



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

**Determinação da Distribuição de Campo  
Eletromagnético Proveniente de Várias Fontes em  
um Automóvel**

**Raquel Aline Araújo Rodrigues**

**Campina Grande - PB.  
Agosto, 2011.**

**Raquel Aline Araújo Rodrigues**

**Determinação da Distribuição de Campo  
Eletromagnético Proveniente de Várias Fontes  
em um Automóvel**

*Dissertação de Mestrado submetida à  
Coordenadoria do Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica da Universidade Federal de  
Campina Grande, como parte dos requisitos  
necessários para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Elétrica.*

ORIENTADOR

**Prof. Dr. Glauco Fontgalland**

**Campina Grande - PB.  
Agosto, 2011**

Raquel Aline Araújo Rodrigues

Determinação de Distribuição de Campo Eletromagnético Proveniente de Várias Fontes em um Automóvel

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

R696d Rodrigues, Raquel Aline Araújo.

Determinação de distribuição de campo eletromagnético proveniente de várias fontes em um automóvel / Raquel Aline Araújo Rodrigues. – Campina Grande, 2011.

131 f. : il. col.

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

Referências.

Orientador: Prof. Dr. Glauco Fontgalland.

1. Campo Eletromagnético. 2. Várias Fontes. 3. Antenas Monopolo. 4. Telefonia Celular. I. Título.

CDU – 621.371.33(043)



DETERMINAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE CAMPO ELETROMAGNÉTICO  
PROVENIENTE DE MULTIFONTES EM UM AUTOMÓVEL

RAQUEL ALINE ARAÚJO RODRIGUES

Dissertação Aprovada em 26.08.2011

  
GLAUCO FONTGALLAND, Dr., UFCG  
Orientador

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

  
RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG  
Componente da Banca

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

CAMPINA GRANDE - PB  
AGOSTO - 2011

“Quem procura ter sabedoria ama a sua vida, e quem age com inteligência encontra a felicidade”.

(Prov. 19:8)

*À Deus, por ser minha Paz, Luz, Força e Refúgio.*

*À minha mãe, Lúcia de Fátima Araújo e à minha avó, Josefa de Castro Araújo, por revestirem a minha vida de amor, carinho e dedicação, me incentivando e auxiliando sempre.*

*Ao meu namorado, Felipe Eduardo Farias Belo, que trilha o mesmo caminho dos estudos, pelo amor, carinho e apoio.*

*A todos os meus familiares e amigos que sempre contribuíram com amor, alegria e motivação.*

***Dedico este modesto e desprezioso trabalho, fruto de um carinhoso estímulo.***

## AGRADECIMENTOS

Em especial, à Deus, por iluminar os meus caminhos, concedendo-me saúde, força e coragem, para que eu pudesse realizar este trabalho, atravessando as barreiras impostas pelo cotidiano.

À minha mãe, Lúcia de Fátima Araújo e à minha avó, Josefa de Castro Araújo, que não mediram esforços por minha educação, contribuindo sempre com muito amor e carinho.

Ao meu namorado, Felipe Eduardo Belo pelo carinho, respeito, motivação e principalmente pelo amor que nos une.

Aos meus familiares que sempre foram meus grandes incentivadores e junto com meus amigos, meu maior patrimônio.

Aos meus bons professores, Glauco Fontgalland, Rômulo R. Maranhão do Valle, Marcos Antônio Barbosa de Melo e Raimundo Carlos Silvério Freire que me apoiaram, orientaram e contribuíram para a minha formação acadêmica, profissional e pessoal e pela imensa paciência.

Ao técnico do LEMA Galba Falcão pelo apoio e orientação nos experimentos.

Ao Prof. Francisco A. F. Tejo pelas sugestões.

Aos meus amigos e colegas do Laboratório de Micro-ondas e Eletromagnetismo (LEMA) da UFCG, em especial a Cláudio Pereira, Edvaldo Pires, Jobson Araújo, Paulo Ixtânio, Crezo Medeiros e Louise May pela ajuda para a elaboração deste trabalho e pela amizade.

Aos funcionários da UFCG, Adail, Tchaikovsky, Ângela, Pedro e Suênia pelo apoio recebido.

À CAPES, que proporcionou o suporte financeiro para viabilizar a realização desta pesquisa.

