
E(n)=(Ei*t5/t6d6)*exp(j6*-1*z)+(Ei*t5*r6d6/t6d6)*exp(j6*z);
Ed(n)=(Ei*t5/t6d6)*exp(j6*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m6(2)*Er^2/(2*1790);
K(n)=SAR;
elseif (n>(d6+d5+d4+d3+d2+1))&(n<=(d7+d6+d5+d4+d3+d2+1))
z=((n-1)-(d6+d5+d4+d3+d2))*0.001;
Ei=Ed(d2+d3+d4+d5+d6);
E(n)=(Ei*t6/t7d7)*exp(j7*-1*z)+(Ei*t6*r7d7/t7d7)*exp(j7*z);
Ed(n)=(Ei*t6/t7d7)*exp(j7*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;

```

```

SAR=m7(2)*Er^2/(2*940);
K(n)=SAR;
elseif (n>(d7+d6+d5+d4+d3+d2+1))&(n<=(d8+d7+d6+d5+d4+d3+d2+1))
z=((n-1)-(d7+d6+d5+d4+d3+d2))*0.001;
Ei=Ed(d2+d3+d4+d5+d6+d7);
E(n)=(Ei*t7/t8d8)*exp(j8*-1*z)+(Ei*t7*r8d8/t8d8)*exp(j8*z);
Ed(n)=(Ei*t7/t8d8)*exp(j8*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m8(2)*Er^2/(2*700);
K(n)=SAR;
end
end
y=M*1000;
E=X;
subplot(2,1,1)
plot(y,X)
grid on
xlabel('dimensão em mm')
ylabel('campo elétrico em v/m')
title('Penetração do campo elétrico na cabeça')
subplot(2,1,2)
plot(y,K)
grid on
xlabel('dimensão em mm')
ylabel('SAR em W/kg')
title('Distribuição da SAR na cabeça')

```

### 5.2.2 Programa para o cálculo do campo elétrico e da distribuição de SAR na perna

Este programa permite o cálculo do campo elétrico e da distribuição de SAR na perna com base no modelo criado. Os dados de entrada para o mesmo são frequência, campo elétrico incidente na perna e a espessura das primeiras quatro camadas do modelo.

```
%Cálculo do campo elétrico na perna
%E=perna(f,Ei,m)
%A frequência f é dada em MHz, escolhida entre 100, 400, 1000 e 3000
%O campo elétrico incidente E é dado em V/m
%Os valores dos meios m, são suas espessuras, dados em mm para 4 camadas
%sendo: pele, gordura, osso, cérebro.
function E=perna(f,Ei,d2,d3,d4,d5)
u0=4*pi*10^-7;
e0=8.842*10^-12;
f=f*10^6;
n1=377;
n9=377;
t=f/10^6;
d6=d4;
d7=d3;
d8=d2;
if t==100
m2=[73 1 d2];
m8=m2;
m3=[5 .044 d3];
m7=m3;
```

```
m4=[73 1 d4];
m6=m4;
m5=[7 .027 d5];
elseif t==400
m2=[53 1.15 d2];
m8=m2;
m3=[5.5 .054 d3];
m7=m3;
m4=[53 1.15 d4];
m6=m4;
m5=[6 .04 d5];
elseif t==1000
m2=[51 1.3 d2];
m8=m2;
m3=[6.4 .11 d3];
m7=m3;
m4=[51 1.3 d4];
m6=m4;
m5=[8 .06 d5];
elseif t==3000
m2=[47 2.22 d2];
m8=m2;
m3=[5.6 .15 d3];
m7=m3;
m4=[47 2.22 d4];
m6=m4;
m5=[5 .16 d5];
```

```

end
n2=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m2(2)+i*pi*f*e0*m2(1)));
n8=n2;
n3=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m3(2)+i*pi*f*e0*m3(1)));
n7=n3;
n4=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m4(2)+i*pi*f*e0*m4(1)));
n6=n4;
n5=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m5(2)+i*pi*f*e0*m5(1)));
j1=i*2*pi*f*u0/n1;
j9=j1;
j2=i*2*pi*f*u0/n2;
j8=j2;
j3=i*2*pi*f*u0/n3;
j7=j3;
j4=i*2*pi*f*u0/n4;
j6=j4;
j5=i*2*pi*f*u0/n5;
ZL7=n8*(n9+n8*tanh(j8*.001*m8(3)))/(n8+n9*tanh(j8*.001*m8(3)));
ZL6=n7*(ZL7+n7*tanh(j7*.001*m7(3)))/(n7+ZL7*tanh(j7*.001*m7(3)));
ZL5=n6*(ZL6+n6*tanh(j6*.001*m6(3)))/(n6+ZL6*tanh(j6*.001*m6(3)));
ZL4=n5*(ZL5+n5*tanh(j5*.001*m5(3)))/(n5+ZL5*tanh(j5*.001*m5(3)));
ZL3=n4*(ZL4+n4*tanh(j4*.001*m4(3)))/(n4+ZL4*tanh(j4*.001*m4(3)));
ZL2=n3*(ZL3+n3*tanh(j3*.001*m3(3)))/(n3+ZL3*tanh(j3*.001*m3(3)));
ZL1=n2*(ZL2+n2*tanh(j2*.001*m2(3)))/(n2+ZL2*tanh(j2*.001*m2(3)));
r1=(ZL1-n1)/(ZL1+n1);
r2=(ZL2-n2)/(ZL2+n2);
r3=(ZL3-n3)/(ZL3+n3)

```

$$r4=(ZL4-n4)/(ZL4+n4);$$

$$r5=(ZL5-n5)/(ZL5+n5);$$

$$r6=(ZL6-n6)/(ZL6+n6);$$

$$r7=(ZL7-n7)/(ZL7+n7);$$

$$r8=(n1-n8)/(n1+n8);$$

$$t1=1+r1;$$

$$t2=1+r2;$$

$$t3=1+r3;$$

$$t4=1+r4;$$

$$t5=1+r5;$$

$$t6=1+r6;$$

$$t7=1+r7;$$

$$t8=1+r8;$$

$$r2d2=r2*\exp(j2*-2*d2*.001);$$

$$r3d3=r3*\exp(j3*-2*d3*.001);$$

$$r4d4=r4*\exp(j4*-2*d4*.001);$$

$$r5d5=r5*\exp(j5*-2*d5*.001);$$

$$r6d6=r6*\exp(j6*-2*d6*.001);$$

$$r7d7=r7*\exp(j7*-2*d7*.001);$$

$$r8d8=r8*\exp(j8*-2*d8*.001);$$

$$t2d2=1+r2d2;$$

$$t3d3=1+r3d3;$$

$$t4d4=1+r4d4;$$

$$t5d5=1+r5d5;$$

$$t6d6=1+r6d6;$$

$$t7d7=1+r7d7;$$

$$t8d8=1+r8d8;$$

```

for n=1:(2*d2+2*d3+2*d4+d5+1)
z=(n-1)*.001;
M(n)=z;
if n<=d2
E(n)=(Ei*t1/t2d2)*exp(j2*-1*z)+(Ei*t1*r2d2/t2d2)*exp(j2*z);
Ed(n)=(Ei*t1/t2d2)*exp(j2*-1*z)
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m2(2)*Er^2/(2*700);
K(n)=SAR;
elseif (n>(d2+1))&(n<=(d2+d3+1))
z=((n-1)-d2)*.001;
Ei=Ed(d2);
E(n)=(Ei*t2/t3d3)*exp(j3*-1*z)+(Ei*t2*r3d3/t3d3)*exp(j3*z);
Ed(n)=(Ei*t2/t3d3)*exp(j3*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m3(2)*Er^2/(2*940);
K(n)=SAR;
elseif (n>(d2+d3+1))&(n<=(d4+d3+d2+1))
z=((n-1)-(d2+d3))*0.001;
Ei=Ed(d2+d3);
E(n)=(Ei*t3/t4d4)*exp(j4*-1*z)+(Ei*t3*r4d4/t4d4)*exp(j4*z);
Ed(n)=(Ei*t3/t4d4)*exp(j4*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m4(2)*Er^2/(2*700);

```

```

K(n)=SAR;
elseif (n>(d4+d3+d2+1))&(n<=(d5+d4+d3+d2+1))
z=((n-1)-(d4+d3+d2))*0.001;
Ei=Ed(d2+d3+d4);
E(n)=(Ei*t4/t5d5)*exp(j5*-1*z)+(Ei*t4*r5d5/t5d5)*exp(j5*z);
Ed(n)=(Ei*t4/t5d5)*exp(j5*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m5(2)*Er^2/(2*1790);
K(n)=SAR;
elseif (n>(d5+d4+d3+d2+1))&(n<=(d6+d5+d4+d3+d2+1))
z=((n-1)-(d5+d4+d3+d2))*0.001;
Ei=Ed(d2+d3+d4+d5);
E(n)=(Ei*t5/t6d6)*exp(j6*-1*z)+(Ei*t5*r6d6/t6d6)*exp(j6*z);
Ed(n)=(Ei*t5/t6d6)*exp(j6*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m6(2)*Er^2/(2*700);
K(n)=SAR;
elseif (n>(d6+d5+d4+d3+d2+1))&(n<=(d7+d6+d5+d4+d3+d2+1))
z=((n-1)-(d6+d5+d4+d3+d2))*0.001;
Ei=Ed(d2+d3+d4+d5+d6);
E(n)=(Ei*t6/t7d7)*exp(j7*-1*z)+(Ei*t6*r7d7/t7d7)*exp(j7*z);
Ed(n)=(Ei*t6/t7d7)*exp(j7*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m7(2)*Er^2/(2*940);

```

