

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Dissertação de Mestrado

Análise da Exposição Eletromagnética
Passiva à Multifontes Distribuídas
em Ambientes Abertos

Cláudio Pereira da Costa

Campina Grande – Paraíba – Brasil

Março, 2011

Cláudio Pereira da Costa

Análise da Exposição Eletromagnética
Passiva à Multifontes Distribuídas
em Ambientes Abertos

Dissertação submetida ao programa de Pós-Graduação do curso de Engenharia Elétrica (COPELE) da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Orientador: Professor Dr. Glauco Fontgalland

Área de concentração: Processamento da Informação

Linha de Pesquisa: Microondas e Eletromagnetismo Aplicado

Campina Grande – Paraíba – Brasil

© Cláudio Pereira da Costa, 2011

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

C837a Costa, Cláudio Pereira da.

Análise da Exposição Eletromagnética Passiva à Multifontes Distribuídas em Ambientes Abertos /Cláudio Pereira da Costa. — Campina Grande, 2011.

102 f.: il. col.

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

Orientador: Prof. Dr. Fontgalland, Glauco.

Referências.

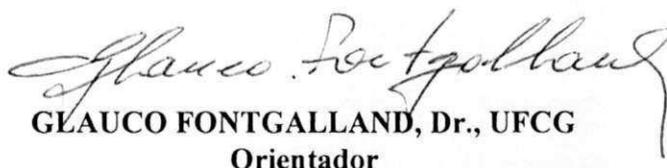
1. Exposição passiva eletromagnética. 2. Algoritmos genéticos. 3. Eletromagnetismo computacional 4. Limites de exposição I. Título.

CDU 614.875(043)

**ANÁLISE DA EXPOSIÇÃO ELETROMAGNÉTICA PASSIVA À MULTIFONTES
DISTRIBUÍDAS EM AMBIENTES ABERTOS**

CLÁUDIO PEREIRA DA COSTA

Dissertação Aprovada em 25.02.2011


GLAUCO FONTGALLAND, Dr., UFCG
Orientador


ALFREDO GOMES NETO, D.Sc., IFPB
Componente da Banca


MARCOS ANTONIO BARBOSA DE MELO, Dr., UFCG
Componente da Banca

RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Componente da Banca(Ausência Justificada)

CAMPINA GRANDE - PB
FEVEREIRO -2011

*Aos meus pais, Sebastião e Socorro, e minha irmã
Patrícia, pelo incentivo e apoio em toda a minha
trajetória até chegar aqui.*

Cláudio Pereira da Costa

AGRADECIMENTOS

Ao meu Deus, por simplesmente ser o bem mais precioso que tenho em minha vida.

Aos meus pais, que de uma maneira singela me educaram e proporcionaram a continuidade dos meus estudos em todos os momentos, até naqueles em que pensei em desistir, vocês são exemplos de trabalho e superação.

Aos meus queridos avôs, Maria das Neves e aos que não estão mais presentes José Cristiano, João Pereira e Joana Maria (*in memoriam*).

A todos que fazem parte da minha família, responsáveis diretos pela formação do meu caráter por meio dos valores que norteiam minha educação.

A minha namorada, Érika Carla, pelo incentivo e compreensão em todos os momentos que estive ausente enquanto me dedicava ao trabalho de mestrado.

Ao professor Glauco Fontgalland, pela singular oportunidade, pela orientação e contribuição ao meu desenvolvimento acadêmico e pelas relevantes sugestões antes, e principalmente, durante todo este trabalho de pesquisa.

Ao professor Rômulo Valle pela indispensável colaboração, em informações prestadas, e pelo incentivo durante a realização dos cursos de graduação e mestrado.

Ao professor Edmar Candeia e a Patrick pela colaboração na elaboração do algoritmo genético.

Ao amigo Ivson, por seu auxílio nas correções do resumo em inglês.

A professora Áurea Ramos por acreditar no meu potencial quando era aluno do curso de Licenciatura em Física pela UEPB.

Aos amigos Josenildo, Valentina e Wilker pelo companheirismo e apoio dados durante a nossa passagem na graduação em Engenharia Elétrica e a Raquel pelo convívio e a amizade na pós-graduação.

Aos funcionários da coordenação de graduação e pós-graduação em Engenharia Elétrica, Adail, Ângela, Juarez, Pedro, Rosilda, Suênia e Tchaikovsky, pela excelente prestação de serviços e convívio.

Ao CNPq pelo suporte financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa.

Cláudio Pereira da Costa

*“Agrada-te do Senhor, e Ele
satisfará os desejos do teu
coração.” (Salmos 37.4)*

RESUMO

Neste trabalho é realizada a análise da exposição eletromagnética passiva à multifontes distribuídas em ambientes abertos. Para a devida caracterização do fenômeno estudado é descrita uma revisão bibliográfica dos principais conceitos e parâmetros eletromagnéticos presentes, além das principais normas e recomendações vigentes relacionadas à exposição eletromagnética, como também da técnica de otimização utilizada, algoritmos genéticos. São apresentados os resultados calculados de campos eletromagnéticos, com a presença de um modelo da cabeça humana, e as disposições dos arranjos obtidos em duas configurações: na primeira são apresentadas situações em que as antenas dipolo se encontram em posições pré-determinadas, as quais servem de base para a delimitação da região de estudo e análise dos níveis de campos eletromagnéticos calculados nessas situações. Posteriormente, o posicionamento das antenas é otimizado em algoritmo genético com o objetivo de obter e analisar o pior caso na região de estudo, os níveis de máximos de campos eletromagnéticos no usuário e na sua vizinhança, os quais são produzidos pela disposição do arranjo. Finalmente, os níveis de campos eletromagnéticos calculados foram comparados com os níveis de referência da norma, levando-se em consideração a potência, a posição espacial e a quantidade das fontes no arranjo. Também foram feitas algumas observações sobre os níveis de campos eletromagnéticos obtidos na presença de um modelo da cabeça humana. Por fim, são apresentadas as considerações finais e a possibilidade de trabalhos futuros sobre o tema.

Palavras chaves: Exposição passiva eletromagnética, algoritmos genéticos, arranjo espacial, eletromagnetismo computacional, limites de exposição.

ABSTRACT

In this work it is presented an analysis of the passive electromagnetic exposure produced by distributed multisource in outdoor. In order to obtain an accurate characterization of the phenomenon it has been made a literature review of the basics concepts and electromagnetic parameters taking into account the existing standards recommendations related to electromagnetic field. It is also reported the optimization technique by genetic algorithms. It is presented the electromagnetic field calculated results with the presence of a human head model and the dispositions of the obtained arrays in two steps. In the first step, are analyzed situations in which the antennas are placed at predetermined positions according to the electromagnetic field levels calculated from the distributions of the antennas. Subsequently, the positioning of the antennas is optimized with genetic algorithm in order to obtain and analyze the worst case in the study area, the maximum levels of electromagnetic fields on the user and its vicinity which are produced by the provision of the arrangement. Finally, levels of electromagnetic fields were calculated compared with levels of reference ones reported by the standard is made taking into account the level of the power sources, its spatial position and their quantity in the array. It is also made some observations on the levels obtained in the presence of a model of a human head. Finally, we present the final considerations aiming at the possibility of future works on the subject.

Keywords: Passive electromagnetic exposure, genetic algorithms, adaptive array, computational electromagnetic.

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 1 |
| 1.1.JUSTIFICATIVA | 3 |
| 1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA | 3 |
| 1.3. LIMITAÇÃO DO PROBLEMA | 4 |
| 1.4.OBJETIVOS DO ESTUDO | 4 |
| 1.4.1. Geral..... | 4 |
| 1.4.2. Específicos..... | 4 |
| 1.5. CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA | 5 |
| 1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO | 5 |
| 2. ENERGIA ELETROMAGNÉTICA E LIMITES DE EXPOSIÇÃO | 6 |
| 2.1.RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA E O ESPECTRO..... | 6 |
| 2.2. EXPOSIÇÃO À ENERGIA ELETROMAGNÉTICA | 8 |
| 2.2.1. Equações de Maxwell..... | 10 |
| 2.2.2. Propriedades elétricas dos materiais | 11 |
| 2.3.TAXA DE ABSORÇÃO ESPECÍFICA..... | 13 |
| 2.4. NORMAS E RECOMENDAÇÕES | 15 |
| 2.5. MÉTODOS DE MEDIÇÃO | 19 |
| 2.6. CONCLUSÃO | 20 |
| 3. ALGORITMOS GENÉTICOS | 21 |
| 3.1. UM BREVE HISTÓRICO E SUA INSPIRAÇÃO BIOLÓGICA | 21 |
| 3.2. ESTRUTURA DOS ALGORITMOS GENÉTICOS | 23 |
| 3.2.1. Representação dos cromossomos..... | 24 |

| | |
|--|-----------|
| 3.2.2. População inicial | 26 |
| 3.2.3. Função objetivo | 27 |
| 3.2.4. Seleção | 27 |
| 3.2.5. Operador cruzamento | 28 |
| 3.2.6. Operador mutação | 30 |
| 3.2.7. Critério de parada..... | 31 |
| 3.3. EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO | 32 |
| 3.4. CONCLUSÃO | 33 |
| 4. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE | 35 |
| 4.1. FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO DE ANÁLISE ADOTADO | 35 |
| 4.2. AMBIENTE ANALISADO | 37 |
| 4.3. DESCRIÇÕES DAS MODELAGENS | 38 |
| 4.3.1. Modelagem da Cabeça Humana..... | 38 |
| 4.3.2. Modelagem das Fontes Eletromagnéticas..... | 40 |
| 4.4. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS | 42 |
| 4.4.1. Etapa 1 – Configuração 1 | 43 |
| 4.4.2. Etapa 1 – Configuração 2 | 44 |
| 4.4.3. Etapa 2: casos otimizados..... | 45 |
| 4.5. OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS FONTES ELETROMAGNÉTICAS . | |
| ..... | 46 |
| 4.5.1. Definição do tamanho da população inicial e da cadeia de cromossomos..... | 46 |
| 4.5.2. Função objetivo | 47 |
| 4.5.3. Seleção | 48 |
| 4.5.4. Cruzamento e mutação..... | 49 |

| | |
|--|-----------|
| 4.5.5. Critério de parada..... | 49 |
| 4.6. CONCLUSÃO | 49 |
| 5. RESULTADOS E ANÁLISES | 50 |
| 5.1. CÁLCULO DOS NÍVEIS DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS PRODUZIDOS PELAS FONTES ELETROMAGNÉTICAS | 50 |
| 5.2. RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA..... | 51 |
| 5.2.1. Etapa 1 - Configuração 1..... | 52 |
| 5.2.2. Etapa 1 - Configuração 2..... | 54 |
| 5.2.2.1. Etapa 1 - Configuração 2.1..... | 54 |
| 5.2.2.2. Etapa 1 - Configuração 2.2..... | 55 |
| 5.3. RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA..... | 58 |
| 5.3.1. Etapa 2 - Configuração 1..... | 58 |
| 5.3.2. Etapa 2 - Configuração 2..... | 61 |
| 5.3.3. Etapa 2 - Configuração 3..... | 64 |
| 5.4. CONCLUSÃO | 68 |
| 6. CONCLUSÕES | 70 |
| REFERÊNCIAS | 74 |
| ANEXO A – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS | 80 |
| ANEXO B – TRABALHOS SUBMETIDOS PARA PUBLICAÇÃO..... | 81 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Fontes terrestres e extraterrestres de radiação de rádiofrequência (ICNIRP, 2009)..... | 7 |
| Figura 2 – Espectro Eletromagnético (ALMAGUER, 2003) | 8 |
| Figura 3 – Exposição EM passiva de usuários devido a fonte EM..... | 9 |
| Figura 4 – Limites de exposição para o público em geral a campos elétricos | 18 |
| Figura 5 – Fluxograma típico do algoritmo genético..... | 24 |
| Figura 6 – Representação binária dos cromossomos | 25 |
| Figura 7 – Representação binária da população inicial..... | 26 |
| Figura 8 – Seleção utilizando o método da roleta | 28 |
| Figura 9 – Operador cruzamento dos cromossomos pais em um ponto de corte | 29 |
| Figura 10 – Operador cruzamento uniforme dos cromossomos | 30 |
| Figura 11 – Operador mutação nos cromossomos filhos | 31 |
| Figura 12 – Gráfico da função $f(x) = x \text{ sem } (10\pi x) + 2$ | 32 |
| Figura 13 – Evolução do melhor valor e média da população para a equação (3.4) | 33 |
| Figura 14 – Diagrama de fluxo para representar a sequência de estudo..... | 36 |
| Figura 15 – Domínio de estudo..... | 37 |
| Figura 16 – Vista superior do modelo da cabeça humana | 39 |
| Figura 17 – Antena dipolo | 41 |
| Figura 18 – Coeficiente de reflexão $\|S_{1,1} $ de uma antena dipolo de meia onda | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 19 – Diagrama de irradiação de uma antena dipolo de meia onda | 42 |
| Figura 20 – Representação da exposição EM passiva produzida por uma antena dipolo (Configuração 1) | 44 |
| Figura 21 – Representação da exposição EM passiva produzida por duas antenas dipolos (Configuração 2.1) | 45 |
| Figura 22 – Representação da exposição EM passiva produzida por duas antenas dipolos (Configuração 2.2) | 45 |
| Figura 23 – Exposição EM passiva à multifontes..... | 46 |
| Figura 24 – Representação dos cromossomos utilizados na população inicial | 47 |
| Figura 25 – Coeficiente de reflexão da fonte EM na presença do usuário passivo, para as configurações 1, 2.1 e 2.2..... | 51 |
| Figura 26 – Distribuição do campos elétrico no plano XY no usuário passivo na presença de uma fonte EM, plano transversal com o modelo da cabeça à (a) 0,3 m da fonte EM. (b) 0,4 m da fonte EM. (c) 0,5 m da fonte EM. (d) 0,6 m da fonte EM. (e) 0,7 m da fonte EM. (f) 0,8 m da fonte EM (g) 0,9 m da fonte EM (h) 1 m da fonte EM..... | 53 |
| Figura 27 – Distribuição do campos elétrico no plano XY no usuário passivo na presença de duas fontes EM (Configuração 2.1), plano transversal com o modelo da cabeça à (a) 0,3 m da fonte EM. (b) 0,4 m da fonte EM. (c) 0,5 m da fonte EM. (d) 0,6 m da fonte EM. (e) 0,7 m da fonte EM..... | 55 |
| Figura 28 – Distribuição do campos elétrico no plano XY no usuário passivo na presença de duas fontes EM (Configuração 2.2), plano transversal com o modelo da cabeça à (a) 0,3 m da fonte EM. (b) 0,4 m da fonte EM. (c) 0,5 m da fonte EM. (d) 0,6 m da fonte EM. (e) 0,7 m da fonte EM. (f) 0,8 m da fonte EM (g) 0,9 m da fonte EM (h) 1 m da fonte EM..... | 56 |
| Figura 29 – Distribuição do campos elétrico no plano ZY no usuário passivo na presença de duas fontes EM, vista lateral com o modelo da cabeça à (a) 0,3 m da fonte EM. (b) 0,4 m da fonte EM. (c) 0,5 m da fonte EM. (d) 0,6 m da fonte EM. (e) 0,7 m da fonte EM..... | 57 |
| Figura 30 – Vista superior da antena dipolo nas proximidades do usuário passivo com seus parâmetros otimizados..... | 58 |
| Figura 31 – Vista frontal da distribuição de campo elétrico no plano XY produzidos por uma fonte EM distribuída com os parâmetros otimizados (a) 0,3330 m (b) 0,4330 m (c) 0,5330 m da fonte..... | 60 |
| Figura 32 – Diagrama de irradiação da fonte EM com os parâmetros otimizados | 60 |
| Figura 33 – Coeficiente de reflexão $S_{1,1}$ da fonte EM com os parâmetros otimizados..... | 61 |

| | |
|--|----|
| Figura 34 – Vista superior de duas antenas dipolos nas proximidades do usuário passivo com seus parâmetros otimizados..... | 61 |
| Figura 35 – Diagrama de irradiação do arranjo constituído por duas fontes EM com os parâmetros otimizados. | 62 |
| Figura 36 – Coeficiente de reflexão $S_{1,1}$ da fonte EM 1 com os parâmetros otimizados para o arranjo com duas fontes. | 62 |
| Figura 37 – Coeficiente de reflexão $S_{2,2}$ da fonte EM 2 com os parâmetros otimizados para o arranjo com duas fontes. | 63 |
| Figura 38 – Vista frontal da distribuição do campo elétrico no plano XY produzidos por duas fontes EM distribuídas com os parâmetros otimizados (a) 0,340 m (b) 0,440 m (c) 0,540 m das fontes..... | 64 |
| Figura 39 – Vista superior de três antenas dipolos nas proximidades do usuário passivo com seus parâmetros otimizados..... | 64 |
| Figura 40 – Vista frontal da distribuição do campo elétrico no plano XY produzidos pelo arranjo espacial constituído de três fontes EM distribuídas com os parâmetros otimizados (a) 0,3432 m (b) 0,4432 m (c) 0,5432 m das fontes..... | 66 |
| Figura 41 – Diagrama de irradiação do arranjo com três fontes EM após o processo de otimização..... | 67 |
| Figura 42 - Coeficiente de reflexão $S_{1,1}$ da fonte EM 1 com os parâmetros otimizados para o arranjo com três fontes..... | 67 |
| Figura 43 - Coeficiente de reflexão $S_{2,2}$ da fonte EM 2 com os parâmetros otimizados para o arranjo com três fontes..... | 68 |
| Figura 44 - Coeficiente de reflexão $S_{3,3}$ da fonte EM 3 com os parâmetros otimizados para o arranjo com três fontes..... | 68 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 – Limites de exposição pública da ICNIRP e IEEE de onda plana (SANCHEZ-HERNANDEZ, 2009, p. 208) | 16 |
| Tabela 2 – Limites de exposição ocupacional da ICNIRP e IEEE de onda plana (SANCHEZ-HERNANDEZ, 2009, p. 208) | 16 |
| Tabela 3 – Limites para exposição da população em geral a CEMRF na faixa de radiofrequências entre 9 kHz e 300 GHz (valores eficazes não perturbados) (BRASIL, 2002) | 17 |
| Tabela 4 – Terminologia análoga dos algoritmos genéticos e do sistema | 23 |
| Tabela 5 – Propriedades dos tecidos simulados para a frequência de 2,45 GHz | 40 |
| Tabela 6 – Parâmetros relativos à antena dipolo para 2,45 GHz | 42 |
| Tabela 7 – Ganho em função da distância para as configurações 1, 2.1 e 2.2 | 52 |
| Tabela 8 – Parâmetros otimizados pelo AG | 58 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|--------------|--|
| ϵ_r | permissividade relativa |
| μ_r | permeabilidade magnética relativa |
| B | densidade de fluxo magnético |
| C_p | calor específico do tecido |
| D | densidade de fluxo elétrico |
| q_{ev} | carga de prova |
| E | intensidade de campo elétrico |
| E_i | intensidade de campo elétrico na frequência i |
| $E_{l, i}$ | intensidade de campo elétrico de acordo com a Tabela 3 |
| f | frequência |
| f_i | avaliação do indivíduo i na população corrente |
| H | intensidade de campo magnético |
| I | corrente elétrica |
| inf_i | valor inferior do conjunto |
| J | densidade de corrente elétrica |
| J_i | corrente de deslocamento |
| J_c | corrente de condução |
| k | quantidade de bits necessária pra representar uma variável x_i |
| m | massa |
| M | tamanho da população |
| P | potência |
| p_i | probabilidade do indivíduo i ser selecionado |
| P_v | potência volumétrica |
| r | raio da camada |
| S | densidade de potência |
| S_{eq} | densidade de potência da onda plana equivalente |
| sup_i | valor superior do conjunto |
| t | tempo |
| T | temperatura |

| | | |
|-------------------|-------|--|
| $\tan \delta$ | ..... | tangente de perda |
| V | ..... | volume |
| W | ..... | trabalho |
| W_v | ..... | energia volumétrica |
| ϵ | ..... | permissividade elétrica |
| ϵ_∞ | | permissividade relativa óptica |
| ϵ_0 | ..... | permissividade do vácuo |
| ϵ_s | ..... | constante dielétrica estática |
| ρ | ..... | densidade volumétrica de carga elétrica |
| σ_a | ..... | condutividade dispersiva |
| τ_e | ..... | constante de tempo de relaxação elétrica |
| σ | ..... | condutividade |

LISTA DE ABREVIATURAS

| | |
|------------------|--|
| AG..... | Algoritmo Genético |
| ANATEL..... | Agência Nacional de Telecomunicações |
| ANSI..... | <i>American National Standards Institute</i> |
| CEM..... | Campos Eletromagnéticos |
| CEMRF..... | Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos em Rádio Frequência |
| EEEM..... | Exposição à Energia Eletromagnética |
| EM..... | Eletromagnética |
| FCC..... | <i>Federal Communications Commission</i> |
| FDM..... | Método das Diferenças Finitas |
| FDTD..... | Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo |
| FEM..... | Método dos Elementos Finitos |
| FIT..... | Técnica da Integral Finita |
| IARC | <i>Industrial Agency for Research on Cancer</i> |
| ICNIRP | <i>International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection</i> |
| IEEE | <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> |
| ISM..... | <i>Instrumentation Scientific and Medical</i> |
| ITU..... | <i>Internation Telecommunication Union</i> |
| MATLAB..... | <i>Matrix Laboraty</i> |
| MoM..... | Método dos Momentos |
| MWS-CST | <i>Microwave Studio Computer Scientific Technology</i> |
| PBA..... | <i>Perfect Boundary Approximation</i> |
| PEC..... | Condutor Elétrico Perfeito |
| Project EMF..... | <i>Project Electromagnetic Fields</i> |
| RCD..... | Região de Campos Distantes |
| REM | Radiação Eletromagnética |
| RF..... | Rádio Frequência |
| RI..... | Radiação Ionizante |
| RNI..... | Radiação Não Ionizante |
| SA..... | Absorção Específica |

| | |
|------------|---|
| SAR..... | Taxa de Absorção Específica |
| TST | <i>Thin Sheet Technique</i> |
| WHO | <i>World Health Organization</i> |
| WLAN..... | <i>Wireless Local Area Network</i> |
| WMAN..... | <i>Wireless Metropolitan Area Network</i> |
| WPAN | <i>Wireless Personal Area Network</i> |

Capítulo 1

1. INTRODUÇÃO

A evolução tecnológica nas duas últimas décadas, promovida pelo desenvolvimento de dispositivos, baseados nas comunicações sem fio em rádio frequência (RF) e microondas, mudou o panorama e o modo de vida da sociedade moderna.

Atualmente, é comum encontrar dispositivos em RF nos inúmeros cenários do cotidiano, sejam eles ambientes fechados (casas, escolas, hospitais, trens, carros, etc.) ou ambientes abertos (praças, ruas, etc.), normalmente emitindo campos eletromagnéticos (CEM¹), utilizados por oferecerem inúmeros serviços aglutinados em uma única unidade móvel.

A proliferação desses dispositivos entre a população sem a devida discussão e a realização de estudos científicos conclusivos, impossibilita ainda hoje avaliar e correlacionar completamente as quantidades derivadas da exposição com os fenômenos observados. O fato é que a energia eletromagnética está presente em diversos tipos de aparelhos e cenários, causando uma exposição prolongada a esse tipo de energia.

Devido a essa exposição indiscriminada, várias pesquisas e debates científicos se voltam aos possíveis efeitos adversos² à saúde pública³, todos motivados em mensurar os níveis de exposição EM, os quais podem ser potencialmente danosos à saúde humana. (GETURMAN *et al.*, 2007a; 2007b; MARIAGE *et al.*, 2009; YAZDANDOOST, 2009).

Entre as muitas aplicações padronizadas atualmente pelo *Institute of Electrical and Electronics Engineers* (IEEE) e inseridas nesses segmentos temos: o *Bluetooth*, para redes pessoais, o *Wireless Personal Area Network* (WPAN); o *Wi-Fi*, em redes locais, *Wireless Local Area Network* (WLAN) e o *Wimax*, para redes metropolitanas, *Wireless Metropolitan Area Network* (WMAN). Entre os diversos aparelhos que fazem uso destes padrões destacam-

¹São compostos por campos elétricos, campos magnéticos e campos eletromagnéticos gerados por fontes naturais ou artificiais.

² A WHO considera como efeitos adversos: os que indicam a fase inicial de uma doença clínica; os que não são facilmente reversíveis; os que tornam o indivíduo mais susceptível aos efeitos nocivos dos agentes ambientais, e aqueles que indicam alterações metabólicas ou bioquímicas, incluindo o câncer.

³Segundo a FIOCRUZ saúde pública refere-se às formas de agenciamento político governamental de intervenções voltadas às necessidades sociais de saúde.

se os *Notebooks, Iphone4, Ipad, iPhone, Tablet*, aparelhos celulares, roteadores, etc.

Esta afirmação também é destacada para os dispositivos que operam na banda *Industrial Scientific and Medical (ISM)*⁴ a qual consiste de três segmentos do espectro eletromagnético: 902 MHz a 928 MHz, 2400 MHz a 2483,5 MHz e 5725 MHz a 5850 MHz, onde, por simplificação são alocadas aplicações específicas em RF, em níveis mais baixos de potência, mas contínuos, que em geral não causam interferência em outros sistemas de comunicações.

Logo, a análise da exposição EM nos mais diversos cenários onde esses dispositivos atuam é fundamental, de forma que proporcione um desenvolvimento harmônico entre os interesses econômicos e a saúde pública, de modo que se possa fornecer total conhecimento destas tecnologias que ainda não se mostraram inócuas (ARAÚJO, 2010).

Com o objetivo de regulamentar a exposição também a esses dispositivos os órgãos governamentais nacionais e internacionais, com suas agências de pesquisas e comitês científicos, desenvolveram recomendações e normas, que se encontram em constantes atualizações baseados nos estudos epidemiológicos⁵, estabelecendo limites para a exposição ocupacional e do público em geral (BOUTRY, 2008; ITU, 2010).

Este regulamento quantifica os limites para exposição humana aos campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos em rádio frequência (CEMRF) e define métodos de avaliação e procedimentos para licença de estações de rádio base e a conformidade de aparelhos.

A importância no desenvolvimento de pesquisas sobre os CEMs e suas repercussões no Brasil e nos demais países, baseia-se na necessidade de oferecer informação credível e com relevância científica e condições proeminentes que possa nortear a opinião da população.