Enfim, a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Campos elétrico e magnético perpendiculares entre si.....	35
Figura 2- Espectro Eletromagnético (Rodríguez, 2001).....	36
Figura 3- Componentes de campo dos modos TE e TM em uma cavidade retangular (Silva, 2008).....	41
Figura 4- Ambientes fechado em estudo (desenho em software CAD).....	45
Figura 5: Representação da região de transição entre uma onda guiada e uma onda no espaço livre.....	45
Figura 6- Diagrama de antena omnidirecional (Balanis, 2005).....	46
Figura 7- Antena dipolo usada como receptor para medir intensidade de campo elétrico de uma onda polarizada linearmente.....	48
Figura 8- Arranjo triangular de dipolos usado como antena setorial de estação-base para comunicação móvel.....	50
Figura 9- Antena monopolo de $1/4\lambda$ operando em 2GHz e seu diagrama de irradiação vertical: modelagem e simulação com o software MS-CST.....	51
Figura 10 - Limites para exposição a campos elétricos [BRASIL, 2002].....	55
Figura 11- Projeto de antena monopolo para a faixa de frequência de 1,8 a 2,1GHz simulada com o software CST: (a) vista de topo e (b) vista lateral.....	59
Figura 12- Valores simulados dos parâmetros “S” plotados na Carta de Smith referentes à antena monopolo.....	59
Figura 13- (a), (b) e (c) Diagramas de irradiação da antena monopolo simulada no software computacional CST.....	60
Figura 14- Fotos das antenas monopolos construídas no LEMA- Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados – DEE/CEEI/UFCG.....	60
Figura 15- Ambiente do experimento para determinação do S11, SWR e carta de Smith para cada antena monopolo: (1) Antena monopolo, (2) Analisador de malhas.....	61
Figura 16- Ambiente do experimento para determinação do S21 para os enlaces de cada antena monopolo com a antena log-periódica: (1) Antena monopolo, (2) Antena log-periódica, (3) Analisador de malhas.....	61
Figura 17- (a) Antena monopolo com plano de terra contínuo e quase infinito simulada com o software CST, (b) Diagrama de irradiação 2D e (c) Diagrama de irradiação 3D.....	62
Figura 18- Ambiente de medição dos níveis de transmissão das antenas monopolos: (1) Gerador de Sinais, (2) Analisador de Espectro, (3) Antena	

monopolo, (4) Antena log-periódica.....	63
Figura 19- Câmara de reverberação construída no LEMA/DEE/CEEI/UFMG.....	65
Figura 20- Ambiente de Medição no interior da câmara de reverberação: (1) Antena de medição- dipolo de duplo arco construído no LEMA/DEE/UFMG, (2) e (3) Antenas monopolo em um suporte de madeira, (4) Dipolo de duplo arco conectado ao cabo ligado ao analisador de espectro, (5) Agitadores de modos, (6) Câmara sem os agitadores de modo.....	66
Figura 21- Antena log-periódica Rohde&Schwarz 12-144980.....	67
Figura 22: (a) Conjunto de dipolos, (b) Detalhe da alimentação das antenas log-periódicas em dipolos.....	68
Figura 23: (a) Foto do automóvel marca Fiat, modelo Uno Mille Fire Flex utilizado nos experimentos, (b) Foto interior do automóvel e (c) Perspectiva do interior do automóvel e posicionamento das antenas monopolo criadas no software computacional Rhinoceros.....	69
Figura 24- Esquema da disposição da antena de recepção, log-periódica, e dos equipamentos para medição no exterior do automóvel.....	69
Figura 25 - Experimento ao redor do carro: (1) Três antenas monopolo posicionadas no banco traseiro do automóvel, (2) Uma antena monopolo posicionada no banco do passageiro dianteiro, (3) e (4) Medições do nível de sinal nas laterais do automóvel com a log-periódica, (5) Medição com a log-periódica do nível de sinal próximo ao vidro dianteiro do automóvel e (6) Medição com a log-periódica próxima ao vidro traseiro do automóvel.....	72
Figura 26- Esquema da disposição da antena receptora, log-periódica, e das antenas monopolo para as medições no espaço livre.....	73
Figura 27- Antena de dipolo de duplo arco e suas dimensões em comprimento de onda.....	74
Figura 28- Diagrama de irradiação do dipolo de duplo arco: (a) plano YX, (b) plano XZ e (c) plano ZY.....	75
Figura 29- Primeira etapa do experimento para determinação do fator de antena do dipolo de duplo arco.....	76
Figura 30- Segunda etapa do experimento para determinação do fator de antena do dipolo de duplo arco.....	77
Figura 31- Experimento no interior do automóvel com as antenas dispostas no plano 1 (1,12 m do solo): (1) Antena monopolo no banco dianteiro ocupado pelo passageiro, (2) Antenas monopolo no banco traseiro para os três assentos dos passageiros, (3) Antena dipolo de duplo arco no banco do passageiro e (4) Antena dipolo no banco traseiro em uma das posições dos passageiros.....	78
Figura 32- Experimento no interior do automóvel com as antenas dispostas no plano 2 (1,26 m do solo): (1) Antena dipolo de duplo arco no banco do motorista, (2) Antenas monopolo no banco traseiro para os três assentos dos passageiros,	