```
K(n)=SAR;
elseif (n>(d7+d6+d5+d4+d3+d2+1))&(n<=(d8+d7+d6+d5+d4+d3+d2+1))
z=((n-1)-(d7+d6+d5+d4+d3+d2))*0.001;
Ei=Ed(d2+d3+d4+d5+d6+d7);
E(n)=(Ei*t7/t8d8)*exp(j8*-1*z)+(Ei*t7*r8d8/t8d8)*exp(j8*z);
Ed(n)=(Ei*t7/t8d8)*exp(j8*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m8(2)*Er^2/(2*700);
K(n)=SAR;
end
end
y=M*1000;
E=X;
subplot(2,1,1)
plot(y,X)
grid on
xlabel('dimensão em mm')
ylabel('campo elétrico em v/m')
title('Penetração do campo elétrico na perna')
subplot(2,1,2)
plot(y,K)
grid on
xlabel('dimensão em mm')
ylabel('SAR em W/kg')
title('Distribuição da SAR na perna')
```

### 5.2.3 Programa para o cálculo do campo elétrico e da distribuição da SAR no tórax

Este programa permite o cálculo do campo elétrico e da distribuição de SAR no tórax com base no modelo criado. Os dados de entrada para o mesmo são a frequência, campo elétrico incidente no tórax e a espessura das primeiras seis camadas do modelo.

```
%Cálculo do campo elétrico no tórax humano
%E=torax(f,Ei,m)
%A frequência f é dada em MHz, escolhida entre 100, 400, 1000 e 3000
%O campo elétrico incidente E é dado em V/m
%Os valores dos meios m, são suas espessuras, dados em mm para 6 camadas
%sendo: pele, gordura, músculo, osso, coração e pulmão
function E=torax(f,Ei,d2,d3,d4,d5,d6,d7)
u0=4*pi*10^-7;
e0=8.842*10^-12;
f=f*10^6;
n1=377;
n12=377;
t=f/10^6;
d8=d5;
d9=d4;
d10=d3;
d11=d2;
if t==100
m2=[73 1 d2];
m11=m2;
m3=[5 .044 d3];
```

```
m10=m3;
m4=[73 1 d4];
m9=m4;
m5=[7 .027 d5];
m8=m5;
m6=[63 .95 d6];
m7=[35 .35 d7];
elseif t==400
m2=[53 1.15 d2];
m11=m2;
m3=[5.5 .054 d3];
m10=m3;
m4=[53 1.15 d4];
m9=m4;
m5=[6 .04 d5];
m8=m5;
m6=[54 1.08 d6];
m7=[35 .6 d7];
elseif t==1000
m2=[51 1.3 d2];
m11=m2;
m3=[6.4 .11 d3];
m10=m3;
m4=[51 1.3 d4];
m9=m4;
m5=[5.8 .06 d5];
m8=m5;
```

```
m6=[52 1.2 d6];
m7=[35 .73 d7];
elseif t==3000
m2=[47 2.22 d2];
m11=m2;
m3=[5.6 .15 d3];
m10=m3;
m4=[47 2.22 d4];
m9=m4;
m5=[5 .16 d5];
m8=m5;
m6=[48 2 d6];
m7=[35 .8 d7];
end
n2=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m2(2)+i*pi*f*e0*m2(1)));
n11=n2;
n3=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m3(2)+i*pi*f*e0*m3(1)));
n10=n3;
n4=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m4(2)+i*pi*f*e0*m4(1)));
n9=n4;
n5=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m5(2)+i*pi*f*e0*m5(1)));
n8=n5;
n6=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m6(2)+i*pi*f*e0*m6(1)));
n7=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m7(2)+i*pi*f*e0*m7(1)));
j1=i*2*pi*f*u0/n1;
j12=j1;
j2=i*2*pi*f*u0/n2;
```

$$j11=j2;$$

$$j3=i*2*pi*f*u0/n3;$$

$$j10=j3;$$

$$j4=i*2*pi*f*u0/n4;$$

$$j9=j4;$$

$$j5=i*2*pi*f*u0/n5;$$

$$j8=j5;$$

$$j6=i*2*pi*f*u0/n6;$$

$$j7=i*2*pi*f*u0/n7;$$

$$ZL10=n11*(n12+n11*tanh(j11*.001*m11(3)))/(n11+n12*tanh(j11*.001*m11(3)));$$

$$ZL9=n10*(ZL10+n10*tanh(j10*.001*m10(3)))/(n10+ZL10*tanh(j10*.001*m10(3)));$$

$$ZL8=n9*(ZL9+n9*tanh(j9*.001*m9(3)))/(n9+ZL9*tanh(j9*.001*m9(3)));$$

$$ZL7=n8*(ZL8+n8*tanh(j8*.001*m8(3)))/(n8+ZL8*tanh(j8*.001*m8(3)));$$

$$ZL6=n7*(ZL7+n7*tanh(j7*.001*m7(3)))/(n7+ZL7*tanh(j7*.001*m7(3)));$$

$$ZL5=n6*(ZL6+n6*tanh(j6*.001*m6(3)))/(n6+ZL6*tanh(j6*.001*m6(3)));$$

$$ZL4=n5*(ZL5+n5*tanh(j5*.001*m5(3)))/(n5+ZL5*tanh(j5*.001*m5(3)));$$

$$ZL3=n4*(ZL4+n4*tanh(j4*.001*m4(3)))/(n4+ZL4*tanh(j4*.001*m4(3)));$$

$$ZL2=n3*(ZL3+n3*tanh(j3*.001*m3(3)))/(n3+ZL3*tanh(j3*.001*m3(3)));$$

$$ZL1=n2*(ZL2+n2*tanh(j2*.001*m2(3)))/(n2+ZL2*tanh(j2*.001*m2(3)));$$

$$r1=(ZL1-n1)/(ZL1+n1);$$

$$r2=(ZL2-n2)/(ZL2+n2);$$

$$r3=(ZL3-n3)/(ZL3+n3)$$

$$r4=(ZL4-n4)/(ZL4+n4);$$

$$r5=(ZL5-n5)/(ZL5+n5);$$

$$r6=(ZL6-n6)/(ZL6+n6);$$

$$r7=(ZL7-n7)/(ZL7+n7);$$

$$r8=(ZL8-n8)/(ZL7+n8);$$

$$\begin{aligned}r_9 &= (ZL9 - n9) / (ZL9 + n9) \\r_{10} &= (ZL10 - n10) / (ZL10 + n10); \\r_{11} &= (n1 - n11) / (n1 + n11); \\t_1 &= 1 + r_1; \\t_2 &= 1 + r_2; \\t_3 &= 1 + r_3; \\t_4 &= 1 + r_4; \\t_5 &= 1 + r_5; \\t_6 &= 1 + r_6; \\t_7 &= 1 + r_7; \\t_8 &= 1 + r_8; \\t_9 &= 1 + r_9; \\t_{10} &= 1 + r_{10}; \\t_{11} &= 1 + r_{11}; \\r_{2d2} &= r_2 * \exp(j2 * -2 * d2 * .001); \\r_{3d3} &= r_3 * \exp(j3 * -2 * d3 * .001); \\r_{4d4} &= r_4 * \exp(j4 * -2 * d4 * .001); \\r_{5d5} &= r_5 * \exp(j5 * -2 * d5 * .001); \\r_{6d6} &= r_6 * \exp(j6 * -2 * d6 * .001); \\r_{7d7} &= r_7 * \exp(j7 * -2 * d7 * .001); \\r_{8d8} &= r_8 * \exp(j8 * -2 * d8 * .001); \\r_{9d9} &= r_9 * \exp(j9 * -2 * d9 * .001); \\r_{10d10} &= r_{10} * \exp(j_{10} * -2 * d_{10} * .001); \\r_{11d11} &= r_{11} * \exp(j_{11} * -2 * d_{11} * .001); \\t_{2d2} &= 1 + r_{2d2}; \\t_{3d3} &= 1 + r_{3d3}; \\t_{4d4} &= 1 + r_{4d4};\end{aligned}$$