Uma importante questão inserida nesta temática e objeto deste estudo compreende a exposição passiva eletromagnética resultante da superposição de CEMs produzidas por multifontes. Esta exposição é resultado da interação de um usuário próximo de uma fonte EM, sem que o mesmo não seja o portador de tal dispositivo irradiador.

Diante de tal exposição pouco abordada em trabalhos científicos, há uma necessidade de ampliar as investigações acerca das atuais tecnologias inseridas na sociedade, que levem em consideração os reais procedimentos e instrumentos de investigação, aprimorando os

⁴ Banda de frequência não licenciada do espectro eletromagnético, utilizada por aplicações específicas que emitem radiação restrita.

⁵São estudos sobre a saúde coletiva em relação a causa-efeito ou causa-doença.

estudos científicos que comprovem os níveis de segurança também para esse tipo de exposição.

Portanto, ações conjuntas devem ser elaboradas pelos órgãos nacionais em paralelo com as pesquisas visando estudar, avaliar e gerenciar a distribuição de CEMs, os quais resultam na exposição passiva EM produzidas pelas multifontes.

1.1. JUSTIFICATIVA

A motivação para o estudo da exposição passiva produzida por multifontes EM é justificada pela visão conservadora da atual legislação em vigor e pela ineficiência de estudos sobre esse tipo de exposição EM. A isso se soma a ausência nas normas ou regulamentações vigentes (ANATEL, ICNIRP e IEEE), de descrições dos procedimentos ou protocolos que leve em consideração a absorção de energia EM nos usuários que não estejam utilizando dispositivos geradores de sinais em RF.

A preocupação com a quase inexistência de dados sobre os níveis de exposição eletromagnética produzida por uma tecnologia que rapidamente se popularizou. E, a constatação de poucos trabalhos de pesquisa sobre este tema, principalmente em ambientes abertos no Brasil.

1.2. FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DA PESQUISA

A exposição passiva caracteriza-se pela grande quantidade de fontes EM presentes no meio ambiente, emissoras de CEM em indivíduos que não são portadores de aparelhos em RF, sendo este um fenômeno complexo e pouco investigado na bibliografia científica.

A falta de respaldo técnico sobre o uso de inúmeros dispositivos sem fio em ambientes abertos ocasiona dúvidas na avaliação, percepção, gerenciamentos de riscos e julgamentos adequados na gerência e regulamentação vigente.

Diante disso, é necessário investigar a distribuição do CEM provenientes de mais de uma fonte, analisando os níveis de exposição EM passiva resultante dessa configuração de multifontes.

1.3. LIMITAÇÃO DO TEMA

Devido à possibilidade de inúmeros ambientes e vários dispositivos com frequências de operação distintas, este estudo se restringiu aos aparelhos que operam na frequência de 2,45 GHz em ambientes abertos.

Será abordada neste trabalho a análise dos CEM na vizinhança das fontes EMs e no modelo multicamadas adotado da cabeça humana. O procedimento computacional seguido visa analisar os níveis de CEM calculados na condição do pior caso, isto é, as distâncias, as amplitudes e as fases das fontes são otimizadas de modo a obter os valores máximos possíveis, estando às fontes na região de campos distantes (RCD⁶).

1.4. OBJETIVOS DO ESTUDO

1.4.1. Geral

Analisar e caracterizar a distribuição de CEM em ambiente aberto resultado da exposição passiva EM, produzida por multifontes dispostas no espaço utilizando os algoritmos genéticos.

1.4.2. Específicos

Calcular os níveis de CEM na RCD no ambiente aberto com a presença da cabeça humana, produzidos por multifontes;

Identificar a correlação entre os níveis calculados com o fenômeno da superposição;

Comparar os níveis calculados com os limites de exposição pública das normas internacionais do IEEE (2005), ICNIRP (1998) e da norma nacional da ANATEL (BRASIL, 2002), para constatar se existe conformidade, ou não, aos valores padrão vigentes.

⁶É definida como a região de campo de uma antena onde a distribuição angular dos campos independe da distância a antena. Segundo Balanis (2009) seu valor é dado por $r = 2D^2/\lambda$, onde D é a dimensão máxima da antena e λ é o comprimento de onda.

1.5. CONTRIBUIÇÕES DA PESQUISA

Este trabalho pretende prover informações teóricas e experimentais, por meio de simulações computacionais que possam subsidiar a análise, avaliação, percepção resultantes da exposição passiva EM ao público em geral, que possibilitem ações adequadas quanto ao controle desta exposição indiscriminada.

Complementarmente também, evidenciar a importância da otimização da disposição espacial das multifontes EM, por intermédio dos algoritmos genéticos, na identificação e ocorrência de forma construtiva da superposição dos CEMs e sua contextualização através de mecanismos de propagação eletromagnética.

1.6. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

Este trabalho de dissertação é estruturado em 6 capítulos, da seguinte maneira: no capítulo 2 é apresentada uma revisão da literatura, abordando a exposição eletromagnética relacionada ao tema da pesquisa e os principais conceitos sobre a energia EM.

No capítulo 3 é apresentada uma introdução à técnica de busca aleatória algoritmos genéticos, onde são destacando suas partes constitutivas além de um exemplo de aplicação.

No capítulo 4 é descrito o procedimento de análise para o cálculo dos níveis de exposição passiva EM, produzidos por multifontes, a partir da modelagem e da simulação computacional, sendo descritos separadamente a escolha e o procedimento de modelagem do ambiente, da cabeça humana e das fontes EM, todas no software comercial *Microwave Studio CST* (MWS CST), visto que os mesmos são interligados.

Por fim, é descrito o uso do AG, desenvolvido em código *Matrix Laboratory* (MATLAB) em ambiente Windows, o qual fornece os valores ótimos dos parâmetros para a composição do arranjo.

No capítulo 5 são analisados os resultados obtidos por meio do procedimento apresentado no capítulo 4.

Por fim, no capítulo 6 são apresentadas as conclusões relativas ao objetivo inicialmente delimitado, as principais contribuições e as sugestões para trabalhos futuros sobre a exposição passiva EM.

Capítulo 2

2. ENERGIA ELETROMAGNÉTICA E LIMITES DE EXPOSIÇÃO

Neste capítulo é apresentado um resumo teórico sobre conceitos e parâmetros eletromagnéticos relacionados ao estudo da exposição eletromagnética, ao uso do espectro eletromagnético, os tipos de radiação existentes, as formas de exposição eletromagnética (EEEM) presentes no cotidiano, bem como uma discussão acerca de sua interação com os tecidos humanos.

Também são estabelecidos os limites para a exposição humana a CEMRF associados à faixa de 9 kHz a 300 GHz e como é tratada a exposição eletromagnética gerada por multifontes.

Por fim, são apresentadas as conclusões do capítulo correlacionando a importância dos conceitos e parâmetros eletromagnéticos no estudo de exposição EM à multifontes.

2.1. RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA E O ESPECTRO

A energia eletromagnética (EM) ou simplesmente radiação eletromagnética (REM) encontra-se presente na grande maioria dos fenômenos físicos na atualidade, principalmente em dispositivos que operam com o uso de sinais em RF.

Diariamente, ainda que imperceptíveis, a população vem sendo exposta a diversos tipos de REM através das mais diferentes fontes, sejam elas naturais, como as radiações solares, ou de origem artificial, como as utilizadas em sistemas de telecomunicações. Todas, de uma maneira geral, estão contribuindo para uma alteração significativa no meio ambiente, do qual os seres humanos fazem parte.

Segundo Ferreira (2010), entre as fontes artificiais existe a seguinte subclassificação: as intencionais, que emitem CEM como partes do seu funcionamento, e as não intencionais, onde a emissão dos CEM é consequência do seu mau funcionamento.

A Fig. 1 ilustra o ambiente natural eletromagnético constituído de fontes terrestres e extraterrestres, como as descargas atmosféricas na Terra e a radiação do Sol e do espaço. Tais

fontes possuem um espectro de banda larga, quando muito transientes aleatórios de pico de alta ou explosões surgem durante o ruído como a radiação de fundo.

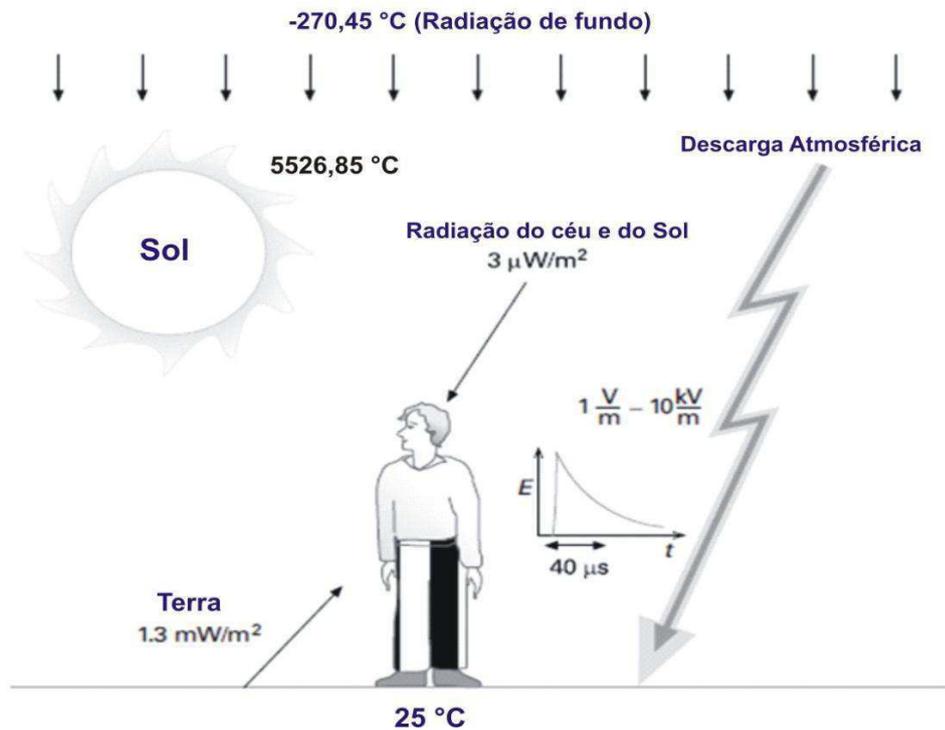


Figura 1 – Fontes terrestres e extraterrestres de radiação de rádio frequência (ICNIRP, 2009).

Esse tipo de energia interage com todos os organismos, muitas vezes auxiliando em mecanismos constitutivos dos mesmos, que podem produzir mudanças biológicas benéficas a nossa saúde (síntese da vitamina D).

A REM é o processo físico por meio do qual se emite e propaga energia. Essa energia é constituída de campos elétricos e magnéticos variantes no tempo de um ponto a outro no espaço, ou através de um objeto material.

Sua classificação é dada, através da grandeza potencial de ionização, de duas formas: radiação ionizante (RI) e não ionizante (RNI). A RI é o tipo de energia irradiada que é capaz de retirar um elétron da camada de valência de um átomo qualquer, isto é, produzindo íons e radicais livres.

A RNI, por sua vez, não ativa os íons, por não possuir energia suficiente para retirar elétrons da camada de valência. Observa-se na Fig. 2 exemplos de aplicações existentes em nosso cotidiano da RI e da RNI, exemplos como os raios-X e o celular, respectivamente.

Portanto, no tocante ao material biológico que forma o corpo humano, para existir efeito ionizante o fóton deve ter energia igual ou superior a 10 eV, esse nível de energia é atingido somente com frequências superiores a $2,4 \times 10^{15}$ Hz (WANDERLEY, 2009).

A distribuição da REM está relacionada diretamente com a frequência ou com o comprimento de onda dos sinais RF. Os diferentes valores destas grandezas indicam a existência de RI e RNI, assim é necessário apresentar o espectro eletromagnético a seguir (Fig.2), associando os principais fenômenos eletromagnéticos e mais algumas aplicações.

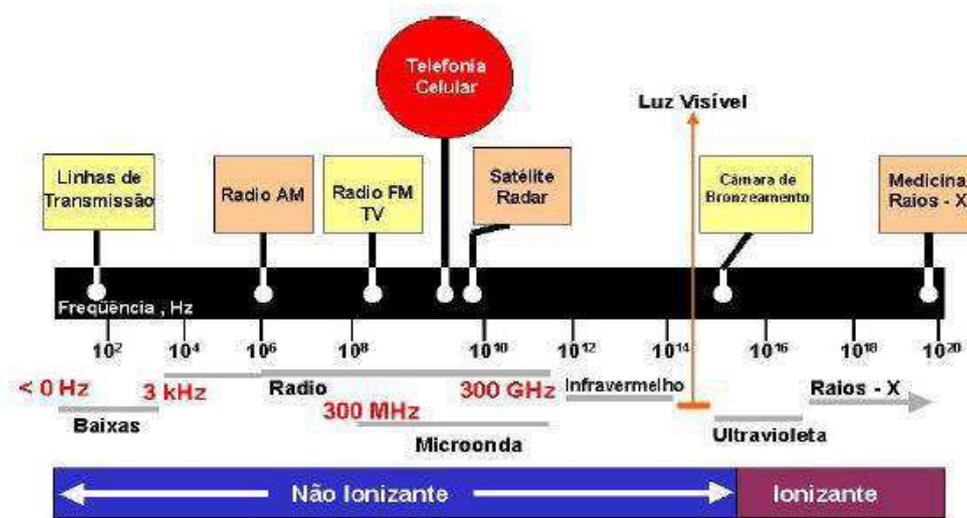


Figura 2 - Espectro Eletromagnético (ALMAGUER, 2003).

As RFs abrangem a faixa dos 3 kHz até os 300 GHz, sendo a banda de microondas uma categoria específica da faixa de RNI, situada no final da faixa dos 300 MHz até os 30 GHz.

Para a faixa de frequência RNI, o principal efeito do ponto de vista macroscópico, conhecido e comprovado, é o aumento da temperatura do corpo (efeito térmico). Isto ocorre devido à dissipação sob a forma de calor da energia absorvida. Caso a intensidade da radiação seja elevada, o aumento de temperatura pode ser excessivo, provocando danos à saúde.

2.2. EXPOSIÇÃO À ENERGIA ELETROMAGNÉTICA

O termo exposição é definido como o contato ao longo do tempo e do espaço, entre uma pessoa e uma, ou mais, substância biológica, química ou agente físico (HUMAN

EXPOSURE ASSESSMENT, 2010). Seu estudo tem por finalidade identificar, analisar e avaliar os riscos que podem ser previstos para ocorrer em seres humanos.

Pode-se definir a exposição à energia eletromagnética (EEEM) como sendo a interação dos CEMRF em uma pessoa. Entretanto a EEEM também é utilizada no tratamento de câncer e no diagnóstico (por imagem) de diversas doenças.

O corpo humano, nessa interação, não apresenta o mesmo comportamento em relação às diferentes EEEMs. Isso acontece pelos seguintes fatores: pelo tipo de exposição que as fontes de CEMRF naturais e artificiais gerado por operarem nas várias frequências e potências.

Os estudos que resultam nas recomendações das normas baseiam-se na EEEM de maneira direta, que é a exposição a CEM resultantes do uso de dispositivos, portados pelos seus usuários (GASMELSEED & YUNUS, 2010; DE SANTIS, 2009; GATI, 2009; KHODABAKSHI, 2010). Logo, o foco de muitas pesquisas encontra-se no usuário portador do dispositivo, ou seja, os usuários ativos.

Todavia, devido às antenas irradiarem em todas as direções, o meio ambiente, nas proximidades do usuário, também é modificado pelos CEM, o que por sua vez pode ocasionar a existência de uma EEEM por pessoas não portadoras desses dispositivos; estes são os usuários passivos (Fig. 3).

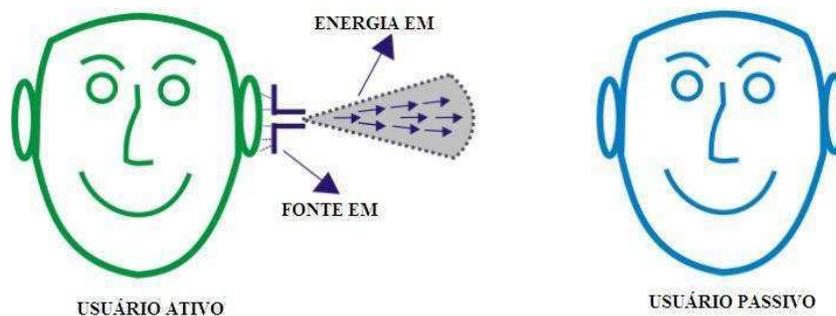


Figura 3 - Exposição EM passiva de usuários devido à fonte EM.

Algumas pesquisas científicas caracterizam sua existência no ambiente aberto promovendo EEEM nos usuários e cenários sem o devido conhecimento (HONDOU, 2006; PEREIRA FILHO, 2009; PESSOA, 2009 e WOLLINGER, 2003). Pouco destaque tem sido dado aos possíveis níveis de distribuição EM espacial que esta exposição indiscriminada produz.

Portanto para a compreensão dos mecanismos de interação dos CEM com o corpo humano também resultante da EEEM passiva é necessário à determinação das características da radiação incidente, por meio das equações de Maxwell, e das características elétricas dos tecidos biológicos.

2.2.1. Equações de Maxwell

A forma mais apropriada de se obter resultados de grandezas eletromagnéticas em materiais como os tecidos biológicos baseia-se no uso de métodos numéricos para solução das equações de Maxwell.

A teoria de propagação das ondas eletromagnéticas envolve a presença do campo elétrico e do campo magnético, ambos variantes no tempo, que se relacionam por meio das equações descritas por Maxwell.

Considerando um meio isotrópico, homogêneo e linear, na forma diferencial estas equações são escritas da seguinte forma (ULABY, 2007, p.174):

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = q_{ev} \quad (2.4)$$

Vários métodos como o método das diferenças finitas (FDM), o método dos elementos finitos (FEM), o método das diferenças finitas no domínio do tempo (FDTD), métodos dos momentos (MoM), dentre outros, usando as equações de Maxwell, têm sido aplicados na análise da distribuição de campos, correntes e potência dissipada em grandes porções de tecidos, órgãos e corpos inteiros submetidos a campos externos.

O uso de vários métodos numéricos é justificado face à complexidade estrutural dos tecidos biológicos, difíceis de serem estudados por métodos analíticos, já que muitas vezes apresentam anisotropia e a dispersão como propriedades elétricas.

Portanto, os métodos numéricos baseados nas equações de Maxwell, utilizados para modelagem e simulação de fenômenos que relacionem os CEMs e sua interação com o corpo humano, tornam-se ferramentas úteis e viáveis.

2.2.2. Propriedades elétricas dos materiais

A intensidade e a distribuição espacial dos campos EM no interior dos tecidos biológicos bem como no ambiente onde a onda EM se propaga são dependentes das propriedades dielétricas dos materiais que os constitui.

A principal característica desses materiais é a capacidade de absorver energia EM e de transformar essa energia em calor (ALMAGUER, 2003, p. 70). A partir da permissividade elétrica (ϵ), da permeabilidade magnética (μ) e da condutividade (σ) é possível estimar, em frequências RF, os níveis de energia EM absorvidos pelos tecidos biológicos.

O parâmetro ϵ , é caracterizado amplamente na forma tensorial devido à anisotropia⁷ dos tecidos humanos, porém para a finalidade deste estudo sua representação na forma complexa, obtido da equação de Ampère, dada pela equação (2.5) é suficiente.

$$\hat{\epsilon} = \epsilon' - j\epsilon'' \text{ [F/m]} \quad (2.5)$$

onde ϵ' é a constante dielétrica responsável pela absorção de energia, e ϵ'' é o fator de perdas (SÁNCHEZ-HERNANDEZ, 2009, p.24).

A permissividade elétrica relativa (ϵ_r) é usada na literatura especializada como uma variável adimensional expressa por

$$\epsilon_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = \epsilon' - j\epsilon'' = \frac{\epsilon'}{\epsilon_0} - j \frac{\sigma}{\omega \epsilon_0} \quad (2.6)$$

O fator de perdas relativo é apresentado como

$$\epsilon_r'' = \frac{\epsilon''}{\epsilon'} = \frac{\sigma}{2\pi f \epsilon_0} \quad (2.7)$$

onde $\tan\delta$ é a tangente de perdas e $\epsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$ F/m é a permissividade do vácuo.

A tangente de perdas em altas frequências é resultado da relação entre o fator de perdas e a constante dielétrica a partir da expressão

⁷É a característica que uma substância ou material possui em que certa propriedade física varia com a direção.

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} \quad (2.8)$$

esta relação quantifica o valor existente entre a corrente de condução e a corrente de deslocamento.

A constante elétrica (σ_a), ou condutividade dispersiva, é dependente da frequência e está associada aos movimentos rotacionais das moléculas dipolares presentes nos tecidos, isso acontece quando as mesmas tentam se orientar segundo o campo elétrico aplicado ou quando este muda de polaridade. Isto significa que σ_a apenas existirá na presença de campos variantes no tempo (ALMAGUER, 2003, p.74).

Além deste, a natureza dispersiva dos tecidos biológicos também responde, de maneira diferente, aos distintos valores de frequência (baixas, médias ou altas) dos sinais aplicados. Portanto, em sua maioria os tecidos apresentam o fenômeno de dispersão dielétrica segundo a equação de relaxação de Deybe:

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + j\omega \tau_e} \quad (2.9)$$

onde:

ε_{∞} - Parte real da permissividade relativa complexa, para $f = \infty$. Também conhecida como constante dielétrica no infinito ou permissividade relativa óptica;

ε_s - Parte real da permissividade relativa complexa, para $f = 0$. Também conhecida como constante dielétrica estática;

ω – frequência angular;

τ_e - Constante de tempo de relaxação elétrica.

A permeabilidade magnética (μ) é o parâmetro análogo à permissividade elétrica, que caracteriza a interação do campo magnético com os materiais. No caso dos meios biológicos, μ é praticamente igual ao valor do espaço livre ($\mu \approx \mu_0$, $\mu_r \approx 1$). Isto indica que os meios são não magnéticos⁸. (ALMAGUER, 2003; FONTGALLAND, 1993).

Assim, os mecanismos de interação dos CEM com os tecidos biológicos podem ser descritos pela distribuição do campo elétrico irradiado sobre o corpo (caracterizado pela permissividade elétrica).

⁸ Segundo Balanis (1989), dizer que um material é não magnético implica afirmar que o efeito da aplicação de um campo magnético nestes materiais pode ser considerado desprezível.

Devido à grande complexidade do corpo humano os órgãos reguladores dos limites de exposição e os centros de pesquisa continuam realizando estudos para caracterizar todos os tipos de tecidos do corpo humano. A *Federal Communication Commission* (FCC, 2009), por exemplo, disponibiliza um banco de dados, utilizado neste trabalho, com várias propriedades dielétricas do tecido humano.

2.3. TAXA DE ABSORÇÃO ESPECÍFICA

A taxa de absorção específica (SAR) é um dos parâmetros adotados mais confiáveis para quantificar os efeitos da REM, sendo utilizada para aplicação das recomendações e normas pelas agências competentes. A determinação da SAR, como parâmetro de investigação sobre os efeitos da exposição deu-se através de vários estudos desenvolvidos pelos órgãos regulamentadores, os quais conduziram a resultados relacionados à variação de temperatura gerada por uma fonte de CEMRF.

Ela é definida como a dissipação de potência por unidade de massa do tecido biológico (SANTOS, 2008). Dessa definição é determinado o procedimento de cálculo a seguir que possibilita equacionar a grandeza SAR:

$$SAR = \frac{dP}{dm} \quad [\text{W/kg}] \quad (2.10)$$

$$P = \frac{dW}{dt} \quad [\text{W}] \quad (2.11)$$

Substituindo (2.11) em (2.10) obtém-se:

$$SAR = \frac{d}{dm} \left[\frac{dW}{dt} \right] = \frac{d}{dt} \left[\frac{dW}{dm} \right] \quad [\text{W/kg}] \quad (2.12)$$

Da definição de densidade, temos que:

$$\rho = \frac{dm}{dV} \quad [\text{kg/m}^3] \quad (2.13)$$

e

$$dW = W_v dV \quad (2.14)$$

De (2.13) e (2.14) obtém-se a expressão mensurável

$$SAR = \frac{d}{dt} \left[\frac{W_v dV}{\rho dV} \right] = \frac{1}{\rho} \frac{dW_v}{dt} = \frac{P_v}{\rho} \quad [\text{W/kg}] \quad (2.15)$$

A variação volumétrica da potência em um determinado meio é dada por:

$$P = \frac{dW_v}{dt} = \sigma |E|^2 \quad [\text{W}] \quad (2.16)$$

Assim, o valor máximo do nível da SAR, para um determinado material em campos distantes, é determinado pela seguinte equação (ICNIRP, 1998; IEEE, 2005):

$$SAR = \frac{|E|^2}{\rho} \quad [\text{W/kg}] \quad (2.17)$$

onde ρ é a densidade em kg/m^3 e σ é a condutividade do tecido em *Siemens* (Ω).

Para se obter um valor médio da SAR utiliza-se uma fonte de excitação senoidal expressa da seguinte forma:

$$E = E_0 \cos(\omega t) \quad [\text{V/m}] \quad (2.18)$$

Logo, a potência volumétrica pode ser expressa por:

$$P = \frac{1}{2} \sigma E^2 \quad [\text{W/m}^3] \quad (2.19)$$

analogamente, tem-se que o valor médio da SAR é:

$$SAR = \frac{1}{2} \sigma |E|_{rms}^2 \quad [\text{W/kg}] \quad (2.20)$$

Observa-se que a SAR é responsável pelos efeitos térmicos, pois seu valor é diretamente proporcional ao aumento local da temperatura,

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{SAR}{C_p} \quad (2.21)$$

em que T é a temperatura em Celsius ($^{\circ}\text{C}$), e C_p é o calor específico do tecido ($\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$) (GASMIELSEED & YUNUS, 2010).

Além da SAR existem outros parâmetros eletromagnéticos que são usados para garantir a conformidade dos níveis de CEM emitidos pelos diversos dispositivos. Estes parâmetros atuam em duas categorias de orientações, são elas: restrições básicas e níveis de referência, o qual a SAR faz parte desta última.