(3) Antena dipolo de duplo arco no banco traseiro na posição do monopolo 2 e (4) Antena dipolo no banco traseiro na posição do monopolo 3.....	79
Figura 33- Coeficiente de reflexão S11 das quatro antenas monopolo construídas no LEMA/ DEE/ UFCG.....	81
Figura 34- Coeficiente de transmissão S21 de quatro enlaces, em cada enlace uma antena monopolo transmitindo e a log-periódica recebendo.....	81
Figura 35- Comparação dos valores de campo elétrico calculados para as medições no interior da câmara de reverberação com e sem espalhador de modos.....	86
Figura 36- Níveis de Potência medidos com a antena log-periódica para dezesseis configurações das antenas monopolo no interior do automóvel.....	89
Figura 37- Valores calculados de campo elétrico para dezesseis configurações das antenas monopolo no interior do automóvel.....	90
Figura 38- Valores calculados da densidade de potência de onda plana equivalente para dezesseis configurações das antenas monopolo no interior do automóvel.....	90
Figura 39- Valores calculados de campo elétrico para várias posições das antenas de medição no exterior do automóvel e com as antenas monopolo no interior do mesmo ativas e inativas.....	94
Figura 40- Valores calculados de campo elétrico para várias posições das antenas de medição no exterior do automóvel e com as antenas monopolo no interior do mesmo ativas e inativas.....	96
Figura 41- Comparação dos valores calculados de campo elétrico para várias configurações das antenas monopolo no interior do automóvel e no espaço livre.....	99
Figura 42- Comparação entre os valores de potência para dezesseis configurações das antenas monopolo em quatro situações.....	103
Figura 43- Comparação entre os valores de campo elétrico para dezesseis configurações das antenas monopolo em quatro situações e o valor limite estabelecido pela norma.....	104
Figura 44- Comparação entre os valores de potência para dezesseis configurações das antenas monopolo em quatro situações, sendo estas posicionadas no plano 2 quando no interior do automóvel com o dipolo de duplo arco.....	112
Figura 45- Comparação entre os valores de campo elétrico para dezesseis configurações das antenas monopolo em quatro situações, sendo estas posicionadas no plano 2 quando no interior do automóvel com o dipolo de duplo arco, e o valor limite estabelecido pela norma.....	113
Figura 46- Comparação entre os valores de campo elétrico obtidos para os dois planos no interior do automóvel com o dipolo de duplo arco localizado na posição	

da antena monopolo 01.....	119
Figura 47- Comparação entre os valores de campo elétrico obtidos para os dois planos no interior do automóvel com o dipolo de duplo arco localizado na posição da antena monopolo 02.....	120
Figura 48- Comparação entre os valores de campo elétrico obtidos para os dois planos no interior do automóvel com o dipolo de duplo arco localizado na posição da antena monopolo 03.....	121
Figura 49- Comparação entre os valores de campo elétrico obtidos para os dois planos no interior do automóvel com o dipolo de duplo arco localizado na posição da antena monopolo 04.....	122

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Número de celulares por tecnologia .....	32
Tabela 2- 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).....	54
Tabela 3- Níveis de potência de telefones celulares 3G/UMTS (Wikipedia/dBm, 2011).....	64
Tabela 4- Valores medidos das impedâncias de entrada das antenas monopolo com frequência de operação de 2,045 GHz.....	82
Tabela 5 – Níveis de potência, de campo eletromagnético e de densidade de potência da onda plana equivalente dos monopolos operando em 2,045 GHz a 81 cm de distância da antena de medição.....	83
Tabela 6 – Níveis de potência, de campo eletromagnético e de densidade de potência da onda plana equivalente dos monopolos operando em 2,045 GHz a 1,20m de distância da antena de medição.....	83
Tabela 7- Valores de grandezas eletromagnéticas para quatro configurações de antenas monopolo no interior de uma câmara de reverberação com a presença do espalhador de modos.....	85
Tabela 8- Valores de grandezas eletromagnéticas para quatro configurações de antenas monopolo no interior de uma câmara de reverberação sem a presença do espalhador de modos.....	86
Tabela 9- Numeração designada para as várias configurações de status das antenas no interior do automóvel.....	87
Tabela 10- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição.....	88
Tabela 11- Valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente.....	89
Tabela 12- Valores medidos de potência nos terminais de entrada da antena de medição em volta do automóvel com as antenas monopolo no interior do mesmo dispostas na altura do plano 1 e com todas as janelas fechadas.....	92
Tabela 13- Valores medidos de potência nos terminais de entrada da antena de medição em volta do automóvel com as antenas monopolo no interior do mesmo dispostas na altura do plano 1 e com todas as janelas abertas.....	92
Tabela 14- Valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente em volta do automóvel com as antenas monopolo no interior do mesmo dispostas na altura do plano 1 e com todas as janelas fechadas.....	93
Tabela 15- Valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de	