```

t5d5=1+r5d5;
t6d6=1+r6d6;
t7d7=1+r7d7;
t8d8=1+r8d8;
t9d9=1+r9d9;
t10d10=1+r10d10;
t11d11=1+r11d11;
for n=1:(2*d2+2*d3+2*d4+2*d5+d6+d7+1)
z=(n-1)*.001;
M(n)=z;
if n<=d2+1
E(n)=(Ei*t1/t2d2)*exp(j2*-1*z)+(Ei*t1*r2d2/t2d2)*exp(j2*z);
Ed(n)=(Ei*t1/t2d2)*exp(j2*-1*z)
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m2(2)*Er^2/(2*700);
K(n)=SAR;
elseif (n>d2+1)&(n<=(d2+d3+1))
z=((n-1)-d2)*.001;
Ei=Ed(d2);
E(n)=(Ei*t2/t3d3)*exp(j3*-1*z)+(Ei*t2*r3d3/t3d3)*exp(j3*z);
Ed(n)=(Ei*t2/t3d3)*exp(j3*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m3(2)*Er^2/(2*940);
K(n)=SAR;
elseif (n>(d2+d3+1))&(n<=(d4+d3+d2+1))

```

```

z=((n-1)-(d2+d3))*0.001;
Ei=Ed(d2+d3);
E(n)=(Ei*t3/t4d4)*exp(j4*-1*z)+(Ei*t3*r4d4/t4d4)*exp(j4*z);
Ed(n)=(Ei*t3/t4d4)*exp(j4*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m4(2)*Er^2/(2*700);
K(n)=SAR;
elseif (n>(d4+d3+d2+1))&(n<=(d5+d4+d3+d2+1))
z=((n-1)-(d4+d3+d2))*0.001;
Ei=Ed(d2+d3+d4);
E(n)=(Ei*t4/t5d5)*exp(j5*-1*z)+(Ei*t4*r5d5/t5d5)*exp(j5*z);
Ed(n)=(Ei*t4/t5d5)*exp(j5*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m5(2)*Er^2/(2*1790);
K(n)=SAR;
elseif (n>(d5+d4+d3+d2+1))&(n<=(d6+d5+d4+d3+d2+1))
z=((n-1)-(d5+d4+d3+d2))*0.001;
Ei=Ed(d2+d3+d4+d5);
E(n)=(Ei*t5/t6d6)*exp(j6*-1*z)+(Ei*t5*r6d6/t6d6)*exp(j6*z);
Ed(n)=(Ei*t5/t6d6)*exp(j6*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m6(2)*Er^2/(2*1060);
K(n)=SAR;
elseif (n>(d6+d5+d4+d3+d2+1))&(n<=(d7+d6+d5+d4+d3+d2+1))

```

$$z = ((n-1) - (d6+d5+d4+d3+d2)) * .001;$$

$$E_i = E_d(d2+d3+d4+d5+d6);$$

$$E(n) = (E_i * t6 / t7d7) * \exp(j7 * -1 * z) + (E_i * t6 * r7d7 / t7d7) * \exp(j7 * z);$$

$$E_d(n) = (E_i * t6 / t7d7) * \exp(j7 * -1 * z);$$

$$E_r = \text{abs}(E(n));$$

$$X(n) = E_r;$$

$$\text{SAR} = m7(2) * E_r^2 / (2 * 1060);$$

$$K(n) = \text{SAR};$$

$$\text{elseif } (n > (d7+d6+d5+d4+d3+d2+1)) \& (n \leq (d8+d7+d6+d5+d4+d3+d2+1))$$

$$z = ((n-1) - (d7+d6+d5+d4+d3+d2)) * .001;$$

$$E_i = E_d(d2+d3+d4+d5+d6+d7);$$

$$E(n) = (E_i * t7 / t8d8) * \exp(j8 * -1 * z) + (E_i * t7 * r8d8 / t8d8) * \exp(j8 * z);$$

$$E_d(n) = (E_i * t7 / t8d8) * \exp(j8 * -1 * z);$$

$$E_r = \text{abs}(E(n));$$

$$X(n) = E_r;$$

$$\text{SAR} = m8(2) * E_r^2 / (2 * 1790);$$

$$K(n) = \text{SAR};$$

$$\text{elseif } (n > (d8+d7+d6+d5+d4+d3+d2+1)) \& (n \leq (d9+d8+d7+d6+d5+d4+d3+d2+1))$$

$$z = ((n-1) - (d8+d7+d6+d5+d4+d3+d2)) * .001;$$

$$E_i = E_d(d2+d3+d4+d5+d6+d7+d8);$$

$$E(n) = (E_i * t8 / t9d9) * \exp(j9 * -1 * z) + (E_i * t8 * r9d9 / t9d9) * \exp(j9 * z);$$

$$E_d(n) = (E_i * t8 / t9d9) * \exp(j9 * -1 * z);$$

$$E_r = \text{abs}(E(n));$$

$$X(n) = E_r;$$

$$\text{SAR} = m9(2) * E_r^2 / (2 * 700);$$

$$K(n) = \text{SAR};$$

$$\text{elseif } (n > (d9+d8+d7+d6+d5+d4+d3+d2+1)) \& (n \leq (d10+d9+d8+d7+d6+d5+d4+d3+d2+1))$$

```

z=((n-1)-(d9+d8+d7+d6+d5+d4+d3+d2))*0.001;
Ei=Ed(d2+d3+d4+d5+d6+d7+d8+d9);
E(n)=(Ei*t9/t10d10)*exp(j10*-1*z)+(Ei*t9*r10d10/t10d10)*exp(j10*z);
Ed(n)=(Ei*t9/t10d10)*exp(j10*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m10(2)*Er^2/(2*940);
K(n)=SAR;
elseif (n>(d10+d9+d8+d7+d6+d5+d4+d3+d2+1))&(n<=(d11+d10+d9+d8+d7+d6+d5+
z=((n-1)-(d10+d9+d8+d7+d6+d5+d4+d3+d2))*0.001;
Ei=Ed(d2+d3+d4+d5+d6+d7+d8+d9+d10);
E(n)=(Ei*t10/t11d11)*exp(j11*-1*z)+(Ei*t10*r11d11/t11d11)*exp(j11*z);
Ed(n)=(Ei*t10/t11d11)*exp(j11*-1*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m11(2)*Er^2/(2*700);
K(n)=SAR;
end
end
y=M*1000;
E=X;
subplot(2,1,1)
plot(y,X)
grid on
xlabel('dimensão em mm')
ylabel('campo elétrico em v/m')
title('Penetração do campo elétrico no tórax')

```

```
subplot(2,1,2)
plot(y,K)
grid on
xlabel('dimensão em mm')
ylabel('SAR em W/kg')
title('Distribuição da SAR no tórax')
```

#### 5.2.4 Programa para calcular campo, variando-se a dimensão de uma camada

O programa permite calcular o campo elétrico no corpo variando-se em 50% a dimensão de uma dada camada. O programa apresentado é para variação da camada de gordura, e foi desenvolvido para a região do tórax. Para obter-se a variação para qualquer outra camada, basta modificar os dados para a camada escolhida. Os dados de entrada do mesmo são frequência, amplitude máxima do campo incidente e a espessura das seis primeiras camadas da região do tórax.

```
%Calculo da variação do campo elétrico no tórax humano
%E=toraxvar(f, Ei, m)
%A frequência, f, é dada em MHz, escolhida entre 100, 400, 1000 e 3000
%O campo elétrico incidente, E, é dado em V/m
%Os valores dos meios, m, são suas espessuras, dadas em mm para 6 camadas
%sendo: pele,gordura,musculo,osso ,coração,pulmão
function E=toraxvar(f,Ei,d2,d3,d4,d5,d6,d7)
u0=4*pi*10^-7;
e0=8.842*10^-12;
f=f*10^6;
n1=377;
```

```
n12=377;
t=f/10^6;
di=d3-d3/2;
for n=1:d3
d3=(di-1)+n;
M(n)=d3;
d8=d5;
d9=d4;
d10=d3;
d11=d2;
if t==100
m2=[73 1 d2];
m11=m2;
m3=[5 .044 d3];
m10=m3;
m4=[73 1 d4];
m9=m4;
m5=[7 .027 d5];
m8=m5;
m6=[63 .95 d6];
m7=[35 .35 d7];
elseif t==400
m2=[53 1.15 d2];
m11=m2;
m3=[5.5 .054 d3];
m10=m3;
m4=[53 1.15 d4];
```

```
m9=m4;
m5=[6 .04 d5];
m8=m5;
m6=[54 1.08 d6];
m7=[35 .6 d7];
elseif t==1000
m2=[51 1.3 d2];
m11=m2;
m3=[6.4 .11 d3];
m10=m3;
m4=[51 1.3 d4];
m9=m4;
m5=[5.8 .06 d5];
m8=m5;
m6=[52 1.2 d6];
m7=[35 .73 d7];
elseif t==3000
m2=[47 2.22 d2];
m11=m2;
m3=[5.6 .15 d3];
m10=m3;
m4=[47 2.22 d4];
m9=m4;
m5=[5 .16 d5];
m8=m5;
m6=[48 2 d6];
m7=[35 .8 d7];
```