Segundo a ANATEL (BRASIL, 1999) os parâmetros são levados em consideração mediante as diferentes faixas de frequências e as formas de onda dos sinais eletromagnéticos, são eles:

- Densidade de corrente (J), na faixa de frequência até 10 MHz;
- Corrente (I), na faixa de frequência até 110 MHz;
- Taxa de absorção específica (SAR), na faixa de frequências de 100 kHz – 10 GHz;
- Absorção específica (SA), para campos pulsados na faixa de frequência de 300 MHz – 10 GHz;
- Densidade de potência (S), na faixa de frequência de 10 GHz – 300 GHz.

2.4. NORMAS E RECOMENDAÇÕES

Do âmbito da segurança pública e da padronização adequada de dispositivos à radiação não ionizante, várias agências reguladoras ANATEL (BRASIL, 2002), ICNIRP (1998) e IEEE (2005) no Brasil e no mundo desenvolveram guias, normas e recomendações com níveis de referência da exposição EM, as quais os trabalhadores e o público em geral podem ser expostos sem riscos à saúde.

Essas normas descrevem as características físicas, as técnicas de medição e instrumentação, as aplicações de RNI, as análises sobre os efeitos biológicos e uma avaliação dos riscos a saúde devido à exposição à RNI. Sendo estas passíveis de constantes atualizações.

Entre as muitas pesquisas realizadas em cooperação a nível mundial, dois projetos se destacam: o Projeto Campos Eletromagnéticos (*Project EMF*), uma parceria da *World Health*

Organization (WHO) com a ICNIRP, e o Projeto INTERPHONE⁹, uma parceria entre a WHO e a Industrial Agency for Research on Cancer (IARC).

Esses projetos tem por finalidades esclarecer se o CEM emitido pelos aparelhos celulares pode resultar em câncer, de modo a evitar problemas ambíguos e identificar novas possibilidades para a pesquisa. A seguir são apresentados nas Tabelas 1 e 2 os principais níveis de referência das normas vigentes da ICNIRP e do IEEE.

Tabela 1 - Limites de exposição pública da ICNIRP e IEEE de onda plana (SANCHEZ-HERNANDEZ, 2009, p. 208).

| Exposição pública | | | | | | | |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------|
| | ICNIRP 1998 | | | IEEE C 95.1 – 2005 | | | |
| Frequência (MHz) | Campo elétrico E (V/m). | Campo magnético H (A/m) | Densidade de potência S (W/m) | Campo elétrico E (V/m). | Campo magnético H (A/m) | Densidade de potência S (W/m) | Tempo médio (min.) |
| 100 – 400 | 28 | 0,73 | 2 | 27,5 | 0,0729 | 2 | 30 |
| 400 – 2000 | 1,375 | 0,0037 | $f_M/200$ | - | - | $f_M/200$ | 30 |
| 2000 – 3000 | 61 | 0,16 | 10 | - | - | 10 | 30 |
| 3000 – 5000 | 61 | 0,16 | 10 | - | - | 10 | 30 |

Tabela 2 - Limites de exposição ocupacional da ICNIRP e IEEE de onda plana (SANCHEZ-HERNANDEZ, 2009, p. 208).

| Exposição ocupacional (trabalhadores em ambiente controlados) | | | | | | | |
|---|------------------------|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------------|--------------------|
| | ICNIRP 1998 | | | IEEE C 95.1 - 2005 | | | |
| Frequência (MHz) | Campo elétrico E(V/m). | Campo magnético H (A/m) | Densidade de potência S (W/m) | Campo elétrico E (V/m). | Campo magnético H (A/m) | Densidade de potência S (W/m) | Tempo médio (min.) |
| 100 – 400 | 61 | 0,16 | 10 | 61,4 | 0,163 | 10 | 6 |
| 400 - 2000 | 3 | 0,008 | $f_M/40$ | - | - | $f_M/40$ | 6 |
| 2000 - 3000 | 137 | 0,36 | 50 | - | - | $f_M/40$ | 6 |
| 3000 - 5000 | 137 | 0,36 | 50 | - | - | 100 | $19,63/f_G^{0,79}$ |

⁹Estudos epidemiológicos de caso/controlado multicêntricos envolvendo grupos de pesquisa em 13 países coordenados e financiados em parte pela IARC.

O campo elétrico E e o campo magnético H devem ser computados com seus valores RMS, $|E^2|$ e $|H^2|$, onde f_M é a frequência em MHz e f_G é a frequência em GHz.

Nos Estados Unidos e no Canadá são adotadas as diretrizes da *American National Standards Institute* (ANSI), da FCC e do IEEE, o qual apresenta valores semelhantes para os limites da SAR média para o corpo inteiro, porém com níveis mais restritivos para absorção localizada na cabeça.

No Brasil a regularização dos níveis de CEMRF se deu no fim da década de 1990 com a aprovação, pelo conselho diretor da ANATEL, do documento para limitação de exposição, adotando na íntegra os níveis de referência de exposição à CEMRF entre 9 kHz e 300 GHz baseados nas normas da ICNIRP. O limiar inferior de 9 kHz é adotado por se considerar desprezível a absorção de energia produzida por CEM até esta frequência (BRASIL, 1999).

Esse documento dispõe da quantificação dos níveis de referência para a exposição ocupacional e do público em geral, além da definição de métodos de avaliação e de procedimentos a serem observados quando na prestação de serviços de telecomunicações.

Uma vez que os regulamentos apresentados contemplam uma grande faixa do espectro eletromagnético, neste trabalho será considerada a frequência central da faixa ISM de 2,45 GHz, segundo o padrão norte-americano.

A Tabela 3 apresenta os níveis de referência da exposição a campos elétricos, campos magnéticos e densidade de potência da onda plana equivalente (BRASIL, 2002).

Tabela 3 - Limites para exposição da população em geral a CEMRF na faixa de rádio frequências entre 9 kHz e 300 GHz (valores eficazes não perturbados) (BRASIL, 2002).

| Faixa de Rádio frequências | Intensidade de Campo, E (V/m). | Intensidade de Campo, H (A/m). | Densidade de potência da onda plana equivalente, S_{eq} (W/m ²) |
|----------------------------|--------------------------------|--------------------------------|---|
| 9 kHz a 150 kHz | 87 | 5 | - |
| 0,15 MHz a 1 MHz | 87 | 0,73/f | - |
| 1 MHz a 10 MHz | $87/f^{1/2}$ | 0,73/f | - |
| 10 MHz a 400 MHz | 28 | 0,073 | 2 |
| 400 MHz a 2000 MHz | $1,375/f^{1/2}$ | $0,0037/f^{1/2}$ | f/200 |
| 2 GHz a 300 GHz | 61 | 0,16 | 10 |

Os níveis dos parâmetros eletromagnéticos apresentados na Tabela 3 são válidos para um tempo de exposição de 6 minutos. Todos estes valores a partir da faixa 2 GHz a 300 GHz são independentes da frequência do sinal. Onde, f é o valor da frequência RF cuja unidade deve ser a mesma indicada na coluna da faixa de RF.

A exposição ocupacional e a exposição do público em geral são limitadas em dois aspectos: exposição média a RNI e o pico de exposição à RNI. O valor médio da exposição não pode ultrapassar os limites da Tabela 3, sendo que o pico máximo de exposição nunca deve ser maior a 25 vezes o valor calculado na referida tabela (BRASIL, 2002).

Na Fig.4 são apresentados os níveis de campo elétrico à exposição média e os níveis de pico da exposição pública para a frequência de 2,45 GHz. Nesta frequência o valor de CEM para o tempo de 6 min. é 61 V/m, enquanto que para valores inferiores de tempo o valor de CEM é de aproximadamente 2000 V/m.

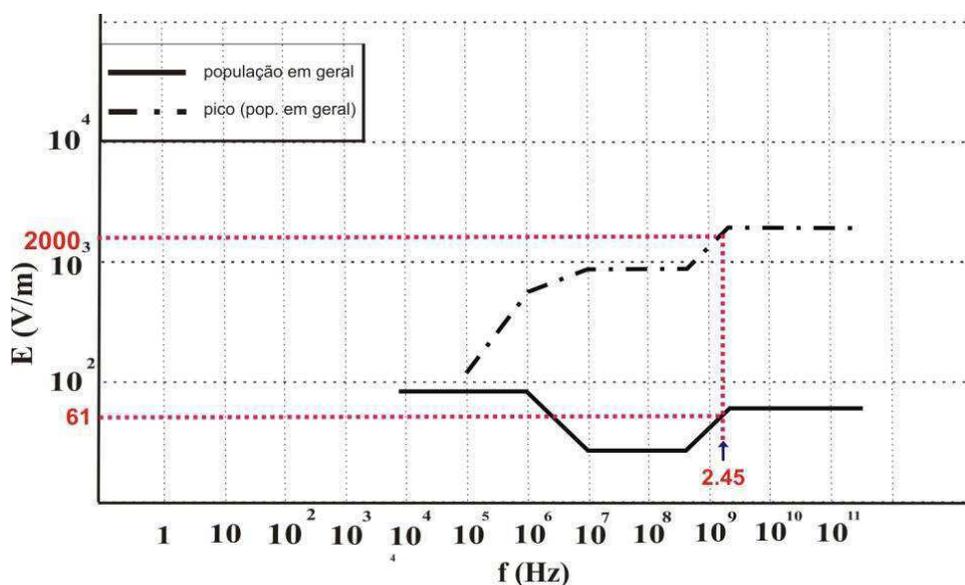


Figura 4 – Limites de exposição para o público em geral a campos elétricos (BRASIL, 2002).

O uso de vários dispositivos nos mais diferentes ambientes é responsável pelo estabelecimento de fenômenos e mecanismos de propagação diferentes dos testes de conformidade realizados para isso. Uma maneira encontrada pelas normas para tais situações é descrever as contribuições dos campos resultantes de múltiplas fontes e múltiplas frequências em um determinado ambiente.

Segundo o que consta no anexo à resolução, capítulo V do Título III, “da verificação do atendimento aos limites”, o qual trata das localidades aonde venha existir mais de uma

fonte CEM, o somatório da relação entre o campo elétrico emitido por cada fonte e o limite máximo de campo, calculado pelos valores da Tabela 3, é realizado através da seguinte equação:

$$\sum_{i=100 \text{ kHz}}^{1 \text{ MHz}} \left[\frac{E_i}{c} \right]^2 + \sum_{i=1 \text{ MHz}}^{300 \text{ GHz}} \left[\frac{E_i}{E_{L,i}} \right]^2 \leq 1 \quad (2.22)$$

em que,

- E_i é o valor da intensidade de campo elétrico na frequência i .
- $E_{L,i}$ é o limite de campo elétrico, de acordo com a Tabela 3.

Realizando uma manipulação algébrica da equação (2.22), obtém-se a seguinte equação:

$$\sum_{i=1 \text{ MHz}}^{300 \text{ GHz}} (E_i)^2 \leq (E_L)^2 \quad (2.23)$$

Da desigualdade acima se pode dizer que o quadrado do somatório dos campos elétricos das fontes individuais no ambiente deve ser menor que o quadrado do limite do campo elétrico existente em cada faixa da Tabela 3.

Portanto, é possível afirmar que o campo irradiado por uma fonte EM em separado não é suficiente para caracterizar os níveis de campo em um usuário em ambientes abertos, mas sim, o campo irradiado por todas as fontes existentes no ambiente. O resultado apresentado na equação (2.23) justifica a necessidade de uma análise da distribuição de campo proveniente de várias fontes, objetivo deste trabalho.

2.5. MÉTODOS DE MEDIÇÃO

Para se demonstrar o atendimento aos limites de exposição das estações de rádio base a ANATEL utiliza, por meio da medição dos campos, métodos descritos a seguir na condição de que sejam devidamente documentados (BRASIL, 1999), são eles:

Método da varredura planar: consiste na realização de medições em pontos definidos sobre planos transversais à posição do corpo na condição que estaria quando exposto a CEMRF;

Método da varredura volumétrica: consiste na realização de medidas uniformes através de um volume no espaço que estaria ocupado pelo indivíduo quando exposto a CEMRF.

Para o caso de determinação por meio de métodos manuais, outra opção é o cálculo da média dos valores discretos espaciais, medidos em pontos distantes de no máximo 0,2 m entre si ou, por equipamentos especiais que possam realizar uma série contínua de medidas para posterior cálculo da média. Além da média espacial deve ser realizada a média temporal em qualquer intervalo de 6 min. para o mesmo fim da avaliação espacial.

2.6. CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os principais conceitos e parâmetros eletromagnéticos utilizados no estudo da exposição EM. São eles: a radiação eletromagnética (REM) e sua distribuição apresentada no espectro eletromagnético, sendo possível definir e discutir características acerca da exposição eletromagnética. Posteriormente foi possível equacionar a taxa de absorção de modo que esta seja o parâmetro adotado para quantificar os efeitos biológicos da radiação eletromagnética.

Foram comentadas também as normas que tratam sobre os níveis de referência em relação aos riscos à saúde pública, dos quais se pode concluir serem insuficientes para analisar a distribuição de campo proveniente de várias fontes EM, seja em um usuário ativo ou passivo no ambiente aberto devido não considerar a existência das multifontes e suas possíveis contribuições para a composição dos CEMs.

Capítulo 3

3. Algoritmos Genéticos

Neste capítulo é apresentada a teoria constitutiva do algoritmo genético (AG), que se mostra uma técnica eficaz e simples diante de problemas no eletromagnetismo. Esta técnica utiliza conceitos provenientes do princípio de evolução para abordar uma série ampla de problemas, em especial de otimização. Robustos, genéricos e facilmente adaptáveis, consistem de uma técnica amplamente estudada e utilizada em diversas áreas.

Por meio de uma introdução consegue-se explicar a inspiração biológica que fundamenta os AGs. Em seguida é descrita a estrutura do AG e o funcionamento de cada operador genético com uma aplicação ao final do capítulo utilizando uma função de difícil solução a partir dos métodos tradicionais.

3.1. UM BREVE HISTÓRICO E SUA INSPIRAÇÃO BIOLÓGICA

A primeira teoria sobre evolução das espécies foi proposta em 1809, pelo naturalista francês Jean Baptiste Pierre Antoine de Monet, conhecido como Lamarck. Para Lamarck as características que um animal adquire durante sua vida podem ser transmitidas hereditariamente, este estudo ficou conhecido pela ciência como a “lei do uso e desuso” (DARWIN, 2004).

A seleção natural é um processo de evolução, geralmente aceito pela comunidade científica como a melhor explicação para a adaptação. O meio ambiente seleciona os seres mais aptos, em geral, só estes conseguem reproduzir-se e os menos adaptados são eliminados ou pelo menos reduzidos em um primeiro momento a uma minoria. Assim, só as diferenças que facilitam a sobrevivência são transmitidas a geração seguinte.

Por volta de 1866 um padre chamado Gregor Mendel compreendeu o processo de transmissão das características hereditárias de ervilhas, estudando as características (cor e textura) associadas aos cruzamentos efetuados inerentes a uma unidade básica de informação, o gene.

No século XX, especificamente durante a década de 50, ocorreram inúmeras tentativas de associar a evolução natural, proposta por Charles Darwin, aos problemas de otimização. Um precursor dessa busca foi Box, que em 1957 apresentou a comunidade científica seu esquema de operações evolucionárias. Goldberg (1990) afirma que este método é análogo ao que se compreende hoje como os operadores de mutação e seleção.

Por outro lado, no início dos anos 60 Bledsoe e Bremmerman começaram a desenvolver a lógica precursora do operador cruzamento. Embora muitos desses trabalhos obtiveram ampla fundamentação teórica e supriam algumas falhas, todos eles apresentavam algo em comum: a otimização prevista era para sanar problemas específicos.

Entretanto, apesar de não ser o primeiro pesquisador da área, coube ao professor John Holland, da Universidade de Michigan, nos Estados Unidos da América, a criação do AG como é conhecida hoje. Em meados da década de 70, o professor Holland, em suas explorações dos processos adaptativos de sistemas naturais e suas possíveis aplicabilidades em projetos de softwares de sistemas artificiais propõe a técnica dos AG, inspirada nas teorias darwinianas, surgindo a publicação “*Adaptation in Natural and Artificial Systems*” (DIAS & BARRETO, 1998).

O AG é o algoritmo mais conhecido de uma família de modelos computacionais inspirados na teoria evolutiva: algoritmos evolutivos surgidos como novas alternativas para resolução de problemas complexos, onde também se encontra a programação evolutiva e a estratégia evolucionária. Todos partilham de uma base conceitual comum, que consiste na simulação da evolução de estruturas individuais.

Além dos princípios da teoria evolutiva e da genética os AGs utilizam a mesma terminologia. São apresentados na Tabela 4 os termos análogos.

Tabela 4 - Terminologia análoga dos algoritmos genéticos e do sistema natural.

| Natureza | Algoritmo Genético |
|-------------------|---|
| Gene | Variáveis de otimização que se apresentam de forma codificada. |
| Cromossomo | Conjunto ordenado de genes que caracteriza um único indivíduo. É uma possível solução para um problema de otimização. |
| População inicial | Conjunto de indivíduos criados aleatoriamente e que servirão de base para o processo de base. |
| Gerações | Populações criadas sucessivamente a partir da população inicial e das gerações anteriores através dos operadores genéticos. |
| Adaptabilidade | Valor calculado a partir das informações contidas no cromossomo; é associado ao indivíduo e mede sua adequação ao problema. |
| Pais | Membros da população atual que foram selecionados para o cruzamento com probabilidades baseadas no valor de aptidão. |
| Filhos | Membros da próxima geração gerados a partir do cruzamento dos pais; |
| Cruzamento | Mistura dos códigos genéticos dos pais. |
| Mutação | Ocorre de forma aleatória, onde escolhe um gene e se altera alguma característica. |

A partir de então, o AG tornou-se uma ferramenta disseminada nas mais diversas áreas, sendo beneficiado pela absorção de ideias destas a partir de problemas interdisciplinares, um exemplo deste fato se encontra em aplicações do eletromagnetismo e microondas.

3.2. ESTRUTURA DOS ALGORITMOS GENÉTICOS

Os AGs trabalham seguindo etapas, que serão detalhadas na próxima seção. Primeiramente, é gerada uma população de cromossomos, que são sequências de códigos, geralmente de forma binária, que representam determinados parâmetros.

Durante o processo evolutivo esta população é avaliada e uma porcentagem será selecionada podendo ainda sofrer modificações em suas características fundamentais através dos operadores genéticos gerando descendentes para a próxima geração. Este processo, chamado de reprodução é repetido até que uma solução satisfatória seja encontrada (Fig. 5) (LACERDA & CARVALHO, 1999).

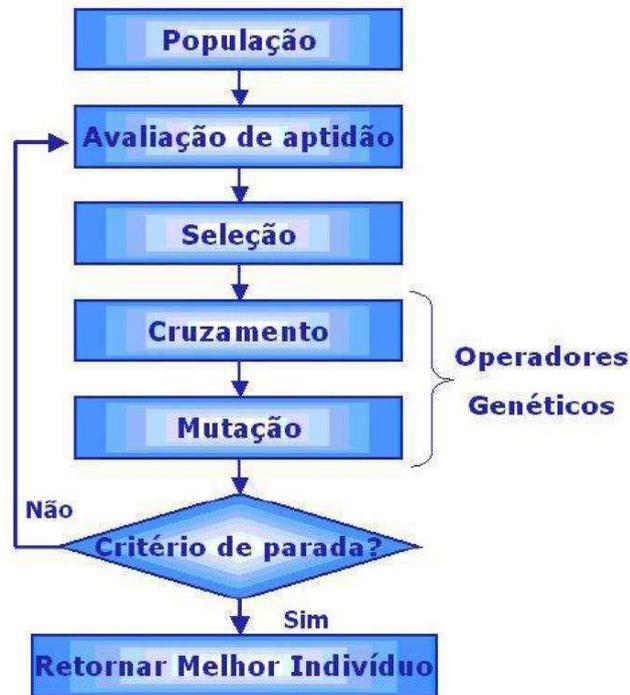


Figura 5 - Fluxograma típico do algoritmo genético.

Para a compreensão do funcionamento de todos os componentes do AG é necessário entender como ocorre a representação dos cromossomos. E daí então, ser possível a descrição da população inicial, da função objetivo e dos operadores genéticos (cruzamento e mutação), como também o critério de parada.

Neste trabalho é utilizado o AG na sua forma mais simples, visando tão somente a obtenção dos parâmetros otimizados das antenas.

3.2.1. Representação dos cromossomos

A maneira como as soluções são representadas é de fundamental importância para o sucesso dos algoritmos genéticos. A forma de representação pode variar de muitas maneiras e basicamente depende da natureza do problema tratado. Existem vários tipos de representações dos cromossomos (real, inteira ou binária) sendo nos AGs a representação binária utilizada tradicionalmente.

Segundo Linden (2008) é importante seguir algumas regras gerais para a adequação da representação do problema, são elas:

- a) A representação deve ser o mais simples possível;
- b) Se houver soluções proibidas ao problema, então elas não devem ter uma representação;
- c) Se o problema impuser condições de algum tipo, estas devem estar implícitas dentro da representação.

Geralmente, cada possível solução (indivíduo ou cromossomo), possui um tamanho fixo. Os cromossomos são compostos de unidades ou elementos, cada elemento equivale a um gene, dispostos em uma sequência linear. Observe o esquema abaixo:

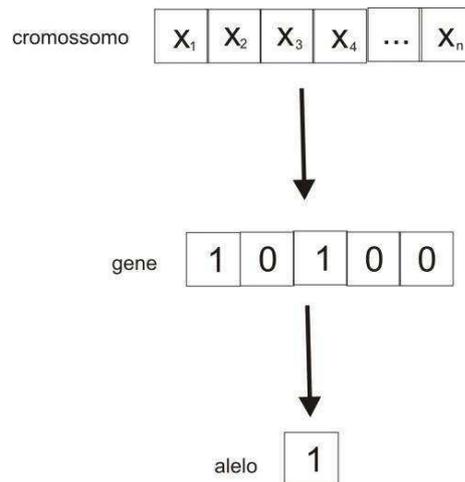


Figura 6 - Representação binária dos cromossomos.

Para realizar a conversão de um cromossomo da representação binária para real é necessário obter o número inteiro r_i correspondente ao número binário e depois fazer a seguinte operação (CORREIA, 2001; LINDEN, 2008; MALAQUIAS, 2006):

$$real = \inf_p + \frac{\sup_i - \inf_p}{2^k - 1} * r_i \quad (3.1)$$

Contudo, utilizando tal representação é importante saber previamente a faixa de operação de cada uma das variáveis e a precisão desejada. Pois o comprimento do gene depende da precisão requerida para o problema.

Para definir a quantidade de bits e a precisão necessária para representar uma variável x_i , dentro de um intervalo $[\inf_p, \sup_i]$ é definido um número k bits, então será possível determinar a precisão máxima dessa variável em função da quantidade de bits dada por

$$\frac{\text{sup}_i - \text{inf}_p}{2^k - 1} \quad (3.2)$$

3.2.2. População inicial

Para iniciar o processo de implementação do algoritmo genético é necessário gerar uma população inicial de cromossomos, que é um conjunto de indivíduos candidatos à solução do problema no formato de um código genético.

A população inicial é gerada de forma aleatória. Um processo simples pode montar as seqüências gerando um símbolo de cada vez com 50% de chance de esse símbolo ser 1 ou 0 (Fig. 7).

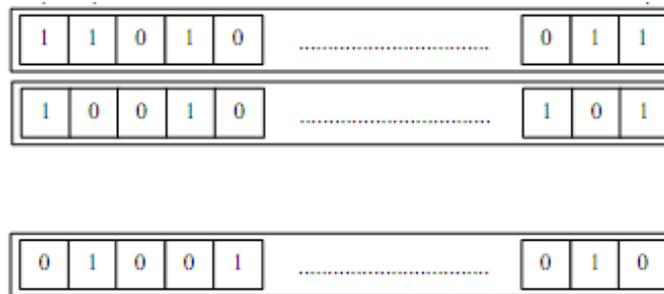


Figura 7 - Representação binária da população inicial.

Para um bom desempenho da aplicação é necessário uma população inicial que contenha diversidade suficiente para permitir que o AG possa combinar características e produzir novas soluções.

O tamanho da população irá depender do problema. Assim quanto maior a população, maior a chance de encontrar a solução para o problema. Porém, maior será o tempo de processamento, ou seja, a escolha do tamanho de uma população irá depender da heurística¹⁰ utilizada pelo usuário. Caso o tamanho da população aumente muito, o processo estará se aproximando de uma busca exaustiva, deixando de ser interessante como técnica alternativa de busca.

¹⁰ São algoritmos polinomiais que não tem garantia nenhuma sobre a qualidade da solução encontrada, mas que usualmente tendem a encontrar a solução ótima ou fica bem próximo dela.

3.2.3. Função objetivo

A função objetivo, também conhecida como função custo, deve refletir as necessidades do problema da forma mais direta possível, possibilitando a técnica de busca otimizada. Sua determinação é dependente da natureza do problema a ser otimizado e pode ser bastante complicada.

A função possui o mecanismo de evolução pelo qual será avaliado cada indivíduo, gerando uma população de acordo com o desempenho deste. O desempenho em última análise representará a chance desse indivíduo participar do processo reprodutivo nas próximas gerações.

A avaliação é independente, mas a quantidade do seu grau de adaptação ao ambiente vai depender dos demais indivíduos da população. Ainda nessa fase, os indivíduos são ordenados conforme a sua adaptabilidade (LOBO, 2005).

3.2.4. Seleção

A seleção simula o mecanismo da seleção natural que atua sobre as espécies, onde o indivíduo com maior aptidão tem maiores chances de sobreviver no ambiente e reproduzir-se passando parte de seu material genético a gerações posteriores.

Existem várias técnicas de seleção uma delas é a roleta, utilizada no algoritmo clássico por Holland (1975). Nesta técnica é atribuída a cada indivíduo uma probabilidade de passar para a próxima geração. Essa probabilidade é proporcional a sua adaptação ao ambiente, em relação à somatória da adaptação de todos os indivíduos.

Assim, se f_i é a avaliação do indivíduo i na população corrente, a probabilidade p_i do indivíduo i ser selecionado é dada a partir da equação (3.3)

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i} \quad (3.3)$$

onde N é o número de indivíduos na população.

O método da roleta (Fig. 8) consiste na atribuição de um valor a cada indivíduo, que é análogo a uma porção da roleta.