onda plana equivalente em volta do automóvel com as antenas monopolo no interior do mesmo dispostas na altura do plano 1 e com todas as janelas abertas.....	93
Tabela 16- Valores medidos de potência nos terminais de entrada da antena de medição em volta do automóvel com as antenas monopolo no interior do mesmo dispostas na altura do plano 2 e com todas as janelas fechadas.....	94
Tabela 17- Valores medidos de potência nos terminais de entrada da antena de medição em volta do automóvel com as antenas monopolo no interior do mesmo dispostas na altura do plano 2 e com todas as janelas abertas.....	95
Tabela 18- Valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente em volta do automóvel com as antenas monopolo no interior do mesmo dispostas na altura do plano 2 e com todas as janelas fechadas.....	95
Tabela 19- Valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente em volta do automóvel com as antenas monopolo no interior do mesmo dispostas na altura do plano 2 e com todas as janelas abertas.....	96
Tabela 20- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição para a situação dos monopolos no espaço livre.....	98
Tabela 21- Valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para a situação das antenas monopolo dispostas no espaço livre.....	98
Tabela 22- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco localizada no banco do motorista para os monopolos situados no interior do automóvel (plano 1).....	101
Tabela 23- Valores medidos de tensão e valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para a situação das antenas monopolo dispostas no interior do automóvel utilizando como antena de medição dipolo de duplo arco localizada no banco do motorista (plano 1).....	103
Tabela 24- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro dianteiro (da antena 01) para os monopolos situados no interior do automóvel.....	105
Tabela 25- Valores medidos de tensão e calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para a situação das antenas monopolo dispostas no interior do automóvel utilizando como antena de medição dipolo de duplo arco localizada no banco do passageiro dianteiro (plano 1).....	106
Tabela 26- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco na posição do	

passageiro traseiro da antena 02 para os monopolos situados no interior do automóvel (plano 1).....	106
Tabela 27- Valores medidos de tensão e calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para a situação das antenas monopolo dispostas no interior do automóvel utilizando como antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro do banco traseiro- antena 02 (plano 1).....	107
Tabela 28- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro traseiro da antena 03 para os monopolos situados no interior do automóvel (plano 1).....	108
Tabela 29- Valores medidos de tensão e calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para os monopolos dispostos no interior do automóvel utilizando como antena de medição o dipolo de duplo arco na posição do passageiro do banco traseiro- antena 03 (plano 1).....	108
Tabela 30- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro traseiro da antena 04 para os monopolos situados no interior do automóvel (plano 1).....	109
Tabela 31- Valores medidos de tensão e calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para os monopolos dispostos no interior do automóvel utilizando como antena de medição o dipolo de duplo arco na posição do passageiro do banco traseiro- antena 04 (plano 1).....	110
Tabela 32- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco localizada no banco do motorista para os monopolos situados no interior do automóvel (plano 2).....	111
Tabela 33- Valores medidos de tensão e valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para a situação das antenas monopolo dispostas no interior do automóvel utilizando como antena de medição dipolo de duplo arco localizada no banco do motorista (plano 2).....	112
Tabela 34- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro dianteiro (da antena 01) para os monopolos situados no interior do automóvel- plano 2.....	114
Tabela 35- Valores medidos de tensão e calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para a situação das antenas monopolo dispostas no interior do automóvel utilizando como antena de medição dipolo de duplo arco localizada no banco do passageiro dianteiro (plano2).....	115

Tabela 36- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro traseiro da antena 02 para os monopolos situados no interior do automóvel(plano2).....	115
Tabela 37- Valores medidos de tensão e calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para a situação das antenas monopolo dispostas no interior do automóvel utilizando como antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro do banco traseiro- antena 02 (plano 2).....	116
Tabela 38- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro traseiro da antena 03 para os monopolos situados no interior do automóvel (plano 2).....	117
Tabela 39- Valores medidos de tensão e calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para a situação das antenas monopolo dispostas no interior do automóvel utilizando como antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro do banco traseiro- antena 03 (plano 2).....	117
Tabela 40- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro traseiro da antena 04 para os monopolos situados no interior do automóvel (plano 2).....	118
Tabela 41- Valores medidos de tensão e calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para os monopolos dispostos no interior do automóvel utilizando como antena de medição o dipolo de duplo arco na posição do passageiro do banco traseiro- antena 04 (plano 2).....	119