```

end
n2=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m2(2)+i*pi*f*e0*m2(1)));
n11=n2;
n3=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m3(2)+i*pi*f*e0*m3(1)));
n10=n3;
n4=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m4(2)+i*pi*f*e0*m4(1)));
n9=n4;
n5=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m5(2)+i*pi*f*e0*m5(1)));
n8=n5;
n6=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m6(2)+i*pi*f*e0*m6(1)));
n7=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m7(2)+i*pi*f*e0*m7(1)));
j1=i*2*pi*f*u0/n1;
j12=j1;
j2=i*2*pi*f*u0/n2;
j11=j2;
j3=i*2*pi*f*u0/n3;
j10=j3;
j4=i*2*pi*f*u0/n4;
j9=j4;
j5=i*2*pi*f*u0/n5;
j8=j5;
j6=i*2*pi*f*u0/n6;
j7=i*2*pi*f*u0/n7;
ZL10=n11*(n12+n11*tanh(j11*.001*m11(3)))/(n11+n12*tanh(j11*.001*m11(3)));
ZL9=n10*(ZL10+n10*tanh(j10*.001*m10(3)))/(n10+ZL10*tanh(j10*.001*m10(3)));
ZL8=n9*(ZL9+n9*tanh(j9*.001*m9(3)))/(n9+ZL9*tanh(j9*.001*m9(3)));
ZL7=n8*(ZL8+n8*tanh(j8*.001*m8(3)))/(n8+ZL8*tanh(j8*.001*m8(3)));

```

$$\begin{aligned}
ZL6 &= n7 * (ZL7 + n7 * \tanh(j7 * .001 * m7(3))) / (n7 + ZL7 * \tanh(j7 * .001 * m7(3))); \\
ZL5 &= n6 * (ZL6 + n6 * \tanh(j6 * .001 * m6(3))) / (n6 + ZL6 * \tanh(j6 * .001 * m6(3))); \\
ZL4 &= n5 * (ZL5 + n5 * \tanh(j5 * .001 * m5(3))) / (n5 + ZL5 * \tanh(j5 * .001 * m5(3))); \\
ZL3 &= n4 * (ZL4 + n4 * \tanh(j4 * .001 * m4(3))) / (n4 + ZL4 * \tanh(j4 * .001 * m4(3))); \\
ZL2 &= n3 * (ZL3 + n3 * \tanh(j3 * .001 * m3(3))) / (n3 + ZL3 * \tanh(j3 * .001 * m3(3))); \\
ZL1 &= n2 * (ZL2 + n2 * \tanh(j2 * .001 * m2(3))) / (n2 + ZL2 * \tanh(j2 * .001 * m2(3))); \\
r1 &= (ZL1 - n1) / (ZL1 + n1); \\
r2 &= (ZL2 - n2) / (ZL2 + n2); \\
r3 &= (ZL3 - n3) / (ZL3 + n3); \\
r4 &= (ZL4 - n4) / (ZL4 + n4); \\
r5 &= (ZL5 - n5) / (ZL5 + n5); \\
r6 &= (ZL6 - n6) / (ZL6 + n6); \\
r7 &= (ZL7 - n7) / (ZL7 + n7); \\
r8 &= (ZL8 - n8) / (ZL7 + n8); \\
r9 &= (ZL9 - n9) / (ZL9 + n9); \\
r10 &= (ZL10 - n10) / (ZL10 + n10); \\
r11 &= (n1 - n11) / (n1 + n11); \\
t1 &= 1 + r1; \\
t2 &= 1 + r2; \\
t3 &= 1 + r3; \\
t4 &= 1 + r4; \\
t5 &= 1 + r5; \\
t6 &= 1 + r6; \\
t7 &= 1 + r7; \\
t8 &= 1 + r8; \\
t9 &= 1 + r9; \\
t10 &= 1 + r10;
\end{aligned}$$

```
t11=1+r11;
r2d2=r2*exp(j2*-2*d2*.001);
r3d3=r3*exp(j3*-2*d3*.001);
r4d4=r4*exp(j4*-2*d4*.001);
r5d5=r5*exp(j5*-2*d5*.001);
r6d6=r6*exp(j6*-2*d6*.001);
r7d7=r7*exp(j7*-2*d7*.001);
r8d8=r8*exp(j8*-2*d8*.001);
r9d9=r9*exp(j9*-2*d9*.001);
r10d10=r10*exp(j10*-2*d10*.001);
r11d11=r11*exp(j11*-2*d11*.001);
t2d2=1+r2d2;
t3d3=1+r3d3;
t4d4=1+r4d4;
t5d5=1+r5d5;
t6d6=1+r6d6;
t7d7=1+r7d7;
t8d8=1+r8d8;
t9d9=1+r9d9;
t10d10=1+r10d10;
t11d11=1+r11d11;
z=0;
E(n)=(Ei*t1/t2d2)*exp(j2*-1*z)+(Ei*t1*r2d2/t2d2)*exp(j2*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
E=X;
end
```

```
plot(M,X)
grid on
xlabel('dimensão da camada de gordura em mm')
ylabel('campo elétrico em v/m')
title('Variação do campo elétrico no tórax com a gordura ')
```

### 5.3 Resultados obtidos

Os gráficos a seguir mostram os valores obtidos para cada parte do modelo adotado, onde pode ser comprovado que a região do tórax apresenta os valores mais elevados para campo elétrico e SAR induzidos no corpo.

#### 5.3.1 Gráficos para o tórax

As Figuras 5.2, 5.3, 5.4, e 5.5, mostram os valores obtidos. Pode-se notar que os valores máximos induzidos de campo e SAR aparecem na frequência de 1GHz. No tórax a absorção de energia pelo corpo basicamente ocorre na pele e no músculo esquelético, por isto é que a SAR é pequena a partir de 42mm em todos os gráficos.

#### 5.3.2 Gráficos para a perna

As Figuras 5.6, 5.7, 5.8 e 5.9, apresentam os valores encontrados. Pode-se notar que os valores máximos induzidos de campo e SAR aparecem na frequência de 400MHz. Deve-se observar que os valores encontrados são menores do que os obtidos para a região do tórax. Igualmente ao que aconteceu no tórax, na perna a absorção de energia ocorre na pele e no músculo esquelético sendo por isso que a SAR é pequena a partir de 42mm.

Figura 5.2: Campo e SAR no tórax em 100MHz

### 5.3.3 Gráficos para a cabeça

As Figuras 5.10, 5.11, 5.12 e 5.13, mostram os valores encontrados. Note-se que os valores máximos de indução de campo e SAR, aparecem também na frequência de 1GHz, porém continuam inferiores aos que aparecem na região do tórax em 1GHz. Na cabeça ainda considerável energia atinge o tecido cerebral o que ocorre para distância de 15mm.

### 5.3.4 Gráficos para variação da espessura de uma camada

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18 e 5.19 mostram os valores de campo obtidos, dentro do corpo na fronteira com o ar, para a frequência de 1GHz, para a região do tórax, variando-se a dimensão de uma camada em 50%, em

Figura 5.3: Campo e SAR no tórax em 400MHz

Figura 5.4: Campo e SAR no tórax em 1GHz

Figura 5.5: Campo e SAR no tórax em 3GHz

Figura 5.6: Campo e SAR na perna em 100MHz

Figura 5.7: Campo e SAR na perna em 400MHz

Figura 5.8: Campo e SAR na perna em 1GHz

Figura 5.9: Campo e SAR na perna em 3GHz

Figura 5.10: Campo e SAR na cabeça em 100MHz

Figura 5.11: Campo e SAR na cabeça em 400MHz

Figura 5.12: Campo e SAR na cabeça em 1GHz

Figura 5.13: Campo e SAR na cabeça em 3GHz

relação a seu valor padrão, mantendo-se inalterados os valores das outras camadas

Como pode-se verificar os gráficos mostram que uma pele espessa oferece maior proteção, e que a medida que penetramos no corpo o campo praticamente não se altera com a espessura da camada. As camadas que mais influenciam os valores de campo elétrico são a pele, a gordura e o músculo esquelético. Os campos maiores foram observados na região do tórax.

## 5.4 Variação do modelo padrão de pessoa

Os gráficos apresentados nas Figuras 5.20 e 5.21 mostram os valores de campo e SAR, na região do tórax e na frequência de 1GHz, para uma pessoa gorda e para uma criança. A pessoa gorda foi considerada com as seguintes dimensões para as

Figura 5.14: Variação do campo com a pele em 1GHz

Figura 5.15: Variação do campo com a gordura em 1GHz

Figura 5.16: Variação do campo com o músculo em 1GHz

Figura 5.17: Variação do campo com o osso em 1GHz

Figura 5.18: Variação do campo com o coração em 1GHz

Figura 5.19: Variação do campo com o pulmão em 1GHz

camadas: 2,40,30,15,70,90mm, totalizando 334mm. A criança foi considerada com as seguintes dimensões para as camadas: 1,10,10,10,50,70mm, totalizando 192mm. Os valores apresentados referem-se as dimensões das camadas da pele, gordura, músculo, osso, coração e pulmão respectivamente.

#### 5.4.1 Campo e SAR no tórax para uma pessoa gorda

O gráfico da Figura 5.20, apresenta os valores encontrados. Pode-se notar a diminuição da campo elétrico e da SAR induzidos, quando se compara este gráfico com o gráfico da Figura 5.4 para uma pessoa padrão.

Figura 5.20: Campo e SAR para uma pessoa gorda

#### 5.4.2 Campo e SAR no tórax em uma criança

O gráfico da Figura 5.21, mostra os valores obtidos.

Como pode-se observar uma pessoa gorda é bem mais protegida contra a radiação

Figura 5.21: Campo e SAR para uma criança

que uma criança. O campo elétrico e a SAR dentro do corpo é bem maior na criança. Vê-se pela análise dos gráficos das Figuras 5.20 e 5.21 que o campo elétrico que atinge o coração de uma pessoa gorda está na faixa de  $.7V/m$ , enquanto que  $2V/m$  atingem o coração de uma criança, um acréscimo de quase 300%!

## 5.5 Variação para o modelo de uma camada

### 5.5.1 Programa para calcular campo e SAR com uma só camada

O programa a seguir permite o cálculo do campo elétrico e da SAR, considerando-se o corpo humano, na região do torax, composto de uma única camada de dimensão idêntica a do corpo de 10 camadas.

Os gráficos das Figuras 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25 mostram os valores de

campo elétrico e de SAR, considerando-se o corpo humano constituído de uma única camada de espessura total de 274mm, idêntica ao modelo utilizado de 10 camadas para o tórax. Este modelo é apresentado por alguns autores [3] para se comparar a penetração do campo no corpo em função da frequência. São apresentados gráficos supondo-se que o corpo todo possa ser expresso pela camada de músculo com densidade de 1060kg/m<sup>3</sup>[2]