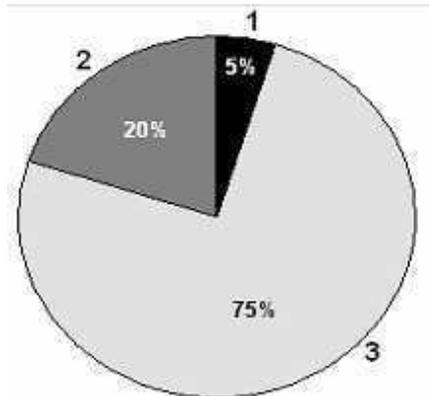


Figura 8 - Seleção utilizando o método da roleta.

Sendo maior a probabilidade dos indivíduos mais adaptados serem sorteados. No entanto, nada impede que seja selecionado o pior, perdendo-se assim talvez o melhor elemento da população, que poderia levar a uma convergência mais rápida.

Além do método da roleta a seleção pode ser realizada pelos seguintes métodos:

- Integral: respeita rigidamente a aptidão relativa.
- Ranking: indivíduos são ordenados de acordo com seu escore de aptidão, e a chance de cada indivíduo tem de ser selecionado é dada pela posição do ranking, não mais pelo valor absoluto da aptidão. Este método pode resultar em convergência acelerada e manter a variância da probabilidade de seleção dos indivíduos de cada população a mesma.
- Torneio: indivíduos selecionados aleatoriamente disputam um torneio, no qual o melhor é selecionado para a reprodução. Este método é mais eficiente computacionalmente que o ranking e também diminui a convergência acelerada para um máximo ou mínimo local.
- Aleatória: são selecionados aleatoriamente N indivíduos da população.

3.2.5. Operador cruzamento

O operador cruzamento é um processo no qual a combinação em partes de cada um de dois cromossomos gera um novo descendente.

A aplicação deste operador consiste na manipulação de material genético existente na população gerando cromossomos filhos dos cromossomos pais, selecionados da população, a partir do operador seleção. Esta decisão é razoável, pois até indivíduos com baixa aptidão podem ter informação genética que contribuam para criação de um indivíduo, possivelmente a melhor solução do problema.

Na sua forma mais simples, o cruzamento pode ocorrer em uma posição aleatória, produzindo duas partes em cada cromossomo pai: uma cabeça e uma cauda. A partir da criação das cabeças e das caudas é realizado o cruzamento. O esquema abaixo ilustra o funcionamento do operador cruzamento em um ponto de corte (Fig.9).

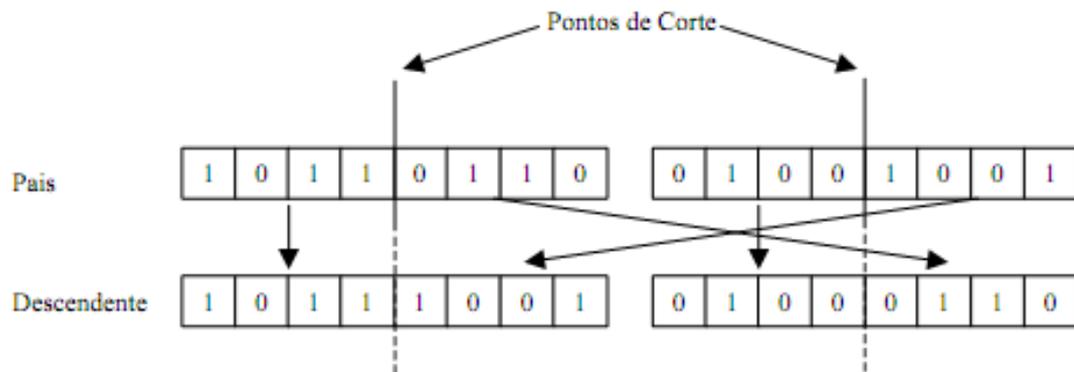


Figura 9 – Operador cruzamento dos cromossomos pais em um ponto de corte.

Além do cruzamento em um ponto de corte existem várias formas de cruzamento, dentre elas destacam-se: cruzamento uniforme, de 2-partições e cruzamento com n-partições. O cruzamento por meio de dois pontos de corte é feita quando um só ponto de corte não consegue preservar a informação genética. O seu uso é ligeiramente mais complexo do que o corte em um só ponto.

O funcionamento do cruzamento uniforme é ilustrado na Fig.10 onde, para cada gene é sorteado um número zero ou um baseado em uma máscara de bits aleatórios. Se o valor sorteado for igual a um, o cromossomo filho 1 herdará o bit do cromossomo pai 1 e o segundo filho herda o gene do segundo pai, contudo se o valor sorteado é zero, as atribuições serão invertidas.

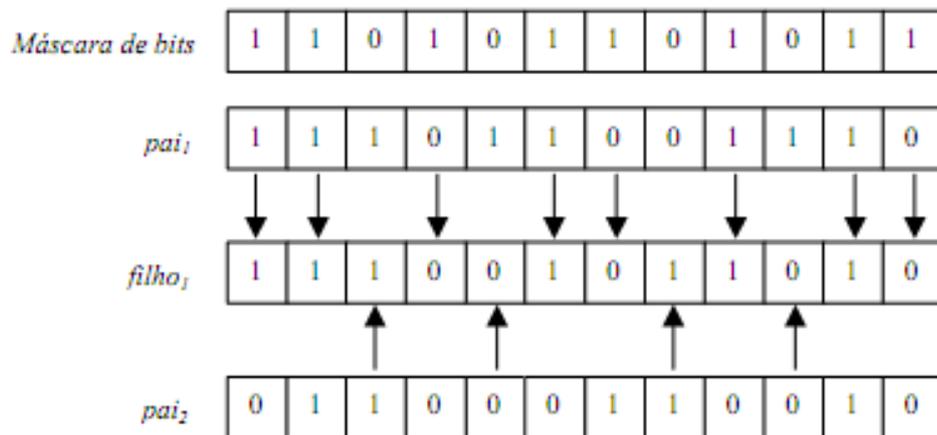


Figura 10 – Operador cruzamento uniforme dos cromossomos.

Uma característica marcante neste cruzamento é a conservação de grandes sequências com a mesma probabilidade que preserva sequências de menor comprimento, desde que ambos tenham a mesma ordem.

Alguns pesquisadores, entre Esheiman, Beasley e Grefenstette investigaram a diferença de desempenho entre vários cruzamentos de n pontos e o cruzamento uniforme, concluíram que o AG é suficientemente robusto de tal modo que, dentro de uma faixa relativamente larga de variação de parâmetros, não ocorre alteração significativa no desempenho entre eles (TORRES, 2003).

3.2.6. Operador mutação

Após o cruzamento entre os cromossomos, tem-se início o processo de mutação, permitindo que indivíduos da nova geração sofram pequenas alterações, permitindo assim uma possibilidade de busca maior no espaço do problema, possuindo o papel de repor ou acrescentar um material genético inexistente na população atual, seja por ter sido perdido ou por nunca ter existido em populações anteriores.

É possível efetuar a mutação de várias formas, por exemplo, o operador mutação pode trocar de posição dois genes escolhidos aleatoriamente, ou simplesmente escolher bits em posições aleatórias e inverter os seus valores, isto é, caso o alelo escolhido seja zero passa a ser um e vice-versa (Fig. 11).

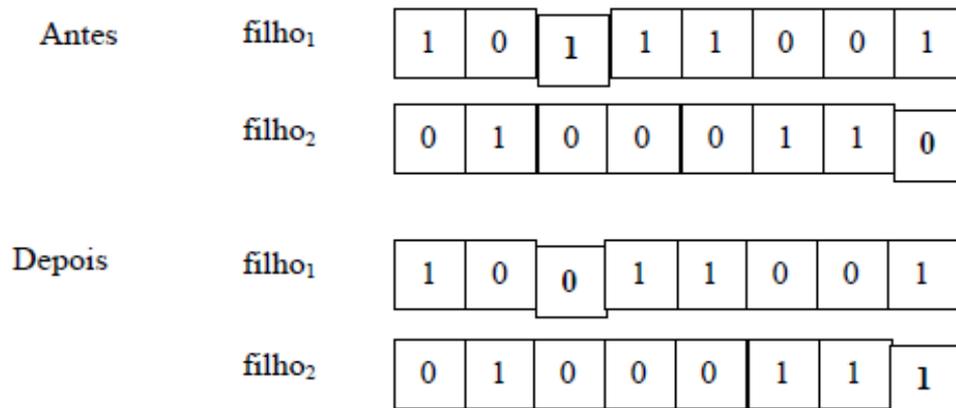


Figura 11 - Operador mutação nos cromossomos filhos.

O processo de mutação é controlado por um parâmetro fixo (taxa de mutação) que é geralmente pequeno, seguindo a inspiração biológica onde esse valor é de no máximo 1%. Contudo, na prática pode-se trabalhar com taxas bem maiores, dependendo do objetivo, topologia da superfície de erro e até mesmo se será ou não empregado o elitismo no processo de busca de uma solução.

É importante destacar que a mutação além de prevenir uma possível perda de informação reduz a probabilidade do AG encontrar um falso ótimo. Nela é possível assegurar que a probabilidade de se chegar a qualquer ponto do espaço de busca nunca será zero (BIELLI *et al.*, 2002; TORRES, 2003).

3.2.7. Critério de parada

A finalização não envolve o uso de nenhum operador genético, ela simplesmente é composta de um teste que dá fim ao processo de evolução caso o AG tenha chegado a algum ponto preestabelecido de parada. Determinar o critério de parada ou convergência em um AG é uma tarefa complexa. Os critérios para a parada podem ser vários, desde o número de gerações já criadas até o grau de convergência da população (por convergência entende-se o grau de proximidade da avaliação de cada indivíduo da população).

Segundo Lacerda e Carvalho (1999) não há critério específico para terminar a busca. Porém, com 95% ou 99% dos cromossomos apresentando o mesmo valor, é possível dizer que o algoritmo convergiu. Esse método é chamado de convergência.

O grau de convergência é característica das populações dos AGs, e diz respeito à diferença entre a média de adaptação da geração atual e suas anteriores. O aumento deste índice indica que o processo de evolução está efetivamente promovendo a melhora da média de adaptação da população, e sua estabilização em torno de um mesmo valor por muitas gerações normalmente indica que população se estaciona em um determinado valor médio de adaptação, caso em que a continuação do processo de evolução se torna improdutiva.

3.3 EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO ALGORITMO GENÉTICO

Para testar o algoritmo genético em sua versão ou modalidade mais simples utilizam-se funções que apresentam uma série de máximos e mínimos espalhados, no qual se deve determinar a melhor solução com o menor custo.

Nesse caso optou-se por avaliar a versatilidade e eficiência dos AGs frente às técnicas tradicionais utilizando a seguinte função:

$$f(x) = x \operatorname{sen}(10\pi x) + 2 \quad (3.4)$$

definida no intervalo fechado $[-1, 2]$ cujo gráfico é apresentado na Fig. 12.

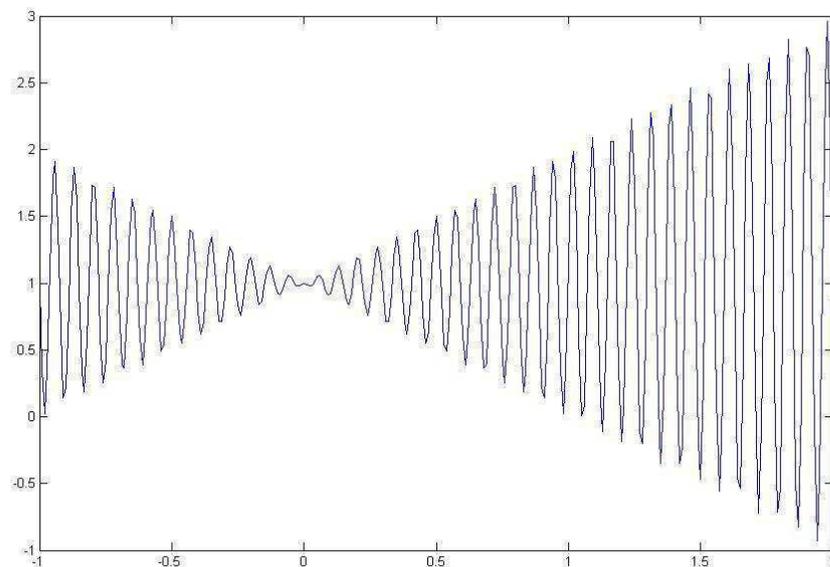


Figura 12 - Gráfico da função $f(x) = x \operatorname{sen}(10\pi x) + 2$.

Este gráfico apresenta uma série de máximos e mínimos locais que dificultam a busca por soluções ótimas baseadas em técnicas que utilizem derivadas. Essas técnicas poderiam encontrar um valor local como sendo uma solução global não conseguindo assim a solução esperada. Para tal caso os AGs apresentam um desempenho satisfatório.

Nesta simulação foram utilizados os seguintes valores dos parâmetros do AG para avaliação do seu desempenho:

- Tamanho da população: 30
- Taxa de mutação: 1%
- Taxa de seleção: 66,67%
- Números de bits para representação da variável x: 22

O ponto de corte para o operador cruzamento foi escolhido de forma aleatória e a equação (3.1) foi utilizada para conversão do número binário em real. Dessa forma o valor da variável x, da função (3.4) no intervalo estabelecido foi de $x = 1,8506$ (Fig. 13).

Valor este que comparado ao valor obtido em Correia (2001), resulta em um erro de $5,4 \times 10^{-6}$, validando assim, a sua aplicabilidade.

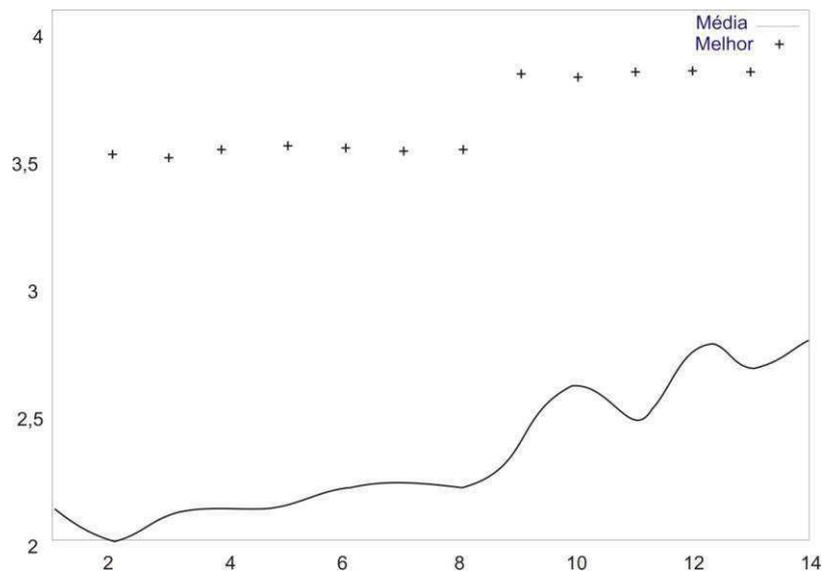


Figura 13 - Evolução do melhor valor e da média da população para a equação (3.4).

3.4. CONCLUSÃO

Nem sempre é possível resolver matematicamente problemas de otimização de uma função, pois ao tentar solucioná-las através de algoritmos específicos, surgem outros

problemas, tais como a não linearidade, entre outros, que podem tornar incompatíveis na programação, o que leva muitas vezes ao insucesso e falta de eficácia.

Os AGs são algoritmos iterativos os quais a cada iteração a população é modificada, usando as melhores características dos elementos da geração anterior e submetendo-as aos operadores para produzir melhores resultados. O AG realiza as seguintes funções:

- Inicializa a população de cromossomos (soluções);
- Avalia cada cromossomo da população;
- Cria novos cromossomos a partir da população atual (aplicam os operadores, mutação e cruzamento, substituindo os ascendentes pelos descendentes);
- Termina, se o critério de fim for alcançado, se não, reinicializa.

Os AGs mesmo em sua configuração mais simples apresentam-se como uma poderosa técnica de busca na utilização de problemas nas mais variadas áreas. Contudo, deve-se ter cuidado na escolha da função custo e a codificação adotada. A escolha da primeira está intimamente ligada com o problema a ser otimizado enquanto o segundo diz respeito à velocidade e a precisão do programa.

Capítulo 4

4. PROCEDIMENTO DE ANÁLISE

Neste capítulo é descrito o procedimento para o cálculo e análise dos níveis de exposição EM no usuário passivo, produzidos por multifontes a partir da modelagem e da simulação computacional.

A extensão desse procedimento é tal, que por conveniência são sintetizados separadamente a escolha do ambiente e as modelagens da cabeça humana e da fonte EM, realizadas no software comercial MWS CST, visto que os mesmos são interligados.

Por fim, é apresentado o uso do AG, desenvolvido em código *Matrix Laboratory* (MATLAB) em ambiente *Windows*, o qual fornece por meio do processo de otimização os valores dos parâmetros ótimos que constitui o arranjo de multifontes.

4.1. FLUXOGRAMA DO PROCEDIMENTO DE ANÁLISE ADOTADO

A delimitação sem critério das metodologias e procedimentos de análise nos estudos acerca de exposição EM ampliam significativamente o escopo das incertezas quando da realização de estudos sobre os níveis absorvidos por seres humanos.

Alguns procedimentos propostos para análise do fenômeno baseiam-se na representação dos níveis de CEM em usuários ativos, muitas vezes, sem considerar a existência de objetos ou até mesmo pessoas nas proximidades (MONEBHURRUN, 2009; ISMAIL 2007, GATI *et al.*, 2009).

O procedimento proposto para análise da exposição EM fundamenta-se na combinação de modelos propostos na bibliografia científica em conjunto com a otimização dos parâmetros eletromagnéticos referentes a cada fonte EM, os quais são obtidos por meio de simulações computacionais.

Para tanto, do ponto de vista prático, de maneira a garantir a confiabilidade dos resultados calculados, as análises podem ser realizadas com a avaliação dos níveis de campo

elétrico obtidos no usuário e sua vizinhança, com o propósito de se obter os níveis máximos nessas duas regiões.

Em relação às análises da exposição EM, deve-se obedecer às seguintes regras, de notável necessidade para a confiabilidade do estudo:

- A representação de todos os resultados calculados deve satisfazer a ressonância das fontes EM na frequência de 2,45 GHz, uma vez que a presença do modelo da cabeça humana ou outra fonte EM pode afetar seu funcionamento;
- Na análise de varredura planar, os níveis de campo elétrico calculados e registrados das fontes EM resultantes na cabeça e sua vizinhança deve ser os níveis máximos para serem comparados aos valores de referência da ICNIRP e do IEEE.

Uma vez consideradas as diretrizes acima apresentadas, realiza-se o seguinte procedimento de análise (Fig. 14):



Figura 14 - Diagrama de fluxo para representar a sequência de estudo.

A Fig.14 apresenta as etapas desenvolvidas para realização dos cálculos dos níveis de exposição EM. O primeiro passo diz respeito à determinação das características elétricas do ambiente, no qual será realizada a investigação. Posteriormente, a fonte EM é determinada mediante a escolha da frequência de operação, potência, tipo e, quando necessário, o tamanho do dispositivo.

Posteriormente, com a determinação das propriedades geométricas, físicas, elétricas e térmicas, é possível adotar o modelo da cabeça humana, a partir das restrições feitas pela escolha da frequência ISM de operação.

Por fim, simulações computacionais para averiguar os níveis de CEM no usuário e ambiente para delimitação da região de estudo, visto que os recursos computacionais são limitados.

4.2. AMBIENTE ANALISADO

A escolha do espaço livre se deve pelo aumento indiscriminado de aparelhos ou equipamentos sem fio nesse ambiente e por não existir restrições quanto a sua quantidade (Fig. 15). Este ambiente, tipicamente urbano, é caracterizado pela permissividade elétrica relativa (ϵ_r) e permeabilidade relativa (μ_r), ambos iguais a um e, a condutividade (σ) nula, o qual foi o mesmo utilizado por Wollinger (2003) e Pessoa (2009) para medição e análises das situações de exposição eletromagnética resultantes da irradiação de energia EM, de antenas em ambientes abertos.

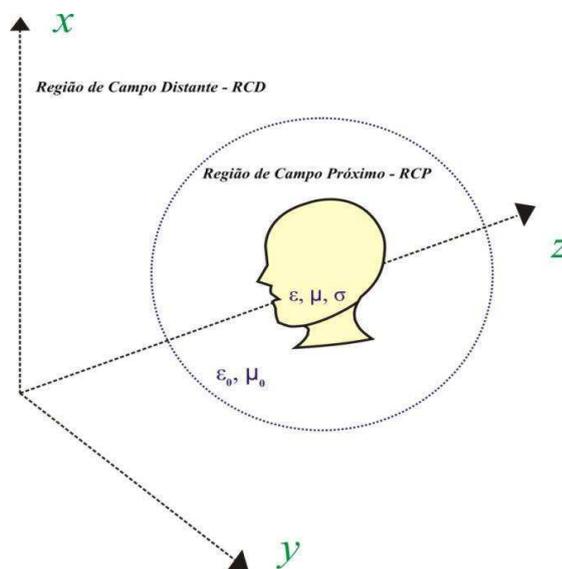


Figura 15 - Domínio de Estudo.

4.3. DESCRIÇÕES DOS MODELOS

O potencial de aplicação da modelagem tende hoje a ser inesgotável. Há sistemas em que uma maior compreensão dessa metodologia tem um valor científico inestimável e, em função de sua complexidade, a única forma de pesquisa (BRASIL, 2006).

Como consequência, o planejamento da modelagem, no âmbito da exposição EM, também se torna indispensável para o equacionamento dos problemas que causam preocupação a saúde pública, os quais por serem diversificados em sua dimensão e alcance, muitas vezes, não apresentam uma solução experimental definitiva.

Contudo, segundo Wollinger (2003), o regulamento da ANATEL não detalha a metodologia ou a instrumentação a ser empregada para o caso de multifontes, referindo-se apenas algumas considerações para validação dos experimentos ou cálculos realizados.

Pelo fato de se procurar identificar uma situação onde a superposição dos campos ocorra de forma construtiva, algumas considerações são necessárias:

- Não há a necessidade, de um modelo mais preciso ou de uma modelagem completa da cabeça;
- É suposto que a fase, polarização e amplitude das multifontes EM estejam adequadamente favorecendo a máxima composição do CEM;
- Considera-se, ainda, que as interfaces homogêneas postas permitam representar os fenômenos de reflexão, espalhamento, transmissão, reflexão frustrada e ressonância que possam ocorrer nas proximidades e no modelo;
- A disposição espacial das fontes será feita adequadamente apenas na RCD.

Os níveis de CEM são irradiados por antenas dipolos de maneira a formar um arranjo espacial nas proximidades da cabeça humana, tendo a mesma como foco ou centro da disposição.

4.3.1. Modelagem da cabeça humana

A diversidade do corpo humano em sua composição física, química e biológica, formada por sistemas complexos e processos dinâmicos (fluxo contínuo do sangue, pressão arterial, etc.) em conjunto com as restrições impostas pelos comitês de ética e órgãos

reguladores de saúde pública, levam ao uso de métodos alternativos em estudos que tenham por objeto de estudo seres humanos.

Dentro dessa perspectiva, o uso do *phantom*¹¹ tem se tornado comum para analisar, com uma maior profundidade, os fenômenos e possibilidades em sistemas de grande porte que venham a representar os seres humanos em trabalhos sobre exposição EM (MONEBHURRUN, 2009).

O modelo considerado para representar a cabeça humana é apresentado na Fig.16, o qual possui um raio médio de 0,09 m, constituído por 4 interfaces, separando 3 camadas de tecido e o interior da estrutura, preenchido pelo tecido do cérebro. As 4 interfaces homogêneas utilizadas no modelo são: pele (1mm), músculo (1mm), osso do crânio (3,5 mm) e o preenchimento do cérebro.

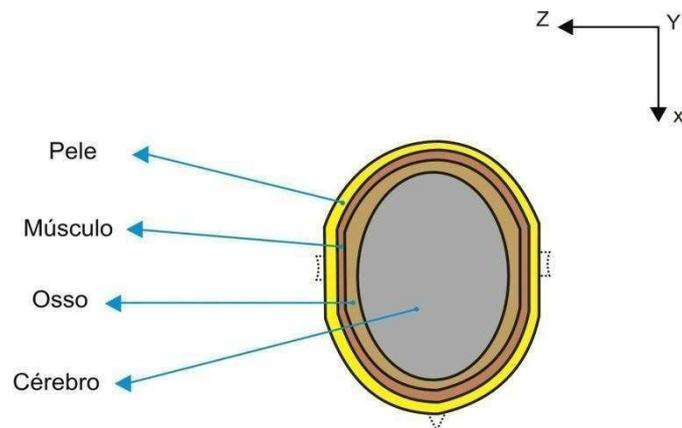


Figura 16 - Vista superior do modelo da cabeça humana.

Baseado nos bons resultados obtidos no estudo dos níveis de SAR na região de campos próximos produzidos por aparelhos celulares em usuários ativos foi escolhido à quantidade de camadas, a geometria da cabeça humana e suas respectivas dimensões a partir dos modelos propostos por Ismail (2007), Gati *et al.* (2009), Alexiou *et al.* (2005), Kamimura *et al.* (1999) e Skaropoulos (1996). Tal escolha se deu por não existir modelos *phantom* para estudos na RCD.

Como também, a escolha das características dielétricas das partes constitutivas do modelo é dependente da frequência de estudo e obtidas de forma *online* no *site* da FCC

¹¹ Em inglês, *Specific Anthropomorphic Mannequin*, manequins usados em simulações computacionais com propriedades dielétricas semelhantes a dos tecidos humanos.

(2009). Na Tabela 5 são apresentados os valores das características elétricas utilizadas no modelo deste trabalho.

Tabela 5 - Propriedades dos tecidos simulados na frequência de 2,45 GHz.

| Tipos de Tecidos | Cabeça Humana | | | |
|------------------|--------------------------------------|------------------------------|---|---------------------------|
| | Permeabilidade Relativa ϵ_R | Condutividade σ (S/m) | Densidade volumétrica ρ (kg/m ³) | Raio das camadas r (mm) |
| Cérebro | 42,53 | 1,51 | 1030 | 84,5 |
| Osso | 14,96 | 0,60 | 1850 | 88 |
| Músculo | 53,57 | 1,81 | 1040 | 89 |
| Pele | 38 | 1,46 | 1000 | 90 |

Os parâmetros descritos na Tabela 5 são equivalentes às propriedades dos tecidos humanos à temperatura de 37 °C, para uso em manequins constituídos de vários tecidos homogêneos. Na faixa de frequências entre 2 GHz e 6 GHz, os valores de condutividade e permissividade relativa são de $\pm 5\%$, podendo ser admitida, em condições específicas, o valor de até $\pm 10\%$. Essas considerações também são válidas para a parte experimental.