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS - Sistema de Bloqueio de Freios  
ANATEL - Agência Nacional de Telecomunicações  
ANSI - American National Standards Institute  
CEM – Campos Eletromagnéticos  
CIRC - Centro Internacional de Pesquisa sobre o Câncer  
CR - Câmara de Reverberação  
CST MWS - CST MICROWAVE STUDIO ®  
DEE - Departamento de Engenharia Elétrica  
EM- Eletromagnética  
GPS - Sistema de Posicionamento Global  
HSDPA- High-Speed Downlink Packet Access  
ICNIRP - Comissão Internacional para Proteção Contra Radiações Não Ionizantes  
IEEE - Institute of Electrical and Electronic Engineers  
ITU - União Internacional de Telecomunicações  
LEMA - Laboratório de Eletromagnetismo e Micro-ondas Aplicados  
OMS – Organização Mundial de Saúde  
RF - faixa de radiofrequências  
SAR - Taxa de Absorção Específica  
TE - Transversal elétrica  
TM - Transversal magnética  
UFCG – Universidade Federal de Campina Grande  
UMTS- 3G - Universal Mobile Telecommunications System- 3ª geração  
WCDMA- Wideband Code Division Multiple Access  
ZCU - Zona de Campo Uniforme

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\lambda/4$  - um quarto de comprimento de onda

GHz - Gigahertz

mm - milímetros

MHz - Megahertz

MKS - Sistema de unidades

kHz - kilohertz

Hz – Hertz

$\lambda$  - comprimento de onda

$c$  - velocidade da luz

$f$  - frequência

V/m - volt por metro

A/m - ampère por metro

$\alpha$  - fator de atenuação

$\phi$  e  $\psi$  - ângulos de fase arbitrários

$\beta$  - fator de fase expresso em radianos por metro (rad/m)

W/m<sup>2</sup> - watt por metro quadrado

$S_{eq}$  - Densidade de potência de onda plana equivalente

$E$  - intensidade de campo elétrico

$H$  - intensidade do campo magnético

$\eta_0$  - impedância intrínseca do espaço livre

$\sigma$  - condutividade elétrica

$\rho$  - peso específico de cada material

$\vec{E}$  - Vetor intensidade de campo elétrico (V/m)

$\vec{D}$  - Vetor densidade de fluxo elétrico (C/m<sup>2</sup>)

$\vec{H}$  - Vetor intensidade de campo magnético (A/m)

$\vec{B}$  - Vetor densidade de fluxo magnético (Wb/m<sup>2</sup>)

$\vec{J}_e$  - Vetor densidade de corrente de condução (A/m<sup>2</sup>)

$P_{ap}$  - Potência aplicada

$P_{irrad}$  - Potência irradiada

$P_r$  - Potência recebida

$S_{av}$  - Densidade de potência da onda incidente

$V_{rec}$  - Tensão nos terminais da antena de recepção

$E_{inc}$  - Campo elétrico incidente

$\Omega$  - ohms

$P_{ant}$  - Potência da antena de recepção;

$P_{anali}$  - Potência do sinal medida com o analisador;

$P_{cabo}$  - Perda ôhmica no cabo de alimentação;

$V_{antena}$  - Tensão nos terminais da antena de recepção;

$mW$  – miliwatt

dB - decibel

cm – centímetros

$dB\mu V$  – decibel microvolt

# SUMÁRIO

## CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO.....	22
1.1 Contexto.....	22
1.2 Caracterização do Problema .....	24
1.3 Revisão Bibliográfica .....	25
1.4 Objetivos .....	30
1.4.1 Objetivos Gerais.....	30
1.4.2 Objetivos Específicos .....	30
1.5 Organização do Texto .....	31

## CAPÍTULO 2

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....	32
2.1 Densidade de Aparelhos Celulares por Habitante .....	32
2.2 Ondas Eletromagnéticas .....	33
2.3 Taxa de Absorção Específica (SAR) .....	36
2.4 Mecanismos de Interação das Ondas Eletromagnéticas com o Corpo Humano .....	37
2.5 Equações de Maxwell .....	38
2.6 Cavidade Ressonante Retangular .....	40
2.7 Ambiente Eletromagnético em Estudo .....	44
2.8 Antenas.....	45
2.8.1 Caracterização de Antenas .....	45
2.8.2 Arranjo de Antenas.....	49
2.9 Fontes Eletromagnéticas da Pesquisa.....	50
2.10 Região de Campos Distantes.....	51
2.11 Normas e Limites de Exposição a Campos Eletromagnéticos.....	52
2.11.1 Resolução N <sup>o</sup> 303 da ANATEL .....	53

## CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS .....	56
3.1 Etapa 1: Construção e Calibração das Fontes Eletromagnéticas.....	58
3.1.1 Equipamentos Utilizados.....	58
3.1.2. Fontes de CEM .....	58
3.1.3 Níveis de Potência das Fontes EM .....	64
3.2 Etapa 2: Medições na Câmara de Reverberação .....	65
3.3 Etapa 3: Medições com a Antena Log-periódica .....	67
3.3.1 Antenas Log-periódicas .....	67
3.3.2 Experimento no Interior do Automóvel .....	68
3.3.3 Cálculo do Nível de Radiação Eletromagnética no Interior do Automóvel .....	70
3.3.4 Experimento na Região Externa do Automóvel .....	71
3.3.5 Medições no Espaço Livre com a Antena Log-periódica .....	73
3.4 Etapa 4: Medições com a Antena Dipolo de Duplo Arco.....	74
3.4.1 Características do Dipolo de Duplo Arco.....	74
3.4.2 Determinação do Fator de Antena do Dipolo de Duplo Arco.....	76
3.4.3 Experimento no Interior do Automóvel com a Antena Dipolo de Duplo Arco.....	77

## **CAPÍTULO 4**

<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	80
4.1 Características das Fontes EM Produzidas .....	80
4.2 Experimento Utilizando a Câmara de Reverberação .....	83
4.3 Experimentos com a Antena Log-periódica .....	87
4.3.1 Experimento no Interior do Automóvel.....	87
4.3.2 Experimento na Região Externa do Automóvel.....	91
4.3.3 Medições no Espaço Livre com a Antena Log-periódica.....	97
4.4 Experimento no Interior do Automóvel com a Antena Dipolo de Duplo Arco .....	100
4.4.1 Medições no Plano Horizontal 1 (1,12 m do Solo) .....	100
4.4.1.1 Antena de Medição Localizada no Banco do Motorista.....	101
4.4.1.2 Antena de Medição Localizada no Banco do Passageiro Dianteiro (Posição da Antena 01) .....	105
4.4.1.3 Antena de Medição Localizada no Banco do Passageiro Traseiro (Posição da Antena 02) .....	106
4.4.1.4 Antena de Medição Localizada no Banco do Passageiro Traseiro (Posição da Antena 03) .....	107
4.4.1.5 Antena de Medição Localizada no Banco do Passageiro Traseiro (Posição da Antena 04) .....	109
4.4.2 Medições no Plano Horizontal 2 (1,26 m do Solo) .....	110
4.4.2.1 Antena de Medição Localizada no Banco do Motorista (Plano 2).....	110
4.4.2.2 Antena de Medição Localizada no Banco do Passageiro Dianteiro (Posição da Antena 01 no Plano 2).....	114
4.4.2.3 Antena de Medição Localizada no Banco do Passageiro Traseiro (Posição da Antena 02 no Plano 2).....	115
4.4.2.4 Antena de Medição Localizada no Banco do Passageiro Traseiro (Posição da Antena 03 no Plano 2) .....	116
4.4.2.5 Antena de Medição Localizada no Banco do Passageiro Traseiro (Posição da Antena 04) .....	118
4.4.3 Comparação entre os Valores de Campo Elétrico Obtidos para os Dois Planos no Interior do Automóvel.....	119

## **CAPÍTULO 5**

<b>CONCLUSÕES</b> .....	123
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	127