```
%Calculo do campo no tórax modelo 1 camada
function E=torax1cam(f,Ei,d)
u0=4*pi*10^-7;
e0=8.842*10^-12;
f=f*10^6;
n1=377;
n3=377;
t=f/10^6;
if t==100
m=[73 1 d];
elseif t==400
m=[53 1.15 d];
elseif t==1000
m=[51 1.3 d];
elseif t==3000
m=[47 2.22 d];
end
n2=sqrt(i*2*pi*f*u0/(m(2)+i*pi*f*e0*m(1)));
j1=i*2*pi*f*u0/n1;
j3=j1;
j2=i*2*pi*f*u0/n2;
```

```
ZL1=n2*(n3+n2*tanh(j2*.001*m(3)))/(n2+n3*tanh(j2*.001*m(3)));
t1=2*ZL1/(ZL1+n1);
r2=(n3-n2)/(n3+n2);
t2=1+r2;
r2d2=r2*exp(j2*-2*d);
t2d2=1+r2d2;
for n=1:d
z=(n-1)*.001;
M(n)=z;
E(n)=(Ei*t1/t2d2)*exp(j2*-1*z)+(Ei*t1*r2d2/t2d2)*exp(j2*z);
Er=abs(E(n));
X(n)=Er;
SAR=m(2)*Er^2/2120;
K(n)=SAR;
end
y=M*1000;
E=X;
subplot(2,1,1)
plot(y,X)
grid on
xlabel('dimensão em mm')
ylabel('campo elétrico em V/m')
title('Penetração do campo elétrico no corpo')
subplot(2,1,2)
plot(y,K)
grid on
xlabel('dimensão em mm')
```