Segundo a ANATEL (BRASIL, 2010) deve existir uma parede (“casca”) do manequim-plano construída de material dielétrico de baixa perda e baixa permissividade com tangente de perdas ($\tan \delta$) que não exceda 0,05 e com permissividade relativa (ϵ_r) menor que 5 para frequências abaixo de 3 GHz e de $4,0 \pm 1,0$ para frequências maiores que 3 GHz. A espessura desta parede deve ser de 2,0 mm com uma variação menor que $\pm 0,2$ mm em todas as regiões onde há medições de SAR.

4.3.2. Modelagem das fontes eletromagnéticas

As fontes de CEM modeladas neste trabalho são restritas a operarem na frequência de 2,45 GHz, sendo utilizadas antenas dipolo de meio comprimento de onda ($1/2 \lambda$), do tipo CW¹² propagando-se da fonte.

As antenas são constituídas de material condutor elétrico perfeito (PEC), irradiando a potência de 1 W normalizado, com polarização horizontal. Tal valor é baseado na norma 1528 do IEEE (2005).

¹² Em inglês, continuous wave.

A forma geométrica da antena dipolo, ilustrada na Fig.17, consiste de dois braços metálicos de dimensões totais de 52,24 mm. A fonte discreta encontra-se na fenda situada entre os dois braços da antena com uma excitação de um pulso gaussiano.

Ainda que existam diversos tipos de aparelhos disponíveis no mercado, com vários modelos de antenas (embutidas ou não), foi escolhido um modelo simples da geometria que se atende às especificações descritas a fim de atingir os objetivos aqui propostos.

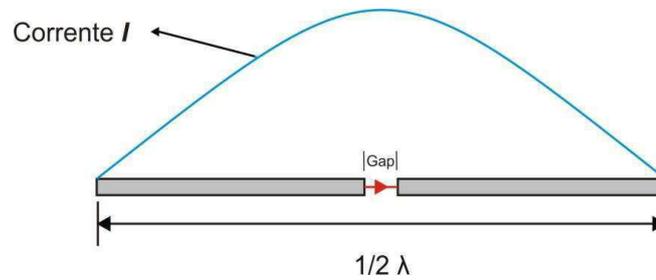


Figura 17 - Antena dipolo.

Nas Figs. 18 e 19 estão representados o coeficiente de reflexão ($|S_{1,1}|$) e o diagrama de irradiação na RCD.

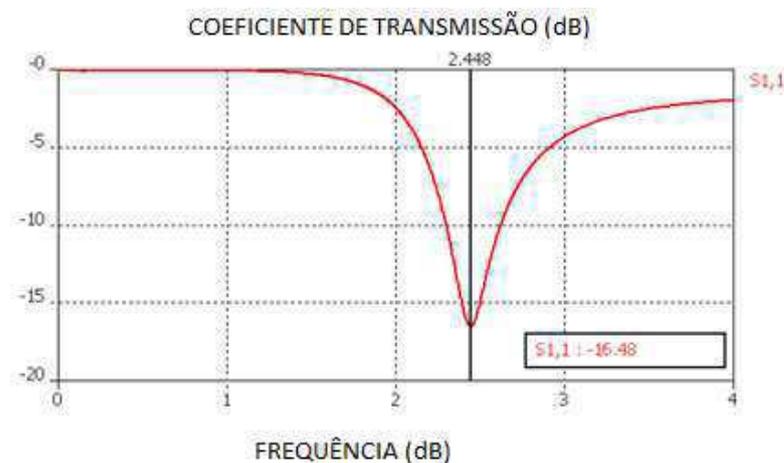


Figura 18 - Coeficiente de reflexão $|S_{1,1}|$ de uma antena dipolo de meia onda.

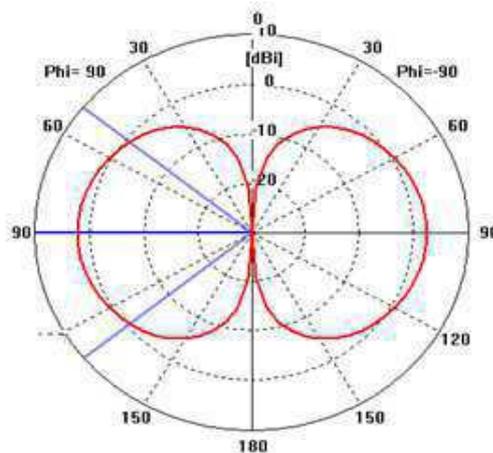


Figura 19 – Vista superior do diagrama de irradiação de uma antena dipolo de meia onda.

Por fim, são apresentados na Tabela 6 os parâmetros relacionados à eficiência total, eficiência de radiação além do ganho produzido pela antena dipolo simulada no espaço livre sem a presença da cabeça humana.

Tabela 6 - Parâmetros relativos à antena dipolo para 2,45 GHz.

| Parâmetros | Frequência (2,45 GHz) |
|-----------------|-----------------------|
| Ganho (dB) | 2,543 |
| Ef. de Radiação | 0,9987 |
| Ef. Total | 0,9762 |

4.4. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Com a escolha do ambiente, a modelagem da cabeça humana e da fonte EM, é possível iniciar as simulações computacionais para o cálculo dos níveis de CEM. Entretanto, é sabido que todo estudo baseado em modelagem e simulação computacional deve possuir uma melhor relação entre o nível de definição, os detalhes dos modelos e o tempo de execução comparado aos recursos requeridos para realização do procedimento computacional.

Essa simulação utilizou o MWS CST como ferramenta de simulação. Tal escolha se deve pelo mesmo possuir uma grande capacidade de trabalhar com modelos computacionais de onda completa e em 3D.

O *software* baseia-se técnica da integral finita (FIT) que permite tratar problemas

contendo superfícies curvas com alta resolução sem pena computacional (CST, 2006). O MWS CST utiliza para simulação o método *Perfect Boundary Approximation* (PBA) e uma extensão do *Thin Sheet Technique* (TST) em todos os domínios (CST, 2009).

As simulações foram realizadas em duas etapas. A primeira etapa diz respeito à realização de simulações no ambiente escolhido com as fontes EM fixas e os parâmetros, distância do modelo da cabeça a fonte, diagrama da radiação e fase do sinal pré-estabelecidas. Objetivando:

1. Limitar a área de estudo;
2. Fornecer boa ressonância as antenas modeladas na presença da cabeça humana;
3. Verificar a eficiência total da antena em função do coeficiente de reflexão calculado;
4. Permitir a identificação dos pontos quentes¹³ em 2D nas várias configurações sugeridas;

Para determinação dos pontos quentes o anexo do regulamento da ANATEL (BRASIL, 1999) sugere, no artigo 37, a descrição de dois métodos, são eles o método de varredura planar e método da varredura volumétrica.

Tais métodos são relacionados ao procedimento experimental para fins de comprovação do atendimento aos limites de exposição, determinando os valores médios do campo na ausência de indivíduo potencialmente exposto. Ambos serão utilizados neste trabalho de maneira a subsidiar os valores calculados.

Na segunda etapa foram determinados em um primeiro momento os parâmetros ótimos por meio do AG, em código *MATLAB*, na região de estudo delimitada, produzindo os níveis máximos de CEM calculados. Que por sua vez objetiva:

1. Limitar a distância entre a fonte EM e a cabeça humana;
2. Limitar a distância entre as fontes EM;
3. Possibilitar a variação de fase das fontes EM.

4.4.1. Etapa 1 - Configuração 1

Nesta primeira configuração utilizou-se uma antena dipolo fixada em $z = 0$

¹³ Região do espaço em que existe concentração de energia EM.

ressonando em 2,45 GHz e irradiando CEM no ambiente onde se encontra um usuário passivo (Fig. 20). Em seguida a posição do usuário é variada em passos discretos de 0,10 m até 1 m de distância, sendo calculados em todos os passos os níveis de CEM.

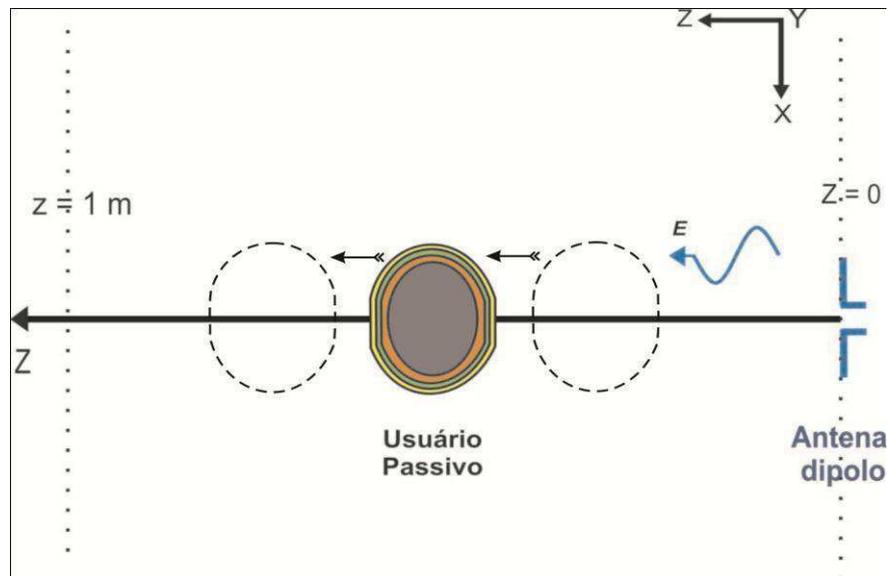


Figura 20 - Representação da exposição EM passiva produzida por uma antena dipolo.

4.4.2. Etapa 1 - Configuração 2

Na segunda configuração outra antena de mesmas características que a primeira foi adicionada, sendo realizada em dois momentos, de modo que as antenas estão dispostas de duas formas. Na primeira (Configuração 2.1) a segunda antena adicionada está fixada em $z = 1\text{m}$ (Fig.21). A variação de posição do usuário passivo seguiu os mesmos passos da configuração 1, contudo até 0,9 m.

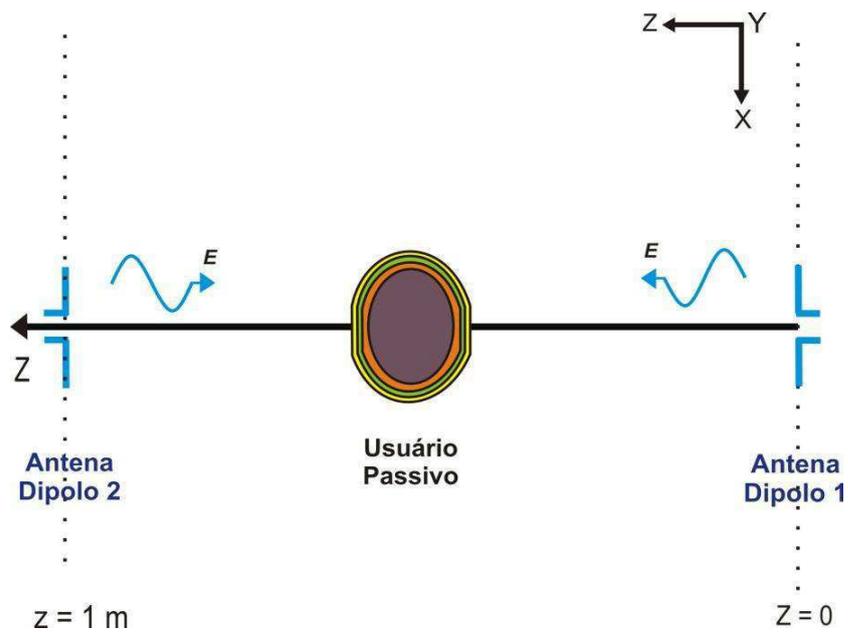


Figura 21 - Representação da exposição EM passiva produzida por duas antenas dipolo (config. 2.1).

No segundo momento (configuração 2.2) as duas antenas são fixadas no eixo x em $z = 0$, distantes 0,30 m entre elas (Fig.24). A variação de posição do usuário passivo seguiu os mesmos passos da primeira configuração.

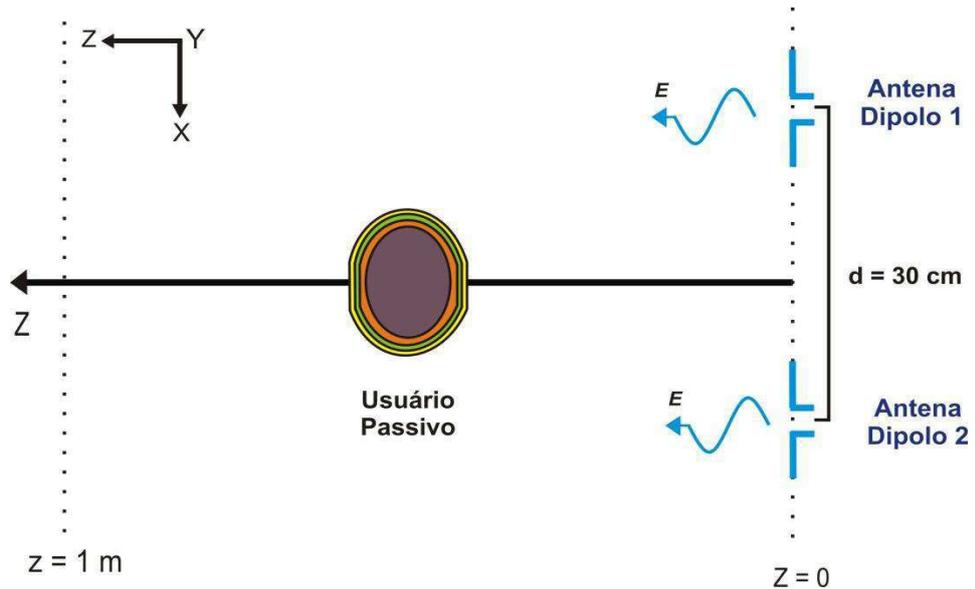


Figura 22 -Representação da exposição EM passiva produzida por duas antenas dipolo (config. 2.2).

4.4.3 Etapa 2: casos otimizados

Nesta segunda etapa utilizou-se antenas dipolo com distância relativa ao modelo da cabeça, diagrama da radiação e fase da antena otimizada a partir do AG. E, portanto sendo

possível o cálculo de CEM no ambiente aberto com a presença de um modelo da cabeça de um usuário passivo.

Esta simulação teve início com uma antena, posteriormente foi adicionada mais uma antena e por fim, fora adicionado uma última antena, totalizando três fontes, não sendo possível aumentar a quantidade de antenas visto que o esforço computacional era demasiado, promovendo penalidades à qualidade dos resultados.

4.5. OTIMIZAÇÃO DOS PARÂMETROS DAS FONTES ELETROMAGNÉTICAS

Após as simulações computacionais de casos pré-determinados foi utilizado o AG com o objetivo de determinar as distâncias entre as fontes de CEMRF e o modelo da cabeça humana, além dos ângulos do diagrama da irradiação e incidência. Tendo conhecimento dos valores das componentes do raio e do ângulo de incidência é possível obter os valores das fases (Fig. 23).

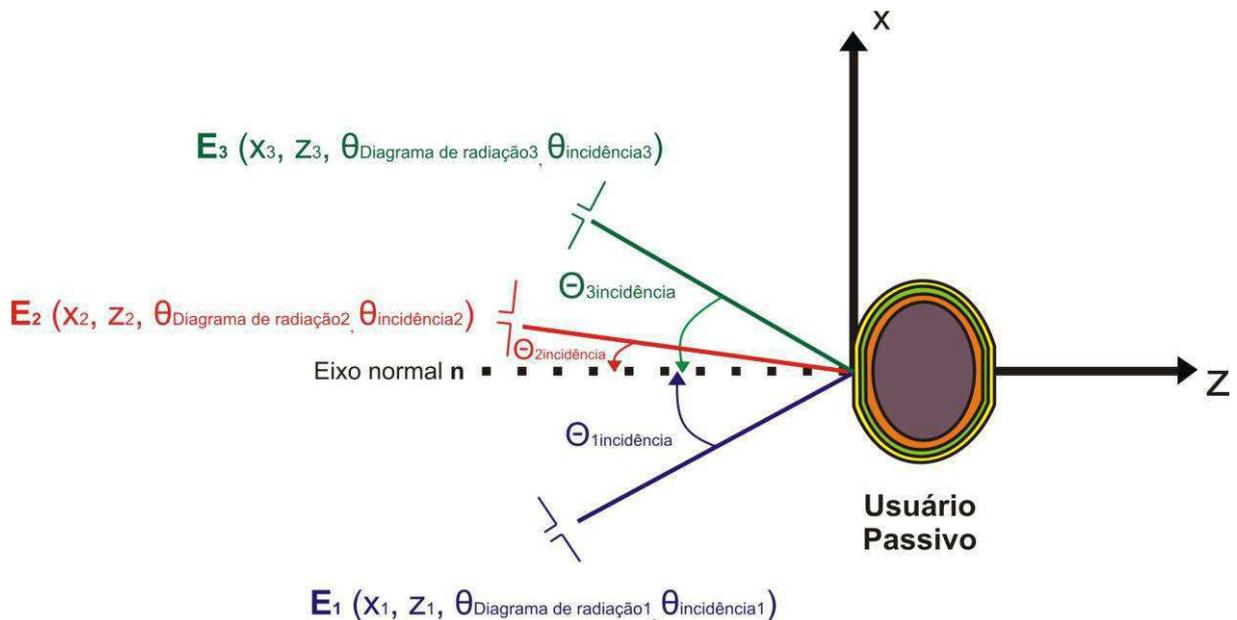


Figura 23 – Exposição EM passiva à multifontes.

Para implementação do AG foi definido a função de aptidão em conjunto com as variáveis a serem otimizadas, logo após seguiram-se as etapas restantes para o ajuste do AG ao problema em questão:

- Codificação dos indivíduos e definição da população inicial;
- Técnica de seleção;

- Técnica do operador cruzamento;
- Técnica do operador mutação;
- Critério de parada.

4.5.1. Definição do tamanho da população inicial e da cadeia de cromossomos

O processo de otimização tem início com a criação da população inicial de cromossomos, onde o conjunto de soluções candidatas são as possíveis distâncias, diagrama da radiação e fases a serem adotados.

Na literatura consultada sobre AG não foram encontrados critérios para estabelecer o tamanho da população e dos cromossomos. Logo, tal escolha se dá por meio de testes prévios com tamanhos variados, para que se possa concluir quais valores devem ser utilizados sem penalizar o esforço computacional e a qualidade dos resultados a serem otimizados (TORRES, 2008).

Assim, neste trabalho foi utilizada uma população inicial composta de 100 cromossomos, representados por cadeias compostas de 4 variáveis os quais cada variável tem 10 bits, no caso de uma fonte. A igualdade abaixo ilustra um dos elementos gerados de forma aleatória.

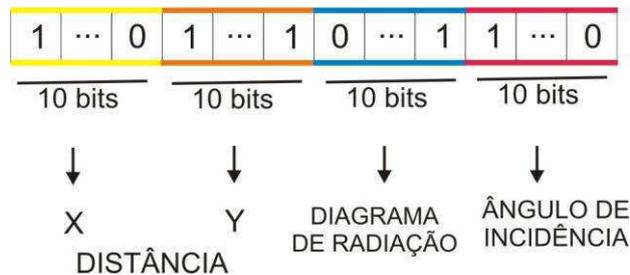


Figura 24 - Representação dos cromossomos utilizados na população inicial.

4.5.2 Função objetivo

A função objetivo foi encontrada através da dedução analítica da soma vetorial dos campos elétricos de antenas dipolos, por meio de suas expressões na RCD, na busca do melhor valor máximo para os níveis calculados.

Todas as análises desenvolvidas consideram como objeto de otimização um arranjo espacial de antenas dipolo de meia onda, dispostos no plano. A função objetivo da fonte de

campo elétrico incidente é apresentada na equação (4.1), nesse trabalho considera apenas a polarização paralela, podendo sendo escrita da seguinte forma (SADIKU, 2003; ULABY, 2007, p. 320):

$$E^i = (\hat{a}_x \cos\theta_i - \hat{a}_y \sin\theta_i) E_0 e^{-j\beta (x \sin\theta_i + z \cos\theta_i)} \quad (4.1)$$

onde E_0 é a expressão do campo elétrico da antena dipolo em RCD, dado por (KRAUS & MARHEFKA, 2002)

$$E_0 = j \frac{60\pi I_0 \cos^2(\theta) l}{r\lambda} \quad (4.2)$$

Substituindo (4.2) em (4.1) temos a função objetivo:

$$E_T = (\hat{a}_x \cos\theta_i - \hat{a}_y \sin\theta_i) j \frac{60\pi I_0 \cos^2(\theta) l}{r\lambda} e^{-j\beta (x \sin\theta_i + z \cos\theta_i)} \quad (4.3)$$

Através da soma vetorial pode-se obter a expressão de otimização para mais de uma fonte EM dependendo apenas da quantidade de elementos que irão compor o arranjo.

4.5.3. Seleção

A cada cromossomo gerado na população inicial deve-se atribuir uma nota que indicará o valor de sua aptidão. A probabilidade de seleção com p_i , de um cromossomo com aptidão f_i é dada pela equação apresentada no capítulo 3, equação 3.3.

Para determinar o valor da aptidão, deve-se calcular primeiro o valor da função objetivo referente a cada cromossomo e ordenar os valores obtidos de forma decrescente. Em seguida, constrói-se uma coluna de aptidão escalonando os valores da função objetivo no intervalo de 0 a 2, de forma que ao maior valor seja atribuída aptidão igual a 2 e ao menor valor, aptidão igual a 0. As demais aptidões são obtidas interpolando estes dois extremos por uma reta, ou seja, $f_i = 2(M - i) / (M - 1)$, sendo M o tamanho da população.

Uma vez determinado o valor da aptidão de cada cromossomo, determina-se uma coluna de aptidão acumulada para iniciar o procedimento de seleção. Gera-se um número aleatório r (tirado de uma distribuição uniforme), no intervalo $[0, \mathbf{SOMATOTAL}]$, onde $\mathbf{SOMATOTAL}$ é a soma de todas as aptidões. Por fim, o cromossomo selecionado é o

primeiro (seguindo a tabela de cima para baixo) que possui a aptidão acumulada maior que r e sua cópia será alocada na população intermediária.

Os mesmos passos são repetidos até preencher a população intermediária com N cromossomos. Este procedimento é conhecido como o algoritmo roda da roleta, apresentado no capítulo 3.

4.5.4. Cruzamento e mutação

No desenvolvimento deste algoritmo adotaram-se para taxa de cruzamento e mutação os valores de 66,67% e 1%, respectivamente. E, para critério de ponto de corte o cruzamento em um ponto, onde este ponto é escolhido aleatoriamente.

4.5.5. Critério de parada

O critério de parada utilizado neste trabalho foi à convergência do AG. Assim, quando 98% da população apresentar valores no intervalo $[x_{\min}, x_{\max}, z_{\min}, z_{\max}]$ e $[\theta_{D.Rinicial}, \theta_{D.Rfinal}, \theta_{inicial}, \theta_{final}]$ até o limite de 100 gerações, o procedimento é finalizado. Estes intervalos serão obtidas mediante as primeiras simulações com o MWS CST.

4.6. CONCLUSÃO

Neste capítulo foi apresentada a descrição da escolha do ambiente, das modelagens da cabeça humana e da fonte EM, como também da simulação em ambiente MWS CST e do uso do AG em ambiente MATLAB.

Foram realizadas três simulações no MWS CST com distâncias e fases pré-determinadas das fontes EM, a qual tem por objetivo delimitar a região de estudo, definir a posição dos pontos quentes. Posteriormente, utilizou-se o *MATLAB*, de modo a encontrar os valores ótimos dos parâmetros, utilizando o AG.

Finalmente, munido destes valores, foi realizado a última configuração de simulação de modo a verificar os níveis de CEM na região de estudo, com os parâmetros das fontes otimizados.

Capítulo 5

5. RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas simulações computacionais realizadas em duas etapas, onde a primeira se subdivide em duas configurações distintas. Em seguida, são mostrados os resultados provenientes da simulação computacional realizada com os parâmetros otimizados das multifontes EM, nas proximidades do usuário passivo, para análise e caracterização dos níveis de CEM. Posteriormente, estes níveis calculados foram comparados aos níveis de referência da ANATEL possibilitando assim sua análise. Ao final deste capítulo é apresentada algumas conclusões referentes a exposição passiva eletromagnética.

5.1. CÁLCULO DOS NÍVEIS DE CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS PRODUZIDOS PELAS FONTES ELETROMAGNÉTICAS

O cálculo dos níveis de CEMs produzidos pelas multifontes realizado na frequência de 2,45 GHz são apresentados em duas etapas. Na primeira etapa (E1) os parâmetros, distância do usuário a fonte, os ângulos do diagrama de irradiação e de incidência, são pré-determinados, com o objetivo de delimitar a região de estudo e averiguar os valores dos pontos quentes.

Por sua vez, essa primeira etapa foi dividida em duas configurações (C1 e C2), onde na primeira foi realizada a simulação com uma antena (E1C1) e na segunda com duas antenas (E1C2), os quais foram dispostas de duas maneiras (Fig.21 e 22).

Na segunda etapa (E2) os parâmetros foram otimizados utilizando o AG, de modo que foi possível calcular o nível de CEM no pior caso, sendo realizadas em três configurações, com uma (E2C1), duas (E2C2) e três antenas (E2C3) em cada uma delas.

5.2. RESULTADOS DA PRIMEIRA ETAPA

Na Fig. 25 são apresentados os valores do coeficiente de reflexão $S_{1,1}$ e $S_{2,2}$, nas duas configurações, no eixo-y encontram-se os valores em dB e no eixo x a faixa de distância em escala linear de 0,3 a 1,0 m. A escolha de 0,3 m se deu por manter-se a pelo menos 2,5 da fonte EM.

A partir do gráfico foi possível observar um decréscimo do valor $S_{1,1}$ em todas as simulações em relação à curva obtida na Fig. 25. Isso indica que, a presença humana, modelo multicamadas, provoca uma diminuição da eficiência antena, contudo, sem comprometer o seu bom funcionamento.