## RESUMO

O telefone celular deixou de ser considerado um acessório de luxo e tornou-se um dispositivo indispensável com utilizações em várias áreas. Diante do crescente uso destes aparelhos pela população, da constatação através de estudos de que a exposição pública a CEM provenientes dos mesmos pode ser reforçada pela reflexão de micro-ondas em ambientes fechados e diante do recente anúncio da Organização Mundial de Saúde classificando as radiações emitidas por celulares como possivelmente cancerígenas para os seres humanos; tem crescido mundialmente a preocupação com os riscos à saúde que essa tecnologia pode apresentar. Neste trabalho será avaliada a distribuição de campo eletromagnético em um automóvel, com o intuito de fornecer subsídios para pesquisas futuras de forma a estimar o nível real de exposição ao qual os seres humanos estão submetidos. Foram realizadas diversas medições de grandezas elétricas para a determinação do campo eletromagnético produzido por antenas monopolo de  $\lambda/4$ , na frequência de operação de 2 GHz. Estas antenas foram posicionadas de modo a simular aparelhos celulares em uso por passageiros adultos no interior de um automóvel, considerando combinações de fontes ligadas (em uso) ou não. A partir dos resultados observados é possível constatar que no interior de um automóvel a exposição dos seres humanos a CEM é intensificada pela reflexão das ondas eletromagnéticas nas estruturas metálicas. Os valores obtidos não excedem os valores preconizados pelo regulamento, porém diante das incertezas científicas sobre este tema, é motivada a continuidade do estudo do efeito da reflexão de micro-ondas nos ambientes fechados de modo a investigar os possíveis impactos sobre a saúde.

**Palavras-Chave:** Campo Eletromagnético. Várias Fontes. Antenas Monopolo. Telefonia Celular.

## ABSTRACT

The cell phone is no longer considered a luxury accessory and became an indispensable device in use in several areas. The concern about the health risks that this technology can provide has grown globally thanks to the growing use of the devices by the population, by the finding that the public exposure to EMFs from the devices can be enhanced by the reflection of the microwave in indoors and thanks to the recent announcement of the World Health Organization classifying the radiation emitted by cell phones as possibly carcinogenic to humans. This paper will assess the distribution of electromagnetic field in a car, in order to provide a basis for future research and to estimate the actual level of exposure to which humans are submitted. There were a number of electrical measurements to determine the electromagnetic field produced by antennas monopole  $\lambda / 4$ , in the operating frequency of 2 GHz. These antennas were positioned to simulate cell phones in use by adult passengers in a car, considering combinations of power supplies in use or not. From the results observed, it is possible to see that, in a car, the exposure of humans to EMF is intensified by the reflection of electromagnetic waves in metallic structures. The observed values do not exceed the values recommended by the regulation, but in the face of scientific uncertainty on this issue, is motivated to continue studying the effect of the reflection of microwaves in closed environments, in order to investigate the possible impacts on health.

**Keywords: Electromagnetic Field. Various Power Sources. Monopole Antennas. Cellular Phone.**

# **CAPÍTULO 1**

## **INTRODUÇÃO**

### **1.1 Contexto**

Desde o princípio de sua existência, o homem esteve sujeito a riscos. Com isso, a procura por sanar esses riscos levou-o a evoluir, pois buscava maneiras de aperfeiçoar sua segurança e bem-estar. Com a modernização dos processos produtivos e o conseqüente aumento da divisão do trabalho, os perigos aos quais o homem em sociedade enfrenta sofreram uma série de alterações e, dependendo da ocupação, condição socioeconômica e local de residência, ele se encontra em menor ou maior segurança. Apesar disso, fenômenos naturais ainda acontecem inesperadamente, e o próprio avanço cultural e técnico fez com que a sociedade passasse a conviver, inclusive, com riscos provocados ou potencializados pelo próprio uso das tecnologias (Habermann, 2010).

Os campos eletromagnéticos (CEM) são produzidos por diferentes fontes, naturais ou artificiais. Nos últimos cem anos, a exposição aos CEM gerados artificialmente vem aumentando com a ampla utilização de equipamentos de transmissão de rádio e energia elétrica, que constituem elementos fundamentais nas sociedades industrializadas. Em contrapartida aos avanços tecnológicos, a suspeita de que os CEM possam trazer riscos à saúde tem levado à realização de vários estudos desde a década de 1970 (Habermann et. al, 2010).

Na década atual, o homem tornou-se dependente dos equipamentos de RF. O telefone celular, com suas inúmeras funcionalidades e utilização por todas as idades, deixou de ser considerado um acessório de luxo como há 20 anos e tornou-se um dispositivo indispensável em diversas profissões, com utilizações em comunicação, entretenimento, segurança e serviços.

Tendo em vista o aumento vertiginoso da utilização de telefones móveis por uma grande parcela da população, tem crescido também a preocupação

dos usuários, das autoridades governamentais e da comunidade científica em relação aos riscos à saúde que essa tecnologia pode apresentar.

Essa preocupação é motivada principalmente pelo fato que, embora sejam conhecidos os efeitos carcinogênicos devido à exposição à radiação ionizante e aos efeitos térmicos, agudos e de curta duração devido à exposição à radiação não ionizante, não existe concordância sobre os efeitos não térmicos em longo prazo gerados por radiações não ionizantes. Nelas estão incluídos os campos magnéticos estacionários, campos de frequência extremamente baixa, radiofrequências (micro-ondas), infravermelho, ultravioleta, radiação visível e campos acústicos como o ultra-som e o infra-som (Dode, 2010).