```
ylabel('SAR em W/kg')  
title('Penetração da SAR no corpo')
```

### 5.5.2 Campo e SAR em 100MHz

Os valores obtidos, utilizando-se o modelo de camada única, são apresentados no gráfico da Figura 5.22.

Figura 5.22: Campo e SAR em 100MHz

### 5.5.3 Campo e SAR em 400MHz

O gráfico da Figura 5.23, mostra os valores encontrados.

### 5.5.4 Campo e SAR em 1GHz

Os valores encontrados constam da Figura 5.24.

Figura 5.23: Campo e SAR em 400MHz

Figura 5.24: Campo e SAR em 1GHz

Figura 5.25: Campo e SAR em 3GHz

### 5.5.5 Campo e SAR em 3GHz

O gráfico da Figura 5.25 apresenta os valores obtidos.

Como pode-se verificar o modelo de uma camada minimiza a influência da radiação no corpo humano, o que pode ser comprovado comparando-se os gráficos das Figuras 5.22, 5.23, 5.24 e 5.25, com os das Figuras 5.2, 5.3, 5.4 e 5.5 respectivamente.

## 5.6 Medidas Realizadas

Com o intuito de avaliar o grau de radiação existente em Salvador, foram efetuadas medidas de radiação na faixa de 100KHz a 3GHz, usando-se o instrumento EMR-300 fabricado pela firma Wandel e Goltermann. Os valores foram lidos a cada 8 segundos, e a cada 32 segundos sendo registrada a média dos sinais lidos. Foram feitos registros de 6 minutos por cada local medido, sendo o valor médio e o máximo

de cada medição anotados. Os pontos escolhidos para leitura foram pontos próximos a estações de televisão e rádios FM, bem como pontos próximos a estações rádio base de telefonia celular. Os valores encontrados bem como os croquis de localização dos pontos de medidas são apresentados a seguir. Os valores apresentados indicam: o número da medida, o valor encontrado, o tipo de medida realizada (no caso valor medio-AV), a hora em que a medida foi realizada e finalmente a data da mesma.

### 5.6.1 Edifício Jardim da Colina

Valor Unidade Resultado Horário Data

1	6,31	V/m	AV	17:28:06	03/01/01
2	6,35	V/m	AV	17:28:14	03/01/01
3	6,38	V/m	AV	17:28:22	03/01/01
4	6,34	V/m	AV	17:28:30	03/01/01
5	6,27	V/m	AV	17:28:38	03/01/01
6	6,24	V/m	AV	17:28:46	03/01/01
7	6,23	V/m	AV	17:28:54	03/01/01
8	6,25	V/m	AV	17:29:02	03/01/01
9	6,3	V/m	AV	17:29:10	03/01/01
10	6,36	V/m	AV	17:29:18	03/01/01
11	6,38	V/m	AV	17:29:26	03/01/01
12	6,38	V/m	AV	17:29:34	03/01/01
13	6,34	V/m	AV	17:29:42	03/01/01
14	6,32	V/m	AV	17:29:50	03/01/01
15	6,3	V/m	AV	17:29:58	03/01/01
16	6,25	V/m	AV	17:30:06	03/01/01
17	6,23	V/m	AV	17:30:14	03/01/01
18	6,2	V/m	AV	17:30:22	03/01/01

---

19 6,16 V/m AV 17:30:30 03/01/01  
20 6,16 V/m AV 17:30:38 03/01/01  
21 6,16 V/m AV 17:30:46 03/01/01  
22 6,14 V/m AV 17:30:54 03/01/01  
23 6,13 V/m AV 17:31:02 03/01/01  
24 6,12 V/m AV 17:31:10 03/01/01  
25 6,15 V/m AV 17:31:18 03/01/01  
26 6,17 V/m AV 17:31:26 03/01/01  
27 6,2 V/m AV 17:31:34 03/01/01  
28 6,2 V/m AV 17:31:42 03/01/01  
28 6,2 V/m AV 17:31:42 03/01/01  
29 6,16 V/m AV 17:31:50 03/01/01  
30 6,04 V/m AV 17:31:58 03/01/01  
31 6,01 V/m AV 17:32:06 03/01/01  
32 6,02 V/m AV 17:32:14 03/01/01  
33 6,06 V/m AV 17:32:22 03/01/01  
34 6,16 V/m AV 17:32:30 03/01/01  
35 6,19 V/m AV 17:32:38 03/01/01  
36 6,2 V/m AV 17:32:46 03/01/01  
37 6,15 V/m AV 17:32:54 03/01/01  
38 6,15 V/m AV 17:33:02 03/01/01  
39 6,14 V/m AV 17:33:10 03/01/01  
40 6,17 V/m AV 17:33:18 03/01/01  
41 6,25 V/m AV 17:33:26 03/01/01  
42 6,3 V/m AV 17:33:34 03/01/01  
43 6,31 V/m AV 17:33:42 03/01/01  
44 6,25 V/m AV 17:33:50 03/01/01

45 6,18 V/m AV 17:33:58 03/01/01

46 6,17 V/m AV 17:34:06 03/01/01

47 6,23 V/m AV 17:34:14 03/01/01

48 6,34 V/m AV 17:34:22 03/01/01

49 6,46 V/m AV 17:34:30 03/01/01

50 6,55 V/m AV 17:34:38 03/01/01

51 6,67 V/m AV 17:34:46 03/01/01

52 6,73 V/m AV 17:34:54 03/01/01

Valor Médio 6,25 V/m

Valor Máximo 6,73 V/m

O local da medida consta do croquis da Figura 5.26

Figura 5.26: Jardim da Colina

### 5.6.2 Edifício Pedra do Bosque

Valor Unidade Resultado Horário Data

1	9,31	V/m	AV	17:39:05	11/01/01
2	9,24	V/m	AV	17:39:13	11/01/01
3	9,24	V/m	AV	17:39:21	11/01/01
4	9,16	V/m	AV	17:39:29	11/01/01
5	9,1	V/m	AV	17:39:37	11/01/01
6	8,99	V/m	AV	17:39:45	11/01/01
7	8,94	V/m	AV	17:39:53	11/01/01
8	8,96	V/m	AV	17:40:01	11/01/01
9	9,01	V/m	AV	17:40:09	11/01/01
10	9,07	V/m	AV	17:40:17	11/01/01
11	9,04	V/m	AV	17:40:25	11/01/01
12	8,95	V/m	AV	17:40:33	11/01/01
13	8,87	V/m	AV	17:40:41	11/01/01
14	8,82	V/m	AV	17:40:49	11/01/01
15	8,81	V/m	AV	17:40:57	11/01/01
16	8,85	V/m	AV	17:41:05	11/01/01
17	8,9	V/m	AV	17:41:13	11/01/01
18	8,92	V/m	AV	17:41:21	11/01/01
19	8,92	V/m	AV	17:41:29	11/01/01
20	8,95	V/m	AV	17:41:37	11/01/01
21	8,94	V/m	AV	17:41:45	11/01/01
22	8,95	V/m	AV	17:41:53	11/01/01
23	8,98	V/m	AV	17:42:01	11/01/01
24	8,98	V/m	AV	17:42:09	11/01/01
25	8,97	V/m	AV	17:42:17	11/01/01

---

26 8,94 V/m AV 17:42:25 11/01/01  
27 8,88 V/m AV 17:42:33 11/01/01  
28 8,78 V/m AV 17:42:41 11/01/01  
29 8,71 V/m AV 17:42:49 11/01/01  
30 8,68 V/m AV 17:42:57 11/01/01  
31 8,65 V/m AV 17:43:05 11/01/01  
32 8,62 V/m AV 17:43:13 11/01/01  
33 8,6 V/m AV 17:43:21 11/01/01  
34 8,56 V/m AV 17:43:29 11/01/01  
35 8,59 V/m AV 17:43:37 11/01/01  
36 8,65 V/m AV 17:43:45 11/01/01  
37 8,73 V/m AV 17:43:53 11/01/01  
38 8,77 V/m AV 17:44:01 11/01/01  
39 8,74 V/m AV 17:44:09 11/01/01  
40 8,64 V/m AV 17:44:17 11/01/01  
41 8,46 V/m AV 17:44:25 11/01/01  
42 8,33 V/m AV 17:44:33 11/01/01  
43 8,22 V/m AV 17:44:41 11/01/01  
44 8,19 V/m AV 17:44:49 11/01/01  
45 8,18 V/m AV 17:44:57 11/01/01  
46 8,18 V/m AV 17:45:05 11/01/01  
47 8,17 V/m AV 17:45:13 11/01/01  
48 8,18 V/m AV 17:45:21 11/01/01  
49 8,23 V/m AV 17:45:29 11/01/01  
50 8,42 V/m AV 17:45:37 11/01/01  
51 8,6 V/m AV 17:45:45 11/01/01  
Valor Médio 8,76 V/m

Valor Máximo 9,31 V/m

O croquis da Figura 5.27 mostra a localização do ponto de medida

Figura 5.27: Pedra do Bosque

### 5.6.3 Escola Politécnica - UFBA

Na Escola Politécnica foram lidos dois pontos, sendo o ponto 1, próximo a ERB de celular, e o ponto 4, aquele onde o sinal dominante já é o sinal da estação de televisão.

- Ponto 1

Valor Unidade Resultado Horário Data

1 45,41 V/m AV 16:20:29 10/01/01

2 47,85 V/m AV 16:20:37 10/01/01

3 44,06 V/m AV 16:20:45 10/01/01

4 40,3 V/m AV 16:20:53 10/01/01

---

5 40,3 V/m AV 16:21:01 10/01/01  
6 38,7 V/m AV 16:21:09 10/01/01  
7 44,86 V/m AV 16:21:17 10/01/01  
8 46,22 V/m AV 16:21:25 10/01/01  
9 46,79 V/m AV 16:21:33 10/01/01  
10 46,11 V/m AV 16:21:41 10/01/01  
11 46,32 V/m AV 16:21:49 10/01/01  
12 47,29 V/m AV 16:21:57 10/01/01  
13 48,38 V/m AV 16:22:05 10/01/01  
14 50,4 V/m AV 16:22:13 10/01/01  
15 53,23 V/m AV 16:22:21 10/01/01  
16 52,78 V/m AV 16:22:29 10/01/01  
17 50,67 V/m AV 16:22:37 10/01/01  
18 46,51 V/m AV 16:22:45 10/01/01  
19 40,14 V/m AV 16:22:53 10/01/01  
20 37,82 V/m AV 16:23:01 10/01/01  
21 36,13 V/m AV 16:23:09 10/01/01  
22 30,43 V/m AV 16:23:17 10/01/01  
23 32,45 V/m AV 16:23:25 10/01/01  
24 33,84 V/m AV 16:23:33 10/01/01  
25 31,6 V/m AV 16:23:41 10/01/01  
26 28,52 V/m AV 16:23:49 10/01/01  
27 28,21 V/m AV 16:23:57 10/01/01  
28 30,68 V/m AV 16:24:05 10/01/01  
29 32,63 V/m AV 16:24:13 10/01/01  
30 34,57 V/m AV 16:24:21 10/01/01  
31 35,51 V/m AV 16:24:29 10/01/01

32 34,79 V/m AV 16:24:37 10/01/01  
33 33,24 V/m AV 16:24:45 10/01/01  
34 31,49 V/m AV 16:24:53 10/01/01  
35 30,01 V/m AV 16:25:01 10/01/01  
36 29,34 V/m AV 16:25:09 10/01/01  
37 31,01 V/m AV 16:25:17 10/01/01  
38 30,88 V/m AV 16:25:25 10/01/01  
39 29,41 V/m AV 16:25:33 10/01/01  
40 27,32 V/m AV 16:25:41 10/01/01  
41 26,7 V/m AV 16:25:49 10/01/01  
42 26,89 V/m AV 16:25:57 10/01/01  
43 27,41 V/m AV 16:26:05 10/01/01  
44 28,8 V/m AV 16:26:13 10/01/01  
45 29,49 V/m AV 16:26:21 10/01/01  
46 30,31 V/m AV 16:26:29 10/01/01  
47 31,01 V/m AV 16:26:37 10/01/01  
48 30,03 V/m AV 16:26:45 10/01/01  
49 29,4 V/m AV 16:26:53 10/01/01  
50 29,21 V/m AV 16:27:01 10/01/01  