Na configuração 2, com a presença de duas fontes EM, verifica-se mais um decréscimo de $S_{1,1}$ em relação à configuração 1 chegando ao valor de -10,53 dB em 0,7 m. Percebe-se que na configuração 2.2 onde as duas fontes estão irradiando em uma mesma direção promove um aumento nos valores de $S_{1,1}$ e $S_{2,2}$ em relação às configurações anteriores, e mais, esses valores são idênticos.

Este fator pode promover uma situação incomum que a anterior, visto o desempenho das antenas melhorar nessa disposição.

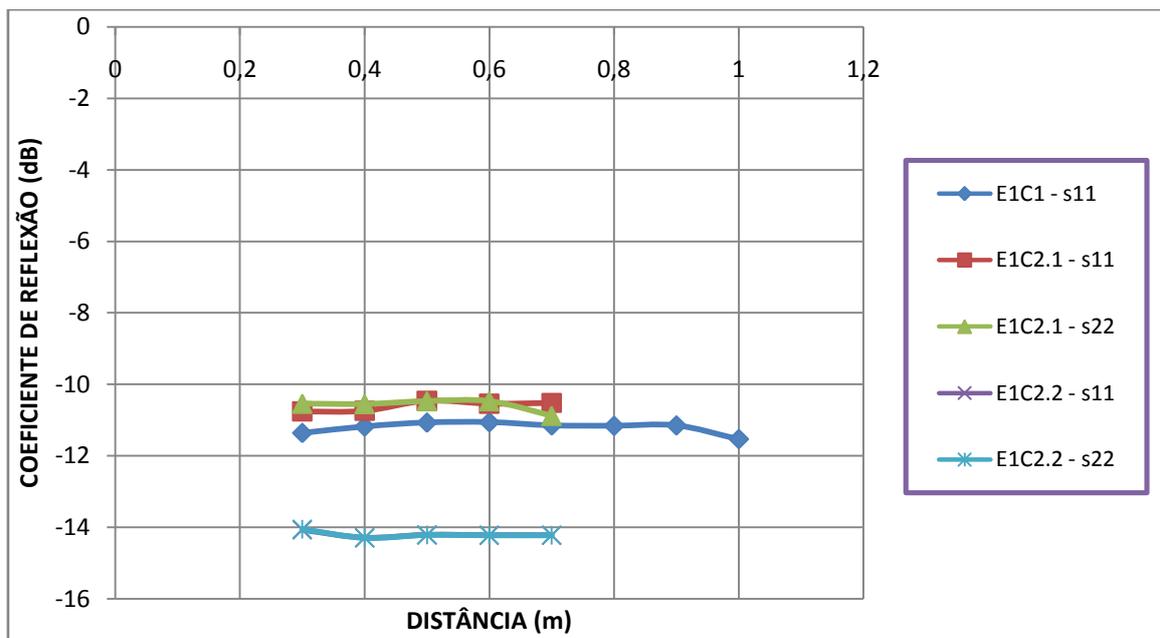


Figura 25 - Coeficiente de reflexão da fonte EM na presença do usuário passivo, para as configurações 1, 2.1 e 2.2.

Quanto aos digramas de radiação correspondentes a cada uma das situações estudadas, podemos observar na Tabela 7. Tal como no coeficiente de reflexão, a presença do modelo da cabeça humana na vizinhança da fonte EM altera significativamente também o digrama de radiação. Nota-se neste caso que a tal presença promove um bloqueio da energia EM na vizinhança da fonte produzindo uma composição dos sinais incidentes e refletidas de tal forma que o resultado final seja um aumento do ganho.

Tabela 7 - Ganho em função da distância para as configurações 1, 2.1 e 2.2.

| Ganho (dBi) | | | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|-------------------------|
| Distância (m) | Configuração 1 | Configuração 2.1 | Configuração 2.2 |
| 0,3 | 3,94 | 5,59 | 6,22 |
| 0,4 | 3,54 | 5,35 | 5,84 |
| 0,5 | 2,89 | 5,31 | 6,15 |
| 0,6 | 3,07 | 5,50 | 6,26 |
| 0,7 | 3,30 | 5,49 | 6,12 |
| 0,8 | 3,10 | ----- | ----- |
| 0,9 | 2,78 | ----- | ----- |
| 1,0 | 2,60 | ----- | ----- |

Nota-se entretanto que no caso da presença de duas fontes o valor do ganho apresentou um aumento considerável em relação a configuração 1. Isto continuou ocorrendo na configuração 2.2, porém com menor expressão. Assim, percebe-se que a medida em que se aumenta a quantidade de fontes EM no ambiente o ganho sofre alteração no seu valor, esse fato também está relacionado a disposição das fontes no ambiente.

5.2.1 Etapa 1 - Configuração 1

Nessa configuração foi possível observar que a penetração da energia EM ocorreu em todas as camadas apesar destes níveis apresentarem valores baixos de campos elétricos. Sendo maior valor calculado cerca de 5,25 V/m na camada do cérebro da Fig. 26 (a).

Em todos os resultados calculados foi utilizado o método da verredura planar.

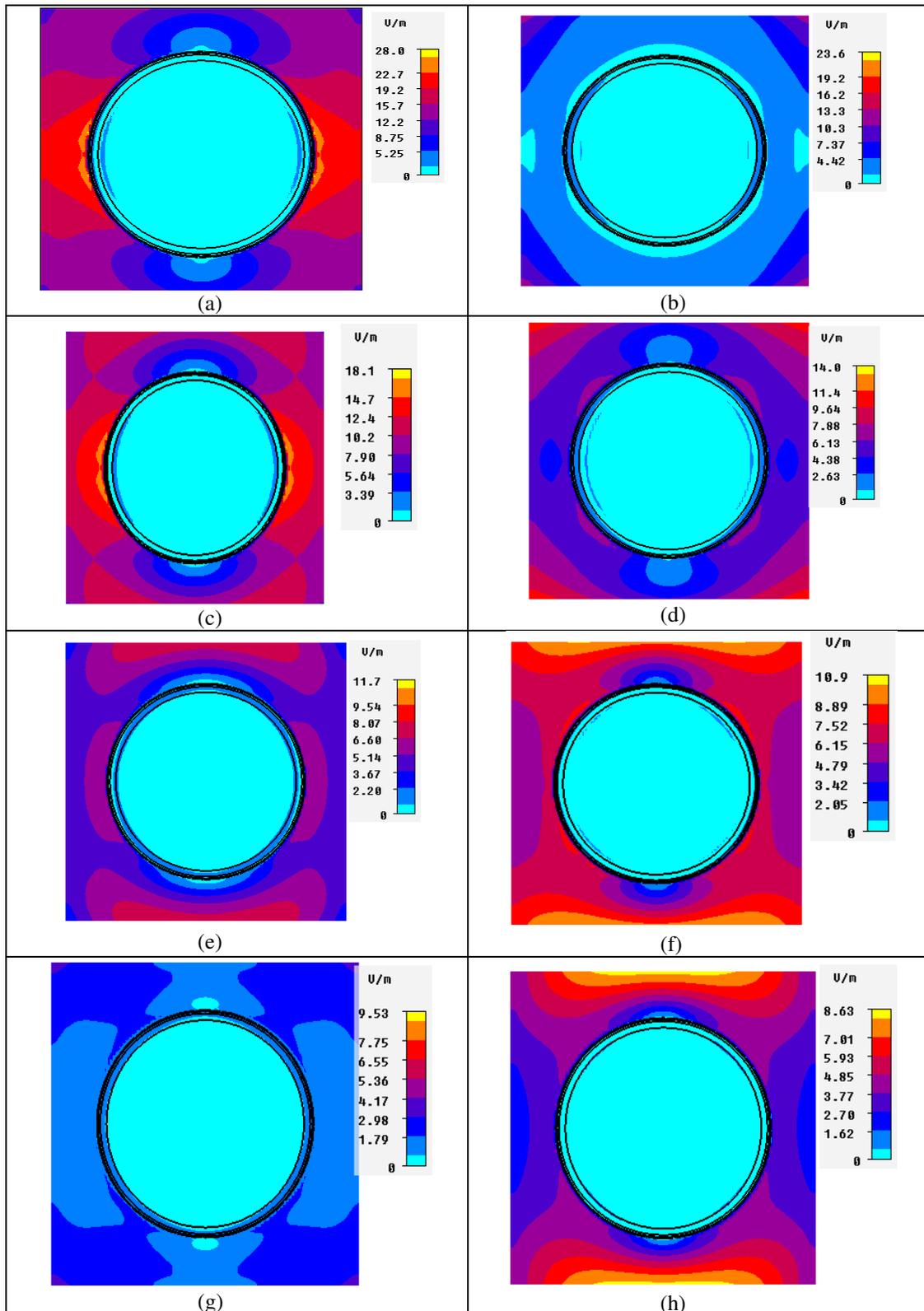


Figura 26 - Distribuição do campos elétrico no plano XY no usuário passivo na presença de uma fonte EM, plano transversal com o modelo da cabeça à (a) 0,3 m da fonte EM. (b) 0,4 m da fonte EM. (c) 0,5 m da fonte EM. (d) 0,6 m da fonte EM. (e) 0,7 m da fonte EM. (f) 0,8 m da fonte EM (g) 0,9 m da fonte EM (h) 1 m da fonte EM.

5.2.2 Etapa 1 - Configuração 2

As realizações das simulações ocorreram até 0,7 m devido ao esforço computacional e tempo gasto na obtenção dos resultados terem um aumento com um acréscimo significativo, com o acréscimo de outra fonte EM de mesmas características. Assim, para não afetar a qualidade dos resultados calculados nas simulações o valor de 0,7 m é escolhido como o limiar superior da distância.

5.2.2.1 Etapa 1 - Configuração 2.1

Verifica-se nessa configuração a característica peculiar de duas fontes EM de mesmas características apresentarem performances distintas nos níveis máximos calculados de distribuição do campo elétrico. Tal fato é constatado pela diferença existente entre os valores de $S_{1,1}$ e $S_{2,2}$ e pela presença humana que certa forma promove tais alterações.

Na Fig. 27 são apresentados os níveis de campo elétrico que superpõem no usuário passivo. Interessante observar que nas distâncias próximas as fontes não ocorreram absorção de energia EM até o cérebro (Fig. 27 (a), (c) e (e)), caracterizando a necessidade de otimização das distancias para obter o pior caso.

Todavia nas Fig.s 27 (b) e (c), respectivamente, são registrados os níveis máximos de campo elétrico no interior da cabeça humana e sua vizinhança, cerca de 4,49 V/m e 31,9 V/m.

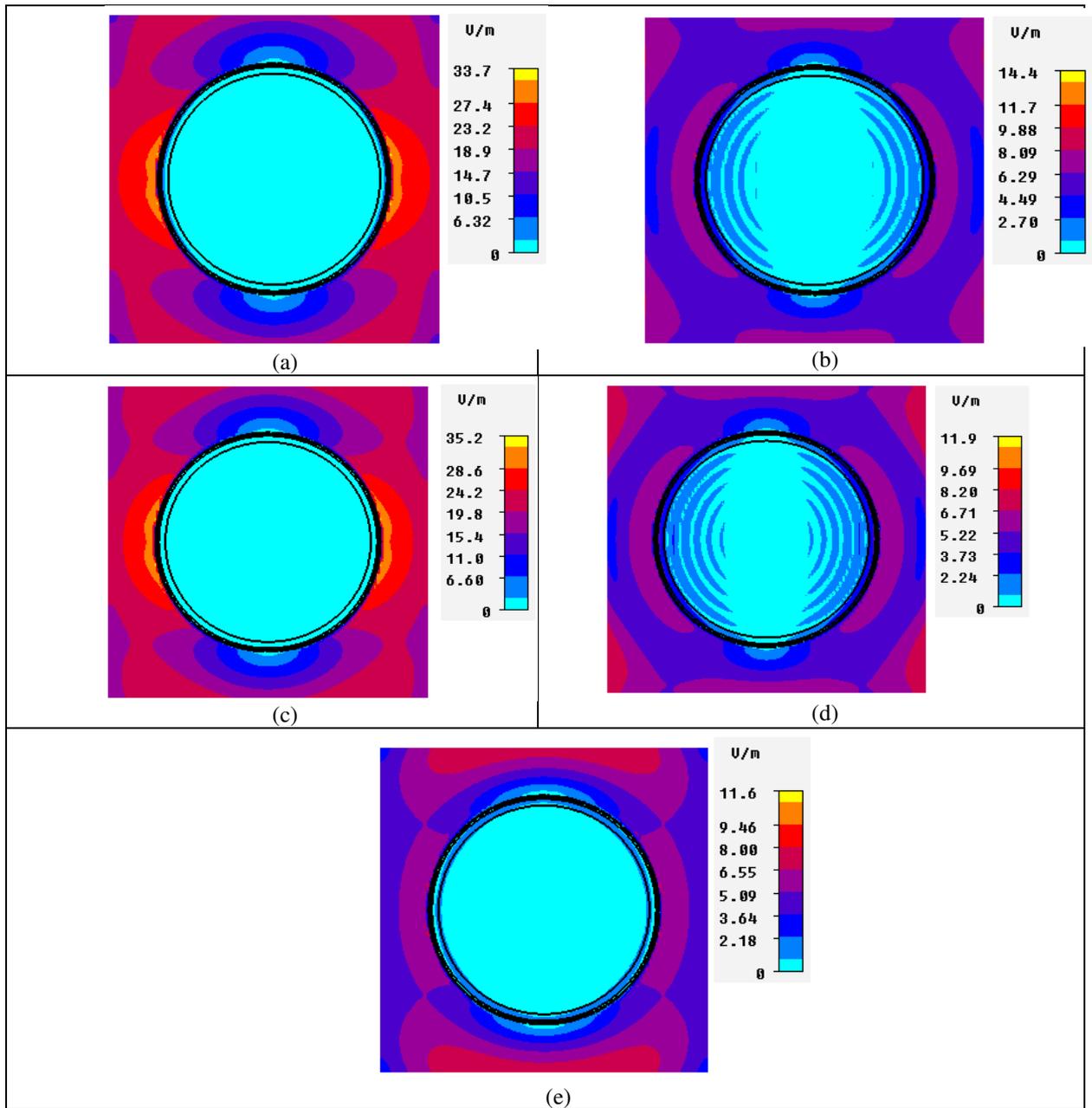


Figura 27 - Distribuição do campo elétrico no plano XY no usuário passivo na presença de duas fontes (Configuração 2.1) EM, plano transversal com o modelo da cabeça à (a) 0,3 m da fonte EM. (b) 0,4 m da fonte EM. (c) 0,5 m da fonte EM (d) 0,6 m da fonte EM. (e) 0,7 m da fonte EM.

5.2.2.2 Etapa 1 - Configuração 2.2

Verifica-se nesta disposição que a presença da cabeça humana atingem valores significativos de campo elétrico, o maior valor calculado é cerca de 7,00 V/m na camada do

cérebro da Fig. 28 (a). Percebe-se também a simetria da distribuição dos campos resultado da disposição das fontes. Contudo, verifica-se que para distâncias superiores a 0,6 m ocorre um mau desempenho das simulações prejudicando a avaliação dos resultados.

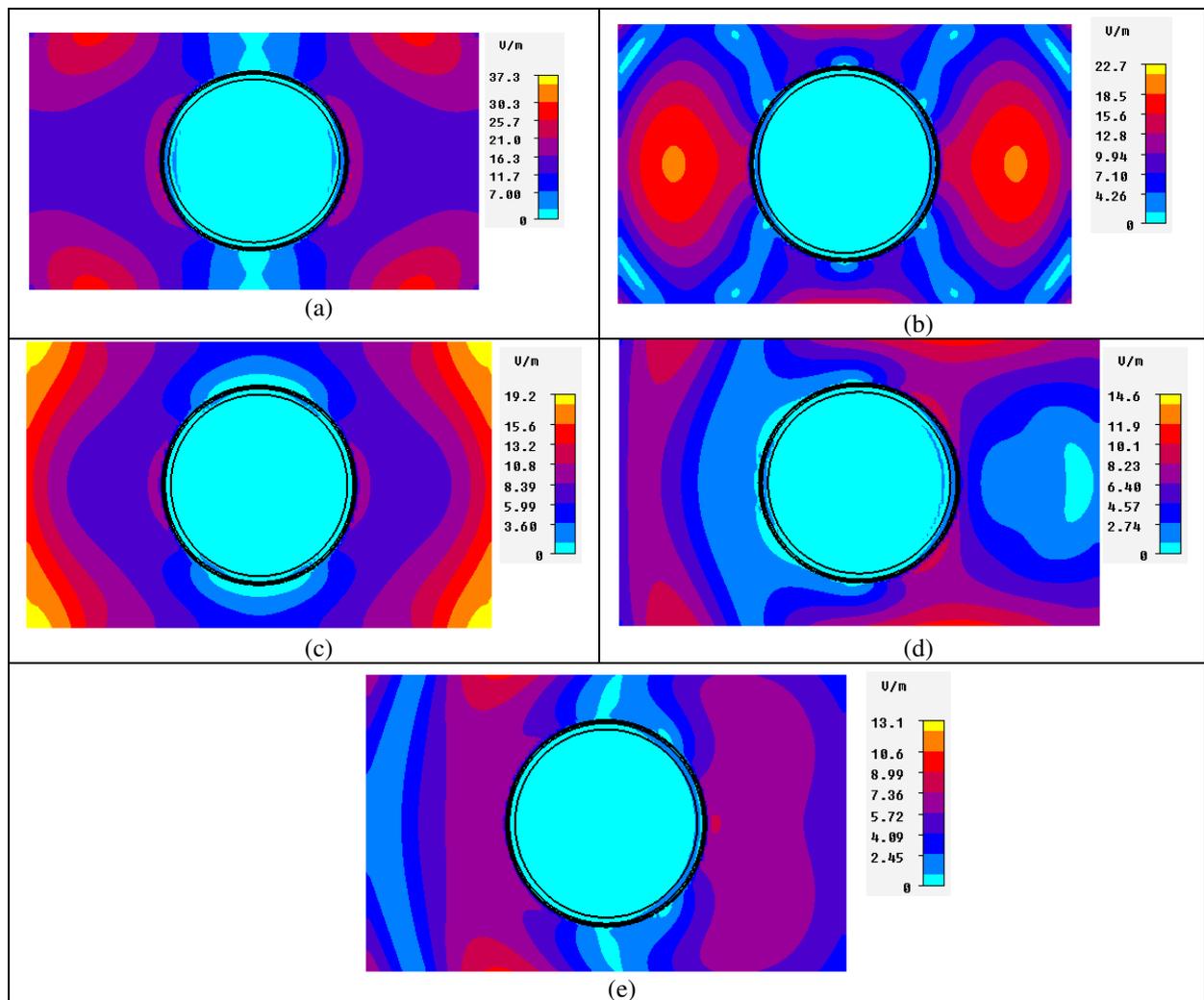


Figura 28 - Distribuição do campo elétrico no plano XY no usuário passivo na presença de duas fontes EM (Configuração 2.1), plano transversal com o modelo da cabeça à (a) 0,3 m da fonte EM. (b) 0,4 m da fonte EM. (c) 0,5 m da fonte EM (d) 0,6 m da fonte EM. (e) 0,7 m da fonte EM.

Nesta configuração é apresentado a vista lateral da distribuição do campo elétrico desde as duas fontes EM em toda a região existente. Destaca-se função de bloqueio que a cabeça tem na propagação do campo elétrico.

Tal função promove concentrações de campo na vizinhança que dependendo da posição em que a cabeça esteja os níveis são resultado do campo incidente com a parcela que é refletida (Fig. 29 (b) e (d)).

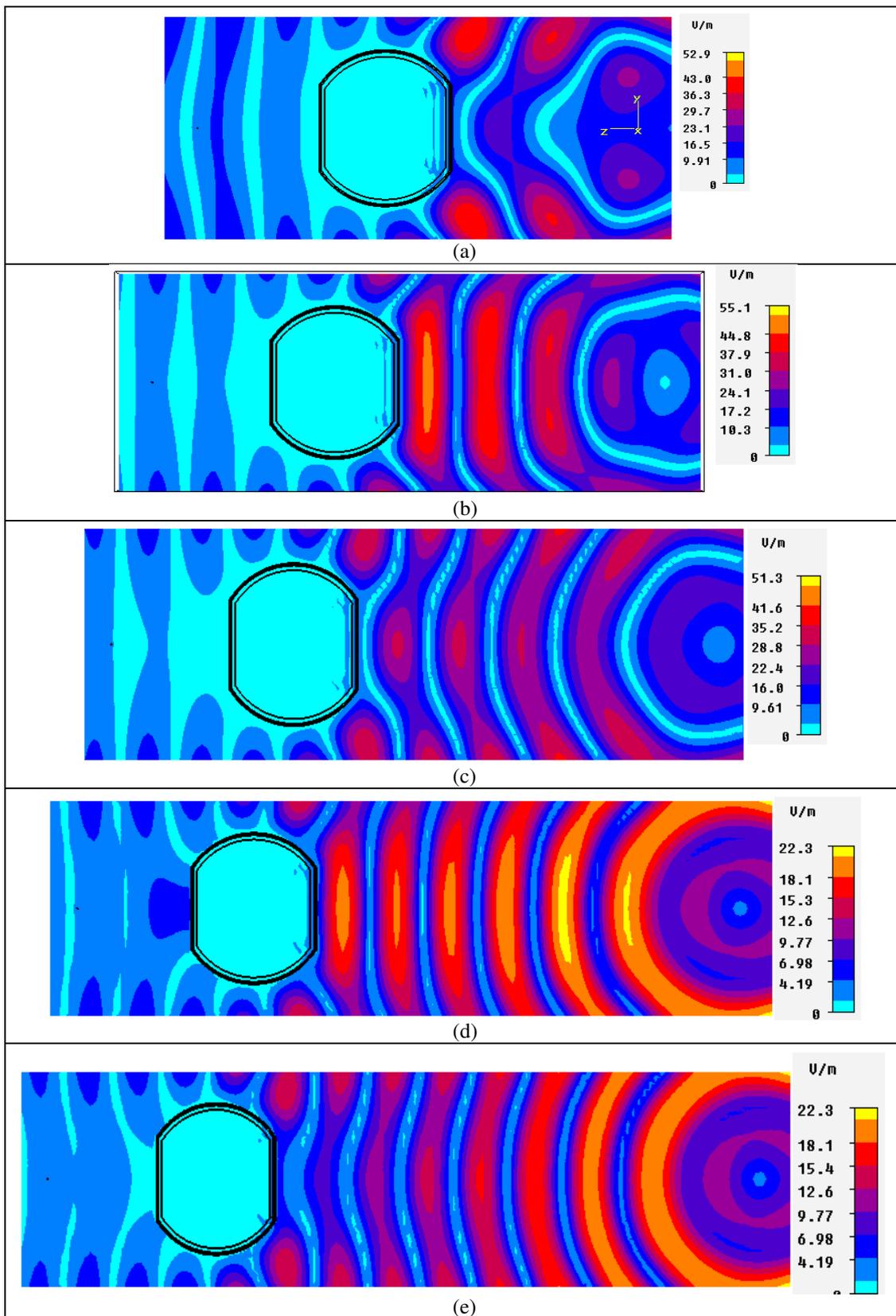


Figura 29 - Distribuição do campo elétrico no plano ZY no usuário passivo na presença de duas fontes EM, vista lateral com o modelo da cabeça à (a) 0,3 m da fonte EM. (b) 0,4 m da fonte EM. (c) 0,5 m da fonte EM (d) 0,6 m da fonte EM. (e) 0,7 m da fonte EM.

5.3 RESULTADOS DA SEGUNDA ETAPA

Nessa segunda etapa são utilizados os valores otimizados do AG para o cálculo de campo elétrico no ambiente aberto com a presença de um modelo da cabeça humana. Fazendo uso do MWS CST foram realizadas três simulações visando à constituição do arranjo espacial de fontes EM na vizinhança do usuário. Os parâmetros otimizados, a partir do AG, relacionados ao posicionamento espacial e a fase, das antenas nas três configurações são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Parâmetros otimizados pelo AG.

| Parâmetros | Configuração 1 | Configuração 2 | | Configuração 3 | | |
|---------------------|----------------|----------------|----------|----------------|----------|----------|
| | Antena 1 | Antena 1 | Antena 2 | Antena 1 | Antena 2 | Antena 3 |
| x (m) | 0,3118 | 0,3189 | 0,3114 | 0,3135 | 0,3024 | 0,3227 |
| z (m) | 0,3005 | 0,3035 | 0,3264 | 0,3132 | 0,3108 | 0,3283 |
| $\theta_{D,R}$ (°) | 0,0000 | 0,0006 | 0,0001 | 0,0017 | 0,0000 | 0,0005 |
| θ_i (°) | 3,5428 | 2,0034 | 43,9592 | 1,5412 | 48,7652 | -46,3234 |
| θ_{FASE} (°) | 17,18 | 17,38 | 13,46 | 17,95 | 24,77 | -0,3828 |

onde, x e y são os componentes da distância, $\theta_{D,R}$ é o ângulo do diagrama de irradiação, θ_i é o ângulo de incidência e θ_{FASE} o ângulo de fase. A partir da obtenção dos valores de θ_i , x e z, é possível calcular o valor de θ_{FASE} .