Em 31 de maio deste ano, as radiações emitidas por telefones celulares foram classificadas como "possivelmente cancerígena para os seres humanos" pela Organização Mundial de Saúde (OMS). A agência lista o uso do telefone móvel como potencial causador de câncer, mesma categoria do chumbo, escapamento de motor de carro e clorofórmio. Isto significa que não existem estudos suficientes a longo prazo para concluir se a radiação dos telefones celulares é segura, mas há dados suficientes que mostram uma possível conexão, e que os consumidores devem adotar o princípio da precaução, aprovado na Conferência Rio-92 (Araújo, 2010).

O regulamento adotado no Brasil pela Agência Nacional de Telecomunicações – ANATEL, resolução Nº 303 de 2 de julho de 2002, para a avaliação da exposição humana a campos eletromagnéticos de radiofrequência provenientes de estações transmissoras de serviços de telecomunicações, tem como referência os limites propostos pela Comissão Internacional para Proteção Contra Radiações Não Ionizantes- ICNIRP.

Alguns estudos relatam que a exposição pública a CEM provenientes de telefones celulares pode ser reforçada pela reflexão de micro-ondas em ambientes fechados, esses locais incluem elevadores, ônibus, trens, automóveis, etc. Neste trabalho será avaliada a distribuição de campo eletromagnético em um automóvel, com o intuito de fornecer subsídios para pesquisas futuras de forma a estimar o nível real de exposição ao qual os seres humanos estão submetidos (crianças, adultos e velhos), pois diante das limitações da tecnologia de medição do campo no interior do corpo humano,

faz-se necessário ao menos o fornecimento de dados com relação aos níveis aos quais os humanos estão expostos. Essas informações podem ser valiosas até na escolha da compra de um veículo, por exemplo, ou na restrição do uso no interior do mesmo que estiver com sua capacidade completa (veículo lotado).

## 1.2 Caracterização do Problema

Dentre as tendências globais, a crescente demanda por informação e comunicação tem gerado a necessidade de utilização de diversas fontes de ondas eletromagnéticas não-ionizantes, como telefones celulares, *iphones*, *bluetooth* e *tablets*. Nos automóveis modernos, além do incremento do número de aparelhos elétricos e eletrônicos presentes na constituição (painéis eletrônicos, sistema de bloqueio de freios (ABS), *airbags*, controle de combustível, alarme, sistema de posicionamento global (GPS) e a própria injeção eletrônica, entre outros) podem ser encontradas vários tipos de fontes de RF no interior dos mesmos como TV, aparelhos celulares, *laptops*, *palmtops*, *notetaker*, *netbooks*, etc. (Alfaro, 2006).

Em um futuro próximo, devido à crescente demanda por segurança, proteção e mobilidade sustentável, os carros serão dotados de sistemas automáticos de alerta para evitar acidentes e também para chamadas de emergência, aumentando assim o número de fontes de campo eletromagnético que serão introduzidas nestes ambientes. Além do mais, nos carros elétricos estarão presentes campos de baixa frequência.

Logo, cresce também a preocupação com o fato de que em um ambiente quase fechado, caso do automóvel, vários fenômenos de propagação ocorrem: as fontes de RF podem se comportar como um arranjo de antenas aumentando o ganho em uma dada direção; a estrutura metálica do carro favorece a reverberação dos campos eletromagnéticos em seu interior gerando combinações construtivas e destrutivas dos campos; as reflexões nas estruturas internas do veículo; e a presença dos passageiros no interior do mesmo ocasiona absorção do campo.

Neste trabalho, serão apresentados resultados de grandezas eletromagnéticas produzidas por antenas monopolo de  $\lambda/4$ , usada em

aparelhos móveis, operando na frequência de 2,045 GHz no interior de um automóvel.

O principal objetivo desta pesquisa é fornecer dados para avaliações de risco de exposição eletromagnética, particularmente em situações cotidianas e em uso de massa do telefone celular.

### **1.3 Revisão Bibliográfica**

O desenvolvimento de técnicas de avaliação da exposição a campos eletromagnéticos e o aperfeiçoamento de estudos epidemiológicos possibilitaram um refinamento das pesquisas nesse campo, porém os resultados ainda são controversos (Habermann, 2010).

Tanaka (1988) publicou um estudo sobre a distribuição de campo elétrico em um modelo de automóvel para um sistema de antenas montadas no interior do mesmo. Um experimento