51 29,77 V/m AV 16:27:09 10/01/01  
52 30,91 V/m AV 16:27:17 10/01/01  
53 30,2 V/m AV 16:27:25 10/01/01

Valor Médio 36,35 V/m

Valor Máximo 53,23 V/m

- Ponto 4

Valor Unidade Resultado Horário Data

---

1 4,3 V/m AV 17:01:57 10/01/01  
2 4,29 V/m AV 17:02:05 10/01/01  
3 4,26 V/m AV 17:02:13 10/01/01  
4 4,18 V/m AV 17:02:21 10/01/01  
5 4,19 V/m AV 17:02:29 10/01/01  
6 4,13 V/m AV 17:02:37 10/01/01  
7 4,17 V/m AV 17:02:45 10/01/01  
8 4,21 V/m AV 17:02:53 10/01/01  
9 4,27 V/m AV 17:03:01 10/01/01  
10 4,33 V/m AV 17:03:09 10/01/01  
11 4,29 V/m AV 17:03:17 10/01/01  
12 4,22 V/m AV 17:03:25 10/01/01  
13 4,13 V/m AV 17:03:33 10/01/01  
14 4,03 V/m AV 17:03:41 10/01/01  
15 3,98 V/m AV 17:03:49 10/01/01  
16 3,99 V/m AV 17:03:57 10/01/01  
17 4,01 V/m AV 17:04:05 10/01/01  
18 4,02 V/m AV 17:04:13 10/01/01  
19 4,04 V/m AV 17:04:21 10/01/01  
20 4,05 V/m AV 17:04:29 10/01/01  
21 4,06 V/m AV 17:04:37 10/01/01  
22 4,07 V/m AV 17:04:45 10/01/01  
23 4,07 V/m AV 17:04:53 10/01/01  
24 4,09 V/m AV 17:05:01 10/01/01  
25 4,11 V/m AV 17:05:09 10/01/01  
26 4,12 V/m AV 17:05:17 10/01/01  
27 4,13 V/m AV 17:05:25 10/01/01

---

28 4,09 V/m AV 17:05:33 10/01/01  
29 4,05 V/m AV 17:05:41 10/01/01  
30 4,01 V/m AV 17:05:49 10/01/01  
31 4,01 V/m AV 17:05:57 10/01/01  
32 4,01 V/m AV 17:06:05 10/01/01  
33 4,03 V/m AV 17:06:13 10/01/01  
34 4,06 V/m AV 17:06:21 10/01/01  
35 4,05 V/m AV 17:06:29 10/01/01  
36 4,05 V/m AV 17:06:37 10/01/01  
37 4,03 V/m AV 17:06:45 10/01/01  
38 4,03 V/m AV 17:06:53 10/01/01  
39 4,07 V/m AV 17:07:01 10/01/01  
40 4,13 V/m AV 17:07:09 10/01/01  
41 4,19 V/m AV 17:07:17 10/01/01  
42 4,24 V/m AV 17:07:25 10/01/01  
43 4,28 V/m AV 17:07:33 10/01/01  
44 4,33 V/m AV 17:07:41 10/01/01  
45 4,38 V/m AV 17:07:49 10/01/01  
46 4,4 V/m AV 17:07:57 10/01/01  
47 4,41 V/m AV 17:08:05 10/01/01  
48 4,36 V/m AV 17:08:13 10/01/01  
49 4,29 V/m AV 17:08:21 10/01/01  
50 4,23 V/m AV 17:08:29 10/01/01  
51 4,17 V/m AV 17:08:37 10/01/01  
52 4,17 V/m AV 17:08:45 10/01/01  
Valor Médio 4,15 V/m  
Valor Máximo 4,41 V/m

O croquis de localização dos pontos de medida é o da Figura 5.28

Figura 5.28: Escola Politécnica

#### 5.6.4 Clube Português

Valor Unidade Resultado Horário Data

1	6,04 V/m	AV	12:31:23	29-11-00
2	6,32 V/m	AV	12:31:31	29-11-00
3	6,35 V/m	AV	12:31:39	29-11-00
4	6,05 V/m	AV	12:31:47	29-11-00
5	5,40 V/m	AV	12:31:55	29-11-00
6	5,08 V/m	AV	12:32:03	29-11-00
7	5,11 V/m	AV	12:32:11	29-11-00
8	5,28 V/m	AV	12:32:19	29-11-00
9	5,47 V/m	AV	12:32:27	29-11-00

---

10 5,66 V/m AV 12:32:35 29-11-00  
11 5,88 V/m AV 12:32:43 29-11-00  
12 5,94 V/m AV 12:32:51 29-11-00  
13 5,92 V/m AV 12:32:59 29-11-00  
14 5,88 V/m AV 12:33:07 29-11-00  
15 5,78 V/m AV 12:33:15 29-11-00  
16 5,55 V/m AV 12:33:23 29-11-00  
17 5,38 V/m AV 12:33:31 29-11-00  
18 5,33 V/m AV 12:33:39 29-11-00  
19 5,38 V/m AV 12:33:47 29-11-00  
20 5,64 V/m AV 12:33:55 29-11-00  
21 5,85 V/m AV 12:34:03 29-11-00  
22 6,10 V/m AV 12:34:11 29-11-00  
23 6,30 V/m AV 12:34:19 29-11-00  
24 6,27 V/m AV 12:34:27 29-11-00  
25 6,40 V/m AV 12:34:35 29-11-00  
26 6,60 V/m AV 12:34:43 29-11-00  
27 6,32 V/m AV 12:34:51 29-11-00  
28 6,31 V/m AV 12:34:59 29-11-00  
29 5,99 V/m AV 12:35:07 29-11-00  
30 5,52 V/m AV 12:35:15 29-11-00  
31 5,60 V/m AV 12:35:23 29-11-00  
32 5,67 V/m AV 12:35:31 29-11-00  
33 6,11 V/m AV 12:35:39 29-11-00  
34 6,52 V/m AV 12:35:47 29-11-00  
35 6,54 V/m AV 12:35:55 29-11-00  
36 6,42 V/m AV 12:36:03 29-11-00

37 6,09 V/m AV 12:36:11 29-11-00  
38 5,42 V/m AV 12:36:19 29-11-00  
39 5,31 V/m AV 12:36:27 29-11-00  
40 5,31 V/m AV 12:36:35 29-11-00  
41 5,54 V/m AV 12:36:43 29-11-00  
42 6,06 V/m AV 12:36:51 29-11-00  
43 6,44 V/m AV 12:36:59 29-11-00  
44 6,72 V/m AV 12:37:07 29-11-00  
45 6,66 V/m AV 12:37:15 29-11-00  
46 6,59 V/m AV 12:37:23 29-11-00  
47 6,32 V/m AV 12:37:31 29-11-00  
48 6,01 V/m AV 12:37:39 29-11-00  
49 5,95 V/m AV 12:37:47 29-11-00  
50 5,79 V/m AV 12:37:55 29-11-00  
51 5,65 V/m AV 12:38:03 29-11-00

Valor Médio 5,92 V/m

Valor Máximo 6,72 V/m

O croquis do ponto de medida consta da Figura 5.29

### 5.6.5 Direita da Piedade

Valor Unidade Resultado Horário Data

1 19,59 V/m AV 11:22:51 07/02/01  
2 20,60 V/m AV 11:22:59 07/02/01  
3 19,99 V/m AV 11:23:07 07/02/01  
4 19,90 V/m AV 11:23:15 07/02/01  
5 20,54 V/m AV 11:23:23 07/02/01  
6 21,62 V/m AV 11:23:31 07/02/01

Figura 5.29: Clube Português

7 23,99 V/m AV 11:23:39 07/02/01  
8 26,36 V/m AV 11:23:47 07/02/01  
9 27,84 V/m AV 11:23:55 07/02/01  
10 28,83 V/m AV 11:24:03 07/02/01  
11 27,77 V/m AV 11:24:11 07/02/01  
12 26,77 V/m AV 11:24:19 07/02/01  
13 27,83 V/m AV 11:24:27 07/02/01  
14 27,86 V/m AV 11:24:35 07/02/01  
15 28,22 V/m AV 11:24:43 07/02/01  
16 28,21 V/m AV 11:24:51 07/02/01  
17 26,92 V/m AV 11:24:59 07/02/01  
18 27,12 V/m AV 11:25:07 07/02/01  
19 27,38 V/m AV 11:25:15 07/02/01

---

20 27,55 V/m AV 11:25:23 07/02/01  
21 27,46 V/m AV 11:25:31 07/02/01  
22 26,83 V/m AV 11:25:39 07/02/01  
23 26,41 V/m AV 11:25:47 07/02/01  
24 25,98 V/m AV 11:25:55 07/02/01  
25 24,75 V/m AV 11:26:03 07/02/01  
26 23,87 V/m AV 11:26:11 07/02/01  
27 23,34 V/m AV 11:26:19 07/02/01  
28 23,69 V/m AV 11:26:27 07/02/01  
29 24,97 V/m AV 11:26:35 07/02/01  
30 26,40 V/m AV 11:26:43 07/02/01  
31 27,40 V/m AV 11:26:51 07/02/01  
32 27,52 V/m AV 11:26:59 07/02/01  
33 27,24 V/m AV 11:27:07 07/02/01  
34 26,67 V/m AV 11:27:15 07/02/01  
35 25,72 V/m AV 11:27:23 07/02/01  
36 24,52 V/m AV 11:27:31 07/02/01  
37 23,97 V/m AV 11:27:39 07/02/01  
38 23,80 V/m AV 11:27:47 07/02/01  
39 23,92 V/m AV 11:27:55 07/02/01  
40 23,93 V/m AV 11:28:03 07/02/01  
41 24,47 V/m AV 11:28:11 07/02/01  
42 24,83 V/m AV 11:28:19 07/02/01  
43 25,18 V/m AV 11:28:27 07/02/01  
44 25,57 V/m AV 11:28:35 07/02/01  
45 25,31 V/m AV 11:28:43 07/02/01  
46 24,76 V/m AV 11:28:51 07/02/01

47 23,02 V/m AV 11:28:59 07/02/01

48 21,80 V/m AV 11:29:07 07/02/01

49 20,45 V/m AV 11:29:15 07/02/01

50 19,91 V/m AV 11:29:23 07/02/01

51 20,96 V/m AV 11:29:31 07/02/01

Valor Médio 24,89 V/m

Valor Máximo 28,83 V/m

O croquis de localização do ponto de medida é mostrado na Figura 5.30

Figura 5.30: Direita da Piedade

Os valores apresentados comprovam situações reais de locais frequentados por pessoas que recebem radiações do tipo descrito nesta dissertação.

# Capítulo 6

## Conclusão

Neste capítulo serão apresentados os comentários sobre os resultados obtidos através dos programas e das medidas realizadas no Capítulo 5, e com base nos quais conclui-se pela proposição de um contorno de proteção a vida.

### 6.1 Análise dos Dados

Da análise dos gráficos apresentados no Capítulo 5, pode-se verificar que a incidência de uma onda plana de  $10\text{V/m}$ , no modelo proposto, definiu valores máximos de SAR induzidos no corpo, conforme Tabela 6.1. Verificou-se também que a frequência de  $1\text{GHz}$  é a que mais penetra na cabeça e no tórax, induzindo nesta parte do corpo o maior valor de SAR encontrado. A frequência de  $400\text{MHz}$  penetra mais na perna, porém o valor máximo de SAR encontrado continua sendo no tórax para a frequência de  $1\text{GHz}$ . Provou-se que uma pessoa gorda é mais protegida contra a radiação, e verificou-se que as camadas que mais influenciam nesta proteção são as da pele, gordura e músculo. O modelo de mais camadas apresentou valores mais severos para o campo induzido do que o modelo de uma só camada.

Frequência(MHz)	SAR(W/kg)
100	.0125
400	.026
1000	.042
3000	.035

Tabela 6.1: Valor de SAR máxima induzida por um campo de 10V/m

Considerando-se o limite de  $.08\text{W/kg}$ , apresentado no Capítulo 4, expresso pela norma do ICNIRP e recomendado pela ANATEL, pode-se apresentar a Tabela 6.2, que mostra o valor máximo da onda plana incidente no modelo, para que este valor não seja ultrapassado.