5.3.1 Etapa 2 - Configuração 1

Após o processo de otimização dos parâmetros no AG é possível representar a configuração otimizada da seguinte forma

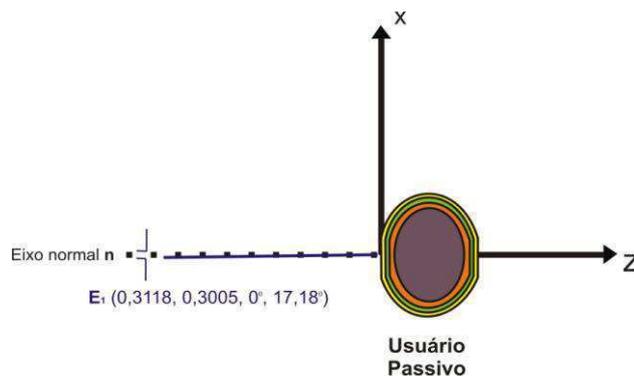
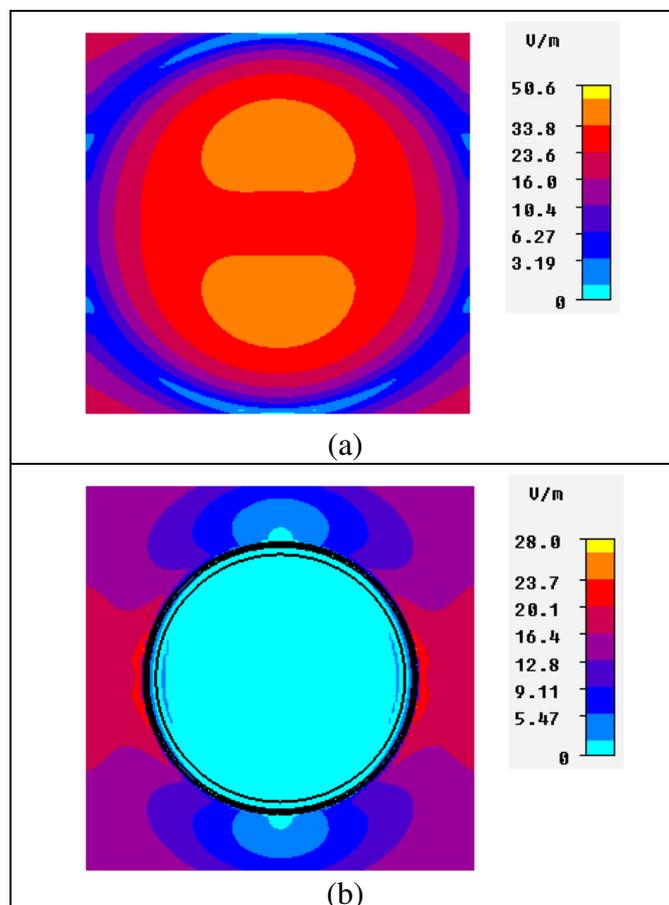


Figura 30 – Vista superior da antena dipolo nas proximidades do usuário passivo com seus parâmetros otimizados.

Na Fig. 31 a distribuição do campo elétrico produzido por uma fonte EM com os parâmetros otimizados é apresentado. Observa-se na região, imediatamente anterior a cabeça, $z = 0,3$ m (Fig. 31 (a)), a presença de concentrações simétricas de energia EM com níveis de campo elétrico no valor máximo de 42,2 V/m.

Para o posicionamento correspondente a cabeça humana os níveis resultantes da distribuição apresentam uma grande variabilidade em intensidade, porém com simetria em todas as distribuições dos valores máximos de campo elétrico. Na região próxima a cabeça e paralela ao eixo-x os níveis máximos calculados foram na ordem de 23,7 V/m. Já para as camadas de tecidos os valores máximos calculados foram: 9,11 V/m para a pele e o músculo e 5,47 V/m para o crânio e cérebro (Fig. 31 (b)).

Após a cabeça humana, em $z = 0,5$ m, Fig. 31 (c) percebe-se uma queda nos níveis de campo elétrico calculados. Isto acontece devido a cabeça humana atuar como um bloqueio para a propagação da energia EM, resultando em níveis máximos de 10,15 V/m.



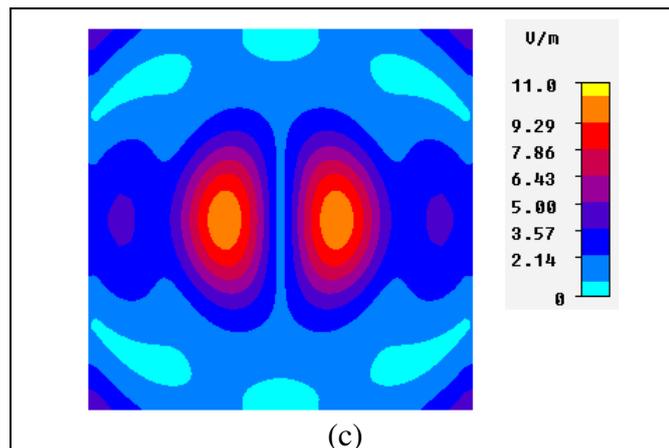


Figura 31 – Vista frontal da distribuição de campo elétrico no plano XY produzidos por uma fonte EM distribuída com os parâmetros otimizados (a) 0,3330 m (b) 0,4330 m (c) 0,5330 m da fonte.

Nas figuras 32 e 33 são apresentados o diagrama de irradiação e o coeficiente de reflexão da fonte EM que teve os parâmetros otimizados. Comparando-se os resultados calculados na Fig. 26 e na Tabela 7 fica evidente que ocorreu um aumento simultâneo de 0,02 dB no ganho e no coeficiente de reflexão $S_{1,1}$, apesar da fonte esta em um posicionamento 0,4330 m da cabeça humana, mesmo a cabeça humana contribuindo para o descasamento. Isso corresponde a uma melhor resposta da fonte EM em sua função graças ao processo de otimização implementado.

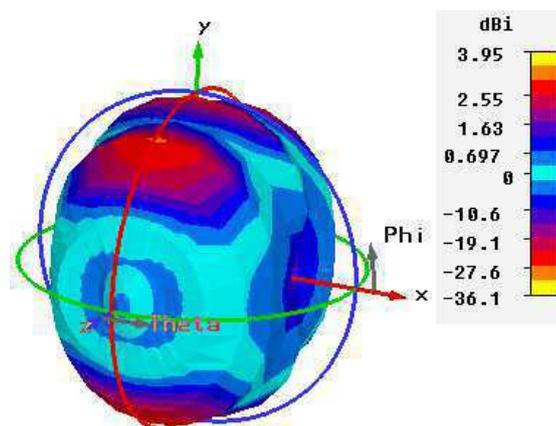


Figura 32 – Diagrama de irradiação da fonte EM com os parâmetros otimizados.

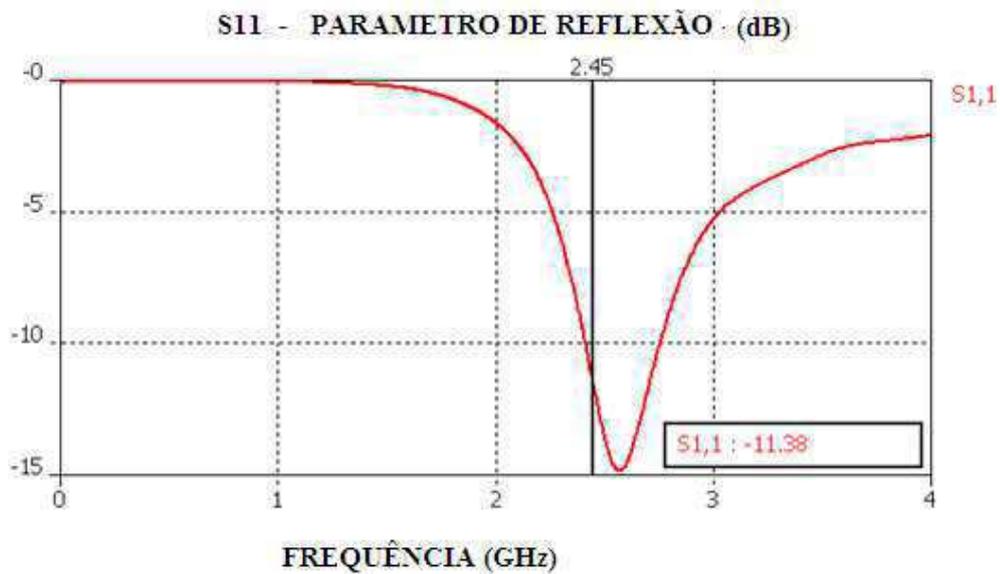


Figura 33 – Coeficiente de reflexão S_{1,1} da fonte EM com os parâmetros otimizados.

5.3.2. Etapa 2 - Configuração 2

Na segunda configuração com os parâmetros otimizados foi possível determinar o posicionamento das duas fontes EM (Fig. 34). Os resultados da distribuição do campo simulação são apresentados na Fig. 38.

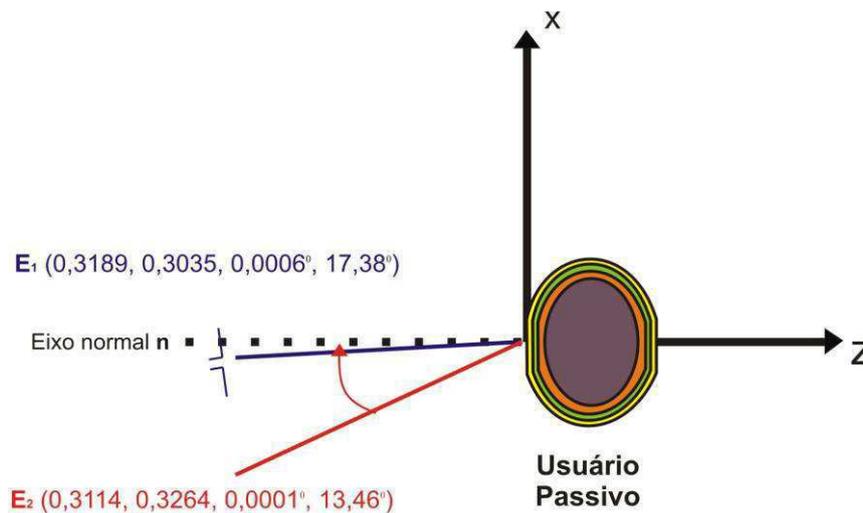


Figura 34 – Vista superior de duas antenas dipolos nas proximidades do usuário passivo com seus parâmetros otimizados.

Nas Figs. 35, 36 e 37 são apresentados o diagrama de irradiação e os coeficientes de reflexão das duas fontes EM com os parâmetros otimizados. Nessa configuração devido à

geometria do arranjo o desempenho do conjunto foi afetado pelo acoplamento mútuo das antenas.

Antenas com esse efeito têm seus desempenhos influenciados nas grandezas impedância, coeficiente de reflexão e o diagrama total das antenas, resultando no descasamento das antenas.

Na análise do diagrama de irradiação percebe-se que este fenômeno afeta o desempenho das antenas produzindo uma diminuição do ganho para 5,2 dBi, enquanto que os coeficientes de reflexão da antena 1 e 2 atingiram os valores de -10,66 dB e -9,678 dB.

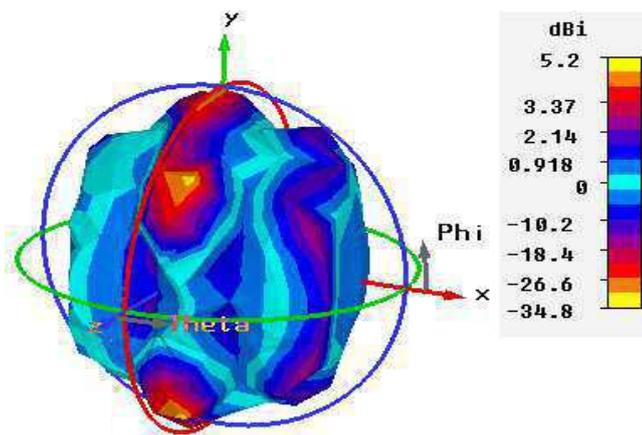


Figura 35 – Diagrama de irradiação do arranjo constituído por duas fontes EM com os parâmetros otimizados.

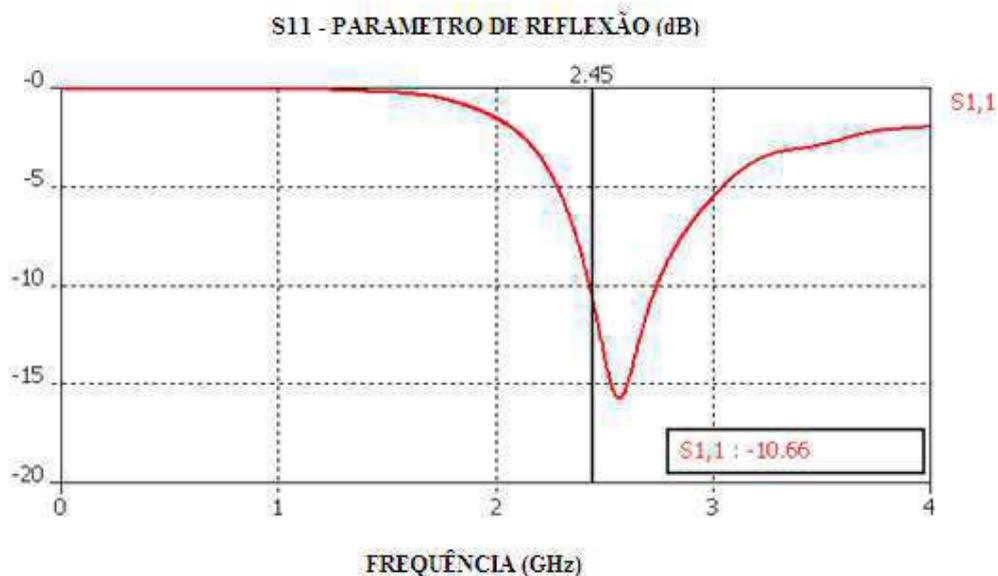


Figura 36 – Coeficiente de reflexão $S_{1,1}$ da fonte EM 1 com os parâmetros otimizados para o arranjo com duas fontes.

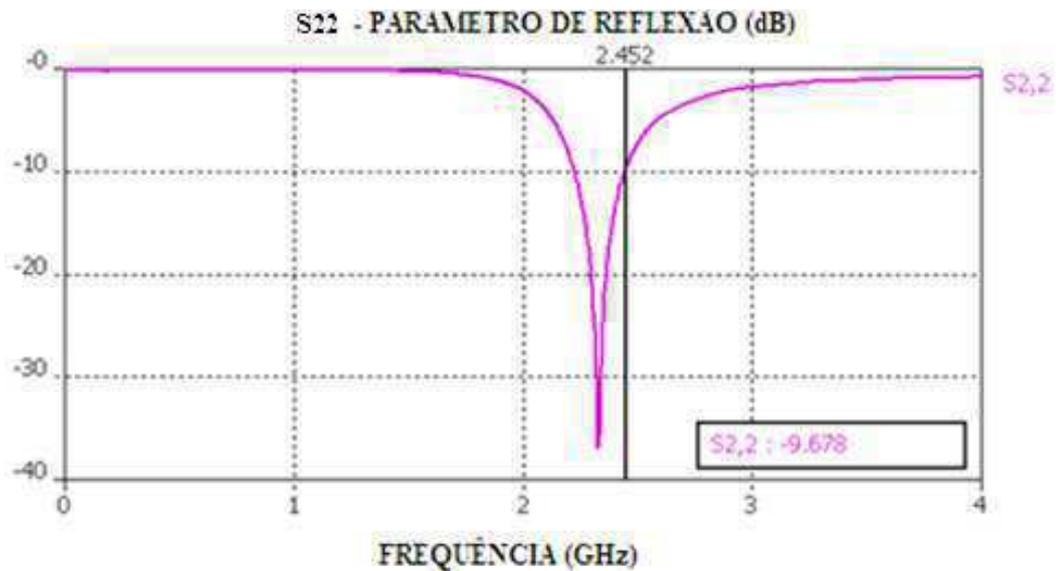
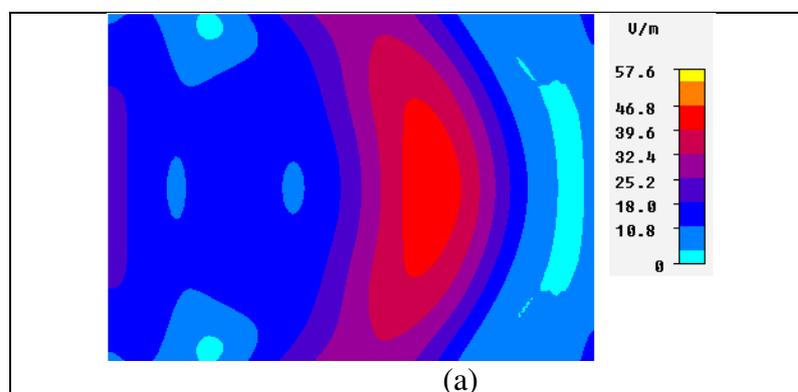


Figura 37 – Coeficiente de reflexão $|S_{2,2}|$ da fonte EM 2 com os parâmetros otimizados para o arranjo com duas fontes.

Os níveis máximos calculados para a região anterior a cabeça, $z = 0,3$ m (Fig. 38 (a)) é igual a 46,8 V/m, sendo encontrada na região central da figura. Já para o posicionamento da cabeça humana o valor do atingido na região próxima é de 25,0 V/m (Fig. 38 (b)) no lado esquerdo da cabeça, no interior o valor máximo foi de 5,76 V/m.

Após a cabeça humana, em $z = 0,5$ m (Fig. 38 (c)), os níveis de campo elétrico calculados foi de 10,76 V/m. Isto acontece devido a cabeça humana atuar como um bloqueio para a propagação da energia EM



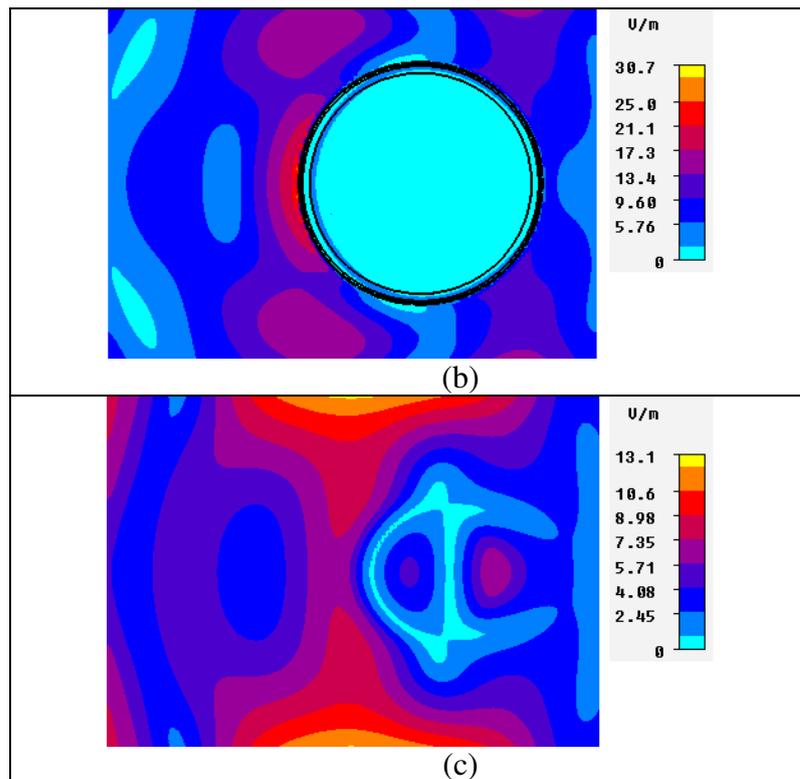


Figura 38 – Vista frontal da distribuição do campo elétrico no plano XY produzidos por duas fontes EM distribuídas com os parâmetros otimizados (a) 0,340 m (b) 0,440 m (c) 0,540 m das fontes.

5.3.3 Etapa 2 - Configuração 3

Por fim, para um número de três fontes EM, no processo de otimização dos parâmetros no AG, é possível representar a configuração otimizada da seguinte forma

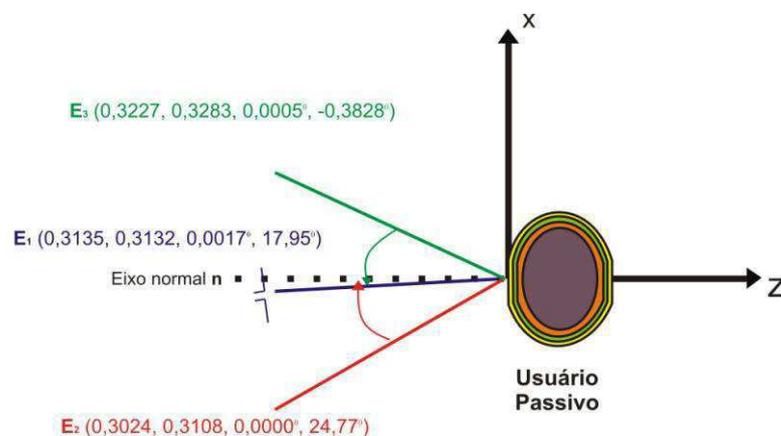


Figura 39 – Vista superior de três antenas dipolos nas proximidades do usuário passivo com seus parâmetros otimizados.

Nessa terceira configuração o efeito do acoplamento entre as antenas que compõem o arranjo em conjunto com a presença da cabeça humana continuam a afetar o desempenho das antenas, reduzindo o valor do ganho e dos coeficientes de reflexão.

Verifica-se que no diagrama de radiação tal fenômeno produziu uma diminuição do ganho para 5,29 dBi, enquanto que os coeficientes de reflexão da antena 1, 2 e 3 atingiram os valores de -10,59 dB, -5,812 dB e -4,942 dB.

Os níveis máximos calculados para a região anterior a cabeça, $z = 0,3$ m (Fig. 40 (a)), apresentaram uma variabilidade dos pontos quentes, porém tendo o seu nível máximo localizado no centro do plano varrido tendo o seu valor máximo de campo elétrico igual a 48,15 V/m.

Para o posicionamento correspondente a cabeça humana os níveis calculados atingiram os valores de resultantes de 37,8 V/m (Fig. 40 (b)) no lado esquerdo da cabeça, no interior os valores correspondentes a todas as camadas de tecidos foi de 7,83 V/m.

Após a cabeça humana, em $z = 0,5$ m (Fig. 40 (c)), os níveis de campo elétrico calculados foi de 16,9 V/m. Isto acontece na condição em que a cabeça humana atua como um bloqueio para a propagação da energia EM.

Tais efeitos, no ambiente computacional, promovem uma queda ainda maior na eficiência de todas as antenas, conseqüentemente, resultando em uma diminuição da amplitude e fase da energia EM irradiada, impossibilitando a constatação dos reais valores dos níveis existentes nessa configuração.

Na prática, dependendo da largura de faixa e tipo de antena no dispositivo, para solucionar esse tipo de problema a própria fonte EM tem que emitir mais energia para dar continuidade a transmissão e recepção dos sinais. Logo, sua potência é alterada de valor para compensar o descasamento gerado pela presença de mais de uma antena.

Percebe-se que mesmo a ressonância das antenas estando descasadas em relação a modelagem inicial o resultado da concentração de energia EM em várias partes antes, depois e na cabeça ocorreu, tal fato constata a presença da superposição dos campos como o agente responsável pelas referidas concentrações.

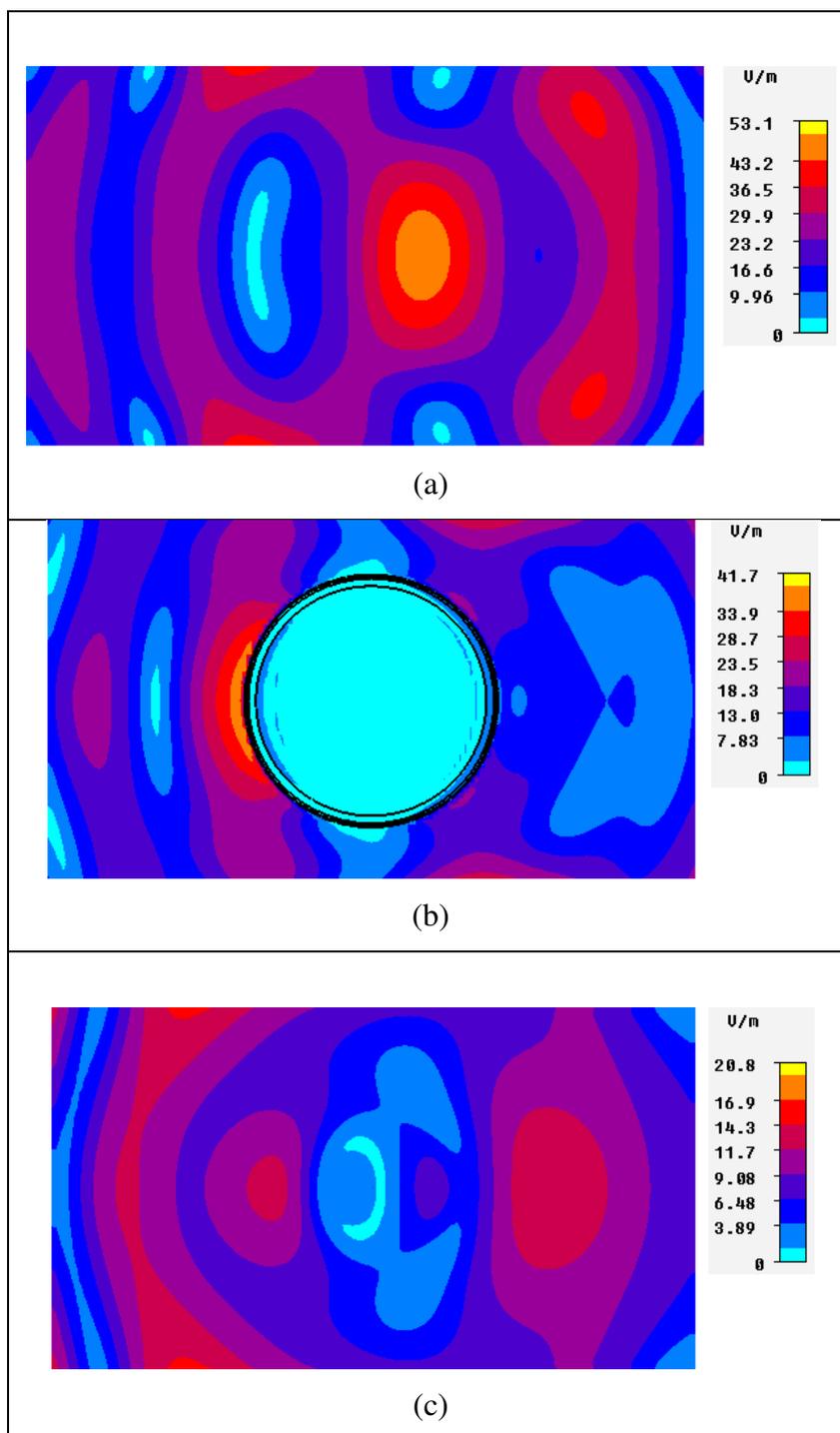


Figura 40 – Vista frontal da distribuição do campo elétrico no plano XY produzidos pelo arranjo espacial constituído de três fontes EM distribuídas com os parâmetros otimizados (a) 0,3432 m (b) 0,4432 m (c) 0,5432 m das fontes.

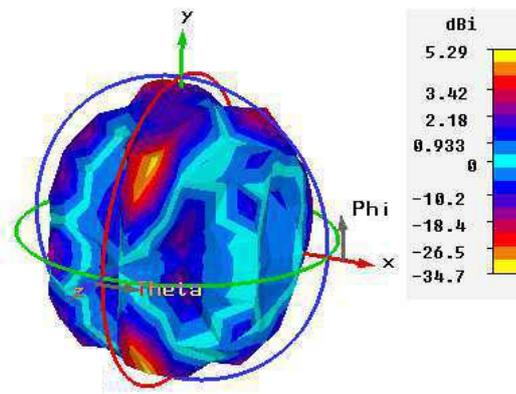


Figura 41 - Diagrama de irradiação do arranjo com três fontes EM após o processo de otimização.

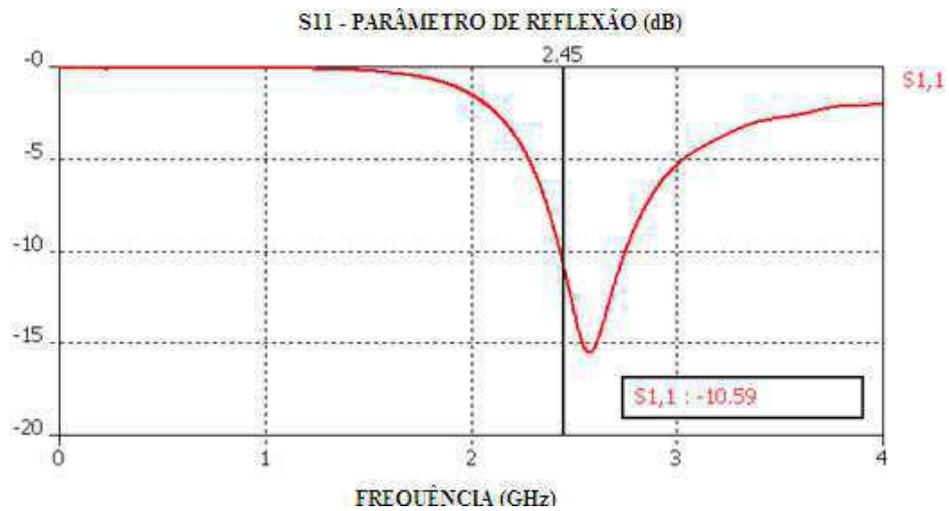


Figura 42 - Coeficiente de reflexão $S_{1,1}$ da fonte EM 1 com os parâmetros otimizados para o arranjo com três fontes.

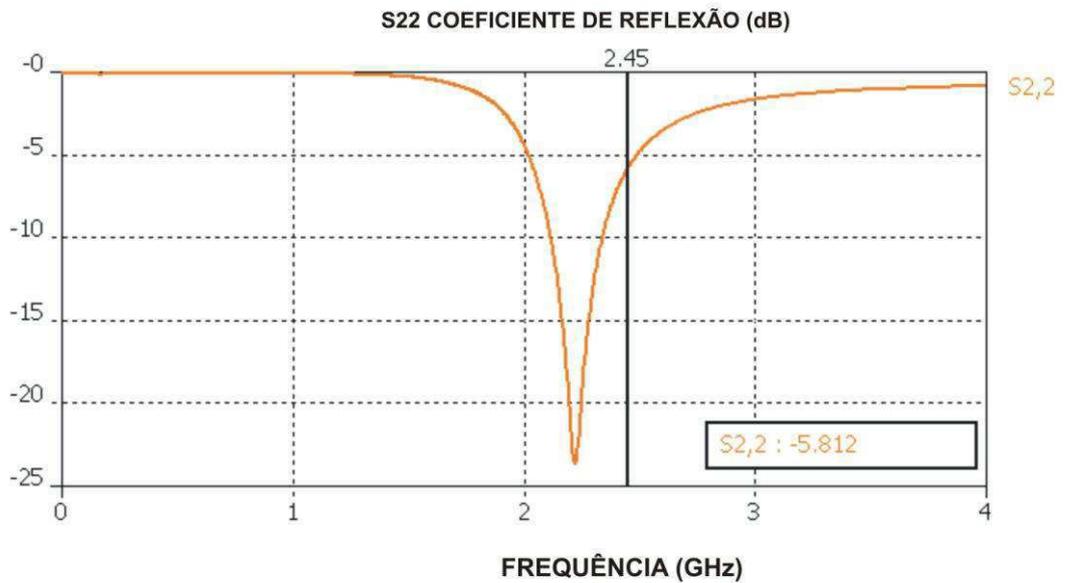


Figura 43 - Coeficiente de reflexão $S_{2,2}$ da fonte EM 2 com os parâmetros otimizados para o arranjo com três fontes.

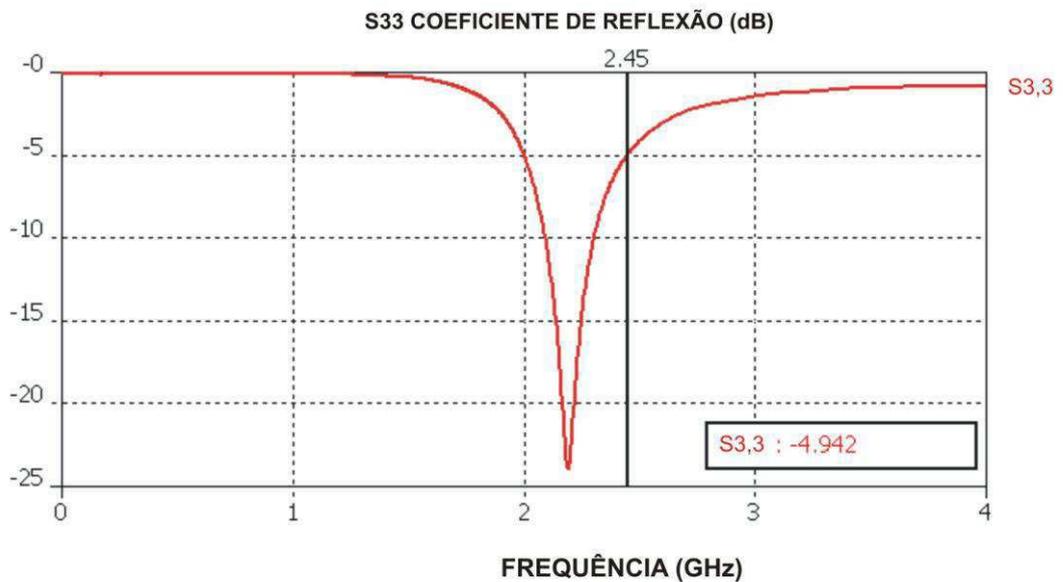


Figura 44 - Coeficiente de reflexão $S_{3,3}$ da fonte EM 3 com os parâmetros otimizados para o arranjo com três fontes.

5.4. CONCLUSÃO

Por meio do método da varredura planar é apresenta-se como um método eficaz para identificação de pontos quentes por multfontes também em simulações computacionais.

Contudo, que o esforço computacional para tal aplicação requer um máquina compatível e software apropriado.

A limitação da região de estudo no ambiente aberto possibilitou uma melhor performance das simulações computacionais, no CST, em todas as configurações. Todavia devido a complexidade da disposição espacial do arranjo espacial o tempo de execução desta simulação foi cerca de 1 hora.

O AG apresenta grande eficácia em sua busca pelos valores ótimos dos parâmetros estudados. Além de fornecer bons resultados sem grande esforço computacional, o mesmo é prático em sua variação bastando somente a elaboração correta do código em sua estrutura inicial.

Percebe-se que mesmo a ressonância das antenas estando descasadas em relação a modelagem inicial o resultado da concentração de energia EM em várias partes antes, depois e na cabeça ocorreu, tal fato evidencia níveis de exposição EM que não são abordados nas normas atuais.

Na prática, dependendo da largura de faixa e tipo de antena no dispositivo, para solucionar o descasamento da antena o aparelho irradia mais energia EM no ambiente para dar continuidade a transmissão e recepção dos sinais. Logo, sua potência aumenta de valor para compensar o descasamento gerado.

Verifica-se também, que a presença da cabeça humana promove uma concentração de campo em direções distintas dependentes da distância que se encontra da fonte. Tal concentração possui níveis não desprezíveis e contribuem para continuidade dos mecanismos de reflexão do campo em todas as direções, alterando o ambiente eletromagnético.

Os níveis calculados nas camadas são resultados dos mecanismos de reflexões e refrações no interior da estrutura multicamadas que reforçam ainda mais a absorção de energia EM irradiada no ambiente.

Apesar destes níveis estarem abaixo da norma é importante observar a existência dos níveis de campo elétrico no usuário passivo em todos os tecidos, em posições específicas, decorre das reflexões existentes nas camadas ou da superposição dos campos EM das duas fontes. Tais níveis podem contribuir de forma direta para continuidade da exposição passiva.

Em todas as configurações estudadas os resultados calculados não ultrapassaram os limites de exposição da norma da ANATEL. Contudo, este fato evidencia a superposição de

campos elétricos na região de estudo e corrobora com os resultados publicados por Costa e Fontgalland (2009; 2010) e Pereira Filho, *et al.*, (2009).

Capítulo 6

6. CONCLUSÕES

Considera-se que a presente pesquisa alcançou o seu propósito ao trazer subsídios relevantes a respeito da exposição eletromagnética passiva, visto que na literatura científica há pouca referência sobre tal aspecto, mesmo diante da evidente necessidade de tais investigações.

Como também ao realizar a análise e caracterização da distribuição de CEM em ambientes abertos e suas implicações no que tange a exposição passiva EM, produzidos por multifontes dispostas na região de estudo utilizando os AGs.

Para isso foram utilizadas propriedades dielétricas adequadas do ambiente, do modelo da cabeça humana, além da devida modelagem das antenas, também em termos de geometria, frequência de operação, diagrama de radiação e coeficiente de reflexão e fase.

A simplificação dos modelos, no âmbito do objetivo do trabalho, tornou-se uma boa aproximação devido à existência de recursos computacionais limitados e do gasto menor de tempo nas simulações, em relação ao modelo da cabeça este poderá ser interessante na perspectiva de se estudarem os efeitos da absorção em tecidos humanos na RCD.

Para o cálculo dos níveis de CEM na RCD, produzidos pelas multifontes foram realizadas simulações no software CST, possibilitando a análise eficiente em duas dimensões por meio do método da varredura planar entre as fontes EM, com a presença do usuário passivo, calculando os níveis de exposição na região da cabeça humana e na sua vizinhança. Uma dificuldade encontrada durante as simulações no uso do CST foi relativa ao tempo médio de processamento, sendo este cerca de 1 hora a cada nova posição da cabeça.

De início foram realizadas simulações prévias com o intuito de limitar a região de estudo, o qual se encontra no intervalo entre 0,3 m e 0,7 m, visto que o esforço computacional é relativamente grande sem tal limitação.

Posteriormente, a utilização do AG permitiu a otimização dos parâmetros relativos à posição e a fase da fonte EM possibilitando a construção de um arranjo espacial na vizinhança da cabeça humana. Devido à natureza probabilística dos AGs foi preciso apenas

fornecer os limites do intervalo desses parâmetros para iniciar o processo de busca pela melhor solução.

Em relação ao AG pode-se concluir que este se mostrou uma técnica eficaz na otimização dos parâmetros, proporcionado à determinação de CEM máximos na vizinhança de um usuário passivo. Além disso, as simulações realizadas indicaram a sua robustez, a sua capacidade de generalizar e o seu alto grau de paralelismo, que permite buscar em várias localidades da região de estudo a solução ótima, além de sua flexibilidade de alteração do código após a implementação.

Para o cálculo dos níveis de CEM produzidos no modelo da cabeça humana de um usuário passivo e obtenção dos pontos quentes utilizou-se mais uma vez o software CST, agora com os parâmetros otimizados, de modo que foi possível identificar a correlação dos níveis calculados com o fenômeno da superposição.

Percebe-se que mesmo as antenas não apresentando boa eficiência ocorre a concentração de energia EM em várias partes antes, depois e na cabeça, tal fato evidencia níveis de exposição EM que não são abordados nas normas atuais.

Na prática, dependendo da largura de faixa e tipo de antena no dispositivo, para solucionar o descasamento da antena o aparelho irradia mais energia EM no ambiente para dar continuidade a transmissão e recepção dos sinais. Logo, sua potência aumenta de valor para compensar o descasamento gerado.

A existência dos níveis CEM em todos os tecidos no usuário passivo, em algumas posições críticas na região de estudo, decorre das múltiplas reflexões existentes entre as camadas, é consequência direta das diferentes permissividades e da superposição dos campos EM produzidos pelas ondas incidentes e refletidas na região entre a cabeça e a fonte.

Fazendo as devidas considerações foi possível realizar a comparação dos níveis calculados com os limites de exposição pública das normas internacionais do IEEE (2005), ICNIRP (1998) e da norma nacional da ANATEL (BRASIL, 2002), onde se pode constatar que existe conformidade dos valores padrão vigentes, contudo tal conformidade não garante que sejam evitadas interferências ou efeitos em pessoas ou dispositivos que apresentem sensibilidade a esse tipo de exposição.

É importante destacar que as normas atuais não conseguem recriar realisticamente o ambiente que pode ser estabelecido com a presença de multifontes, também não recomenda como evitar tais problemas. Dessa forma torna-se imprescindível que os limites de CEM em

vigor precisam ser revistos, levando em consideração os níveis de exposição emitidos conjuntamente e em modos interativamente variáveis na vizinhança do usuário.

Por fim, cabe destacar que embora as evidências para o estabelecimento da conformidade neste ambiente tenha se mostrado eficaz, é necessário que esse tipo de análise e avaliação seja realizado no sentido de proporcionar um embasamento científico para a real situação estabelecida nos ambientes abertos de forma a proporcionar a diminuição de informações especulativas que cercam a exposição eletromagnética.

REFERÊNCIAS¹⁴

ALEXIOU, A. et al. **Interaction between GSM Handset Helical Antenna and User's Head: Theoretical Analysis and Experimental Results.** Springer Science, 2005. P. 215-221.

ALMAGUER, H. A. D. **Contribuição ao método da modelagem por linhas de transmissão (TLM) e sua aplicação aos estudos em bioeletromagnetismo.** Tese. Doutorado em Engenharia Elétrica. Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

ARAÚJO, A. R. “**Radiações Perigosas**” In: Boletim da UFMG, Nº 1690 - Ano 36 12.4.2010. Disponível em: <http://www.ufmg.br/boletim/bol1690/4.shtml>, Acessado em 16 de janeiro de 2011.

BALANIS, C. A. **Advanced Engineering Electromagnetics.** Ed. John Wiley & Sons, Inc, 1989.

BALANIS, C. A. **Teoria de antenas: análise e síntese**, v. 1; tradução J. R. Souza; revisão Silvio Ernesto Barbin – Rio de Janeiro: LTC, 2009.

BIELLI, M.; CARAMIA, M.; CAROTENUTO, P. **Genetic algorithms in bus network.** In: Transportation Research, Parte C, Vol. 10, p. 19-34, 2002.

BOUTRY, C.M., et al. **Dosimetric Evaluation and Comparison of Different RF Exposure Apparatuses Used in Human Volunteer Studies.** In: Bioelectromagnetics, Vol. 29, p.11–19, 2008.

BRASIL, **Laboratório Nacional de Computação Científica. Plano diretor do LNCC, 2006-2010: [planejamento estratégico do LNCC].** – Brasília: Ministério da Ciência e Tecnologia, 2006.

BRASIL, 2002. **Resolução no. 303 de 2 de julho de 2002** – Aprova o Regulamento sobre Exposição a Campos Elétricos, Magnéticos e Eletromagnéticos na Faixa de

¹⁴ Baseado na NBR 6023:2002 - Referências

Radiofrequências entre 9kHz e 300 GHz. Disponível em: www.anatel.gov.br. Acessado em 12/06/2010.

BRASIL, 1999. **Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL)**. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/Portal/verificaDocumentos/documentoVersionado.asp?numeroPublicacao=232340&documentoPath=232340.pdf&Pub=&URL=/Portal/verificaDocumentos/documento.asp>, Acessado em 19/08/2010.

CORREIA, D. **Algoritmos genéticos e elementos finitos na síntese de dispositivos fônicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica).UNICAMP, 2002.

COSTA, C. P., FONTGALLAND, G. **On the Electromagnetic Field behavior nearby coupled dielectrics spheres**. In: EHE, 3º, CD, vol. 1, Sao Paulo, 2009.

COSTA, C. P., FONTGALLAND, G. and BARBIN, S. E.; “**Near Fields Radiation Superposition Assessment in Human Nearby Users of Cellular Phones**”, 2010 Asia-Pacific International Electromagnetic Compatibility Conference – APEMC 2010, Pages 489-1 ? 489-4, IEEE Catalog Number: CFP1078I-ART ISBN: 978-1-4244-5623-9, Beijing, China - 12-16 April 2010.

CST – Computer Simulation Technology. **CST Microwave Studio**. Performance. Disponível em: <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Performance.aspx>. Acesso em: 23/08/2009.

DARWIN. C. **A origem das espécies**. Rio de Janeiro: Ediouro, 2004.

DE SANTIS, V. et al. **Finite-Element Analysis of Temperature Increase in Vascularized Biological Tissues Exposed to RF Sources**. In: IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, VOL. 45, Nº. 3, 2009.

DIAS, J. S.; BARRETO, J. M. **Algoritmo genético: inspiração biológica na solução de problemas – uma introdução**. Revista Marítima Brasileira – Suplemento Especial, Pesquisa Naval, 1998. nº 11, p. 105 – 128.

FCC, Federal and Communications Commission. **Tissue Dielectric Properties**. Disponível em: <<http://www.fcc.gov/fccbin/dielec.sh>>, Acessado em 07/05/2009.

FERREIRA, P. I. L., **Estudo da interferência eletromagnética produzida por lâmpadas fluorescentes compactas**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Campina Grande, 2010.

FONTGALLAND, G. **Uma aplicação médica de microondas: Diatermia e Hipertemia**, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal da Paraíba, 1993.

GASMELSEED, A.; YUNUS, J. **SAR Calculations in Human Head Model Extracted from**. In: Fourth Asia International Conference on Mathematical/Analytical Modeling and Computer Simulation, 2010.

GATI, A. et al, **Exposure Induced by WCDMA Mobiles Phones in Operating Networks**, In: IEEE Transactions on wireless communications, Vol. 8, N°. 12, 2009.

GETURMAN, J. MOREIRA, A. A., PEIXEIRO, C. RAHMAT-SAMII, Y. **User Interaction with Inverted-F Antennas Integrated into Laptop PCMCIA Cards**. In: International Conf. on Appl. Electromagnetic and Communications - ICECOM, Dubrovnik, Croatia, Vol. 1, p. 27 - 30, 2007. IEEE, 2007.

GETURMAN, J.; MOREIRA, A. A.; PEIXEIRO, C.; RAHMAT-SAMII, Y. **Electromagnetic human interaction with ISM 2.4 GHz laptop antennas**. In: IEEE European Conf. on Antennas & Propagation - EUCAP, Edinburgh, United Kingdom, 2007.

GOLDBERG, D. E. **Real-coded genetic algorithms, virtual alphabets, and blocking**, Illinois Genetic Algorithms Laboratory, Dept.of General Engineering, IlliCal Report 90001, Illinois, EUA, 1990.

HONDOU, T. **Passive Exposure to Mobile Phones: Enhancement of Intensity by Reflection**. Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ), Vol. 75, 2006.

HUMAN EXPOSURE ASSESSMENT. Disponível em: <http://www.inchem.org/documents/ehc/ehc/ehc214.htm>, Acessado em 20/07/2010.

ICNIRP, International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, **Guidelines for Limiting Exposure to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz)**, 2009.

INTERNATIONAL COMMISSION ON NON-IONIZING RADIATION PROTECTION - ICNIRP. Guidelines for Limiting Exposures to Time-Varying Electric, Magnetic and Electromagnetic Fields (up to 300 GHz). Health Physics, vol. 74, 1998.

IEEE, Institute of Electrical and Electronics Engineers C95.1-2005, **IEEE Standard for Safety Levels with Respect to Human Exposure to Radio Frequency Electromagnetic Fields, 3 kHz to 300 GHz**, 2005.

ISMAIL, N. B.; JENU, M. Z. M., **Modeling of Electromagnetic Wave Penetration in a Human Head due to Emissions from Cellular Phones**. In: Conference Electromagnetic Proceedings, Asia-Pacific, Vol. 1, nº1. 2007.

ITU Internacional Telecommunication Union. Disponível em: http://www.itu.int/newsroom/press_releases/2010/06.html, Acessado em: 04/08/2010.

KAMIMURA, Y.; MURATA, E.; YAMADA, Y. **Frequency dependence of energy deposition in the multilayered spherical model of a human head near a half wavelength dipole**. In: International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 1999.

KHODABAKHSHI, H.; CHELDAVI, A. **Irradiation of a Six-Layered Spherical Model of Human Head in the Near Field of a Half-Wave Dipole Antenna**. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, Vol. 58, Nº. 3, 2010.

KRAUS, J. D. MARHEFKA, R. J. **Antennas: for all applications**. 3rd ed. McGraw-Hill series in electrical engineering, 2002.

LACERDA, E. G. M. & CARVALHO, A. C. P. L. F. **Introdução aos algoritmos genéticos**. Em: Galvão, C. O. e Valença, M. J. S. (orgs) Sistemas inteligentes: aplicações a recursos hídricos e sistemas ambientais. Ed. Universidade. UFRGS. Porto Alegre, 1999.

LINDEN, R. **Algoritmos genéticos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Brasport, 2008.

LOBO, E. L. M. **Uma solução do problema de horário escolar via Algoritmo genético paralelo**. Dissertação (Mestrado em Modelagem Matemática e Computacional). Centro Federal de Tecnologia de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

MALAQUIAS, N. G. L. **Uso dos Algoritmos Genéticos para a otimização de rotas de distribuição.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Uberlândia, 2006.

MARIAGE, P. DENAIU, V. SEETHARAMDOO, D. RIOULT, J. **Analysis of electromagnetic pollution radiated due to embedded 802.11a/b/g equipments both inside and outside railway vehicles.** In: 9th International Conference on Intelligent Transport Systems Telecommunications. ITST, 2009

MONEBHURRUN, V. **Conservativeness of the SAM Phantom for the SAR Evaluation in the Child's Head.** In: COMPUMAG, 2009, Florianopolis, Brazil.

PEREIRA FILHO, M. L. *et al.* **Evaluation of ELF Magnetic Field Distribution.** In: 3º EHE, São Paulo, 2009, CD, vol. 1.

PESSOA, M. B. **A utilização da telefonia móvel no ambiente urbano: Um estudo sócio-jurídico e ambiental sobre as estações rádio-base em João Pessoa/PB.** Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009.

SADIKU, M. N. O. **Elementos de eletromagnetismo.** Reimpressão. Porto Alegre: Bookman, 2006.

SANCHEZ-HERNANDEZ, D. A. **High Frequency Electromagnetic Dosimetry.** Artech House Publishers, ISBN-10: 1596933976, 260Pages, 2009.

SANTOS, R. I. M. **Estudo da Interação de Antenas de Terminais Móveis com o Utilizador.** Dissertação (Mestrado Engenharia Biomédica). Instituto Superior Técnico/IST, Lisboa, Portugal, p. 91, 2008.

SKAROPOULOS, N. C. *et al.* **Induced EM Field in a Layered Eccentric Spheres Model of the Head: Plane-Wave and Localized Source Exposure.** In: IEEE transactions on microwave theory and techniques. Vol. 44.Nº.10.1996.

TORRES, A. C. S. **Determinação de rotas ótimas de ônibus urbano utilizando Algoritmos Genéticos.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Universidade de Brasília, 2003.

ULABY, F. T. **Eletromagnetismo para engenheiros.** Tradução José Lucimar do Nascimento. Porto Alegre: Bookman, 2007.

WANDERLEY, P. H. S., **Análise de Radiação Não-Ionizante emitida por Estações Rádio-Base com Perdas Calculadas pelo Modelo de Ikegami-Walfish.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade de Brasília, 2009.

WOLLINGER, P. R. **Estudo dos níveis de radiação eletromagnética em ambiente urbano.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 2003.

YAZDANDOOST, K.Y. **A 2.4 GHz antenna for medical implanted communications.** In: Microwave Conference. APMC 2009. Ásia Pacific, Cingapura, 2009. IEEE, 2007.

ANEXO A – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Aprofundar as análises e estudos das distribuições aleatórias espaciais das fontes EM, além de prosseguir na avaliação dos níveis de exposição humana aos CEM em cenários considerados críticos, por exemplo: hospitais, creches e escolas;
- Realizar estudo de IEM em equipamentos eletromédicos produzidos por multifontes EM dispostas aleatoriamente, de forma a avaliar o impacto resultante no desempenho dos equipamentos;
- Elaborar uma metodologia de ensaios, na RCD, que possibilite a análise em laboratório da exposição passiva EM e os seus níveis calculados;
- Identificar e quantificar os riscos a saúde pública produzidos em usuários ativos nos cenários onde ocorra a superposição dos CEMs na mesma frequência de operação que o dispositivo portado por ele.

ANEXO B – TRABALHOS SUBMETIDOS PARA PUBLICAÇÃO

- COSTA, C. P., FONTGALLAND, G. **On the Electromagnetic Field behavior nearby coupled dielectrics spheres**. In: EHE, 3º, CD, vol. 1, Sao Paulo, 2009.
- C. P. Costa, G. Fontgalland and S. E. Barbin; “**Near Fields Radiation Superposition Assessment in Human Nearby Users of Cellular Phones**”, 2010 Asia-Pacific International Electromagnetic Compatibility Conference – APEMC 2010, Pages 489-1 ? 489-4, IEEE Catalog Number: CFP1078I-ART ISBN: 978-1-4244-5623-9, Beijing, China - 12-16 April 2010.
- C. P. Costa, G. Fontgalland; "**Cálculo da SAR na cabeça produzida por telefones celulares dispostos assimetricamente**", Revista Brasileira de Engenharia Biomédica RBEB 59/2010, edição especial dedicada ao International Conference on Electromagnetic Fields (EHE'09) in Sao Paulo – Brazil on November 17-19, 2009.