Frequência(MHz)	Campo(V/m)
100	25.3
400	17.5
1000	13.8
3000	15.1

Tabela 6.2: Campo minimo incidente para se induzir no corpo  $.08\text{W/kg}$ 

Os efeitos não térmicos listados no Capítulo 4, apontam para valores de campo máximo suportavel pelo homem, sem aparecerem sintomas de desconforto entre 9 e 21V/m (valores eficazes). Por outro lado as diversas experiências realizadas indicaram alterações no organismo humano, tais como alterações no efluxo de calcio, para valores de SAR induzido menores que  $.05\text{W/kg}$ . Tomando-se como parâmetro este último dado, pode-se calcular os seguintes valores, de campo incidente para que o valor de SAR não seja ultrapassado. Os resultados encontrados estão apresentados na Tabela 6.3.

Em vista do apresentado pode-se verificar que, uma onda plana na frequência de 1000MHz com 13.8V/m( campo máximo) induz no corpo uma SAR de  $.08\text{W/kg}$ ,

Frequência(MHz)	Campo(V/m)
100	39
400	18.9
1000	10.9
3000	11.5

Tabela 6.3: Campo mínimo incidente para produzir SAR induzida de .05W/kg bastando um campo de 10.9V/m, para induzir SAR de .05W/kg. Tendo em vista as medidas realizadas pode-se verificar que estes valores foram encontrados em situações reais em Salvador. Em conclusão ao exposto, adotando-se um fator de segurança de 2(dois) são propostos os seguintes valores máximos de campos elétricos a serem suportados pelo público em geral, conforme Tabela 6.4. Esta proposição contempla o princípio da precaução, já apresentado.

Frequência(MHz)	Campo(V/m)
100	20
400	9.5
1000	5.6
3000	6

Tabela 6.4: Campo máximo suportável por um ser humano

Os valores apresentados referem-se a campos máximos, para se obter o valor RMS do campo elétrico deve-se dividir os valores por  $\sqrt{2}$ .

## 6.2 Contorno de Proteção

Tendo-se em conta que as emissoras de FM e TV(bandas I e III), trabalham na faixa de frequências entre 54 e 216 MHz sugere-se que o máximo valor de campo elétrico de proteção, seja de 14.1V/m, valor RMS. Para as emissoras em UHF(banda IV) é proposto o valor de 6.7V/m. Para as estações celulares é proposto seja adotado o

valor de 4V/m RMS, para a faixa de frequências entre 800 e 1900MHz. A Tabela 6.5 apresenta os valores propostos para os campos elétricos, que limitarão os contornos de proteção à vida que deverão ser calculados pela seguinte expressão:

$$d = \frac{\sqrt{30P}}{E} A \quad (6.1)$$

onde:

- P = potência efetivamente irradiada na direção desejada em W.
- E = campo elétrico máximo admissível RMS em V/m.
- d = contorno desejado em m.
- A = fator de atenuação.

O fator de atenuação leva em consideração a existência de obstáculos entre a fonte de radiação e as pessoas atingidas pela mesma. Este fator deve ser um número entre 0 e 2. Deve ser considerado 2, para o caso de emissão em ambientes fechados, tais como estações situadas dentro de Shoppings. Não existindo obstáculos entre a fonte e as pessoas deve ser considerado o valor unitário para o fator A.

Estação	Campo(V/m)
FM e TV em VHF	14.1
TV em UHF	6.7
Celular até 1900MHz	4

Tabela 6.5: Valores de campo elétrico de proteção(RMS)

### 6.3 Comentários Finais

Como foi apresentado no Capítulo 5, verificou-se que a onda eletromagnética penetra mais no corpo humano (tórax e cabeça) na frequência de 1000MHz, do que nas frequências de 100, 400 e 3000GHz. Os gráficos apresentados de variação de espessura das camadas mostram que as camadas que mais influenciam no valor do campo que penetra no corpo são as da pele, gordura e músculo. Para as camadas de gordura e músculo tem-se valores críticos de espessura, sendo que o comportamento da espessura destas camadas é semelhante ao comportamento de um filtro sintonizado. No tocante à pele, quanto mais grossa for, maior proteção terá o ser humano a radiação. Alterando-se os valores das camadas para representar-se uma criança e um homem gordo, os gráficos indicaram que o campo elétrico penetra mais profundamente na criança do que no adulto, e uma pessoa gorda é mais protegida contra a radiação.

Os valores de proteção de campos elétricos propostos estão condizentes com os valores adotados pela Itália e pela Suíça e podem ser perfeitamente obedecidos, sem grandes problemas, bastando atuar nas alturas das torres, ou nas dimensões dos terrenos usados para instalação das estações. Somente com o uso de torres mais altas já se consegue uma distância segura de proteção. Deste modo é perfeitamente compatível obedecer a padrões de segurança mais rígidos, protegendo-se o corpo humano da influência da radiação, ao mesmo tempo que se preserva os requisitos de funcionamento dos equipamentos. Basicamente o que deve ser feito é usar-se torres mais altas, mantendo-se uma região desabitada ao redor das torres de transmissão. Esta região deve ser calculada pela fórmula da Equação 6.1, com o valor de campo apresentado na Tabela 6.5.

Esta dissertação pode ser continuada, estudando-se em particular as frequências de 800, 900, 1700, 1800, 1900 MHz, onde estão operando a maioria dos equipamentos sem fio. Pode-se também aprofundar os estudos no sentido de verificar-se qual tipo

de ser humano seria naturalmente mais protegido contra a radiação em função do seu biotipo. O que se provou aqui é que isto existe, ou seja, devido a constituição dos seres humanos uns são mais protegidos contra a radiação do que outros.

# Bibliografia

- [1] Costa e Silva, R. Eletromagnetismo Aplicado. Edufba, 1998
- [2] Balzano, Q., and Lin, J. C. Mobile Communications Safety. Chapman & Hall, 1997
- [3] Polk, C., and Postow, E. Biological Effects of Eletrmagnetic Fields.CRC Press , 1996
- [4] Publicações Tecnicas Ministerio das Comunicações( 13,15,17,22,41,42,43), 1990
- [5] Soares Neto,V. Sistema Movei e Telefonia Celular. Ed. Érica, 1990
- [6] José Thomaz, S. Efeitos Biologicos das radiações não-ionizantes. Revista da Sociedade Brasileira de Telecomunicações volume11,dezembro 1996
- [7] ICNIRP Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Eletrical, Magnetic, and Eletromagnetic Fields. Health Physics Vol. 74, N°4, 1998
- [8] Moulder, J. E.et al. Cell Phones and Cancer: What is the Evidence for a Connection?. Radiation Research Society 151,1999
- [9] Schwan, H. P. and Piersol, M. The Absortion of Electromagnetic Energy in Body Tissues. Review of Medicine and Rehabilitation, April 1954

- 
- [10] Schallner, M. et al. The Influence of the Human Body on Electric and Magnetic Field. *Frequenz* 52,1998
- [11] Salles, A. A. A. Efeitos Biologicos dos Campos Eletromagneticos. I Seminario Nacional sobre Radiação Não Ionizante, Salvador 12/2000
- [12] Barradas, O. Voce e as Telecomunicações. Ed. Interciencia, 1995
- [13] Yacoub, M. D. and Waldman, H. Telecomunicações Principios e Tendencias. Ed. Érica, 1997
- [14] Firstenberg, A. Microwaving our Planet. Cellular Phone Taskforce, 1997
- [15] Grant, L. Microwave Sickness. Weldon Publishing, 1996
- [16] Halliday, D. and Resnick, R. Fisica. Ed. Livro Tecnico, 1966
- [17] Becker, R. O. and Marino, A. A. Eletromagnetism and Life. Internet, 2000
- [18] Rappaport, T. S. Wireless Communications. Prentice Hall, 1996
- [19] Garg, V. K. and Wilkes, J. E. Wireless and Personal Communications Systems. Prentice Hall, 1966
- [20] Dubovy, J. Biomedical Eletronics. Mc. Graw-Hill, 1978
- [21] Pannel, M. W. Emision y Recepcion com Equipos Moviles. Ed. Paraninfo, 1982
- [22] Beraldo, W. T. Fisiologia. Ed. UFMG, 1976
- [23] Spalteholz, W. Atlas de Anatomia Humana. Editorial Labor S.A., 1976
- [24] Ramo, Whinnery, V. Duzer. Campos e Ondas em Eletrônica das Comunicações. Guanabara Dois, 1981

- [25] Castro Lima, Antonio Cesar de. Radiação e Propagação de Ondas Eletromagnéticas. Apostila curso CEET UFBA, 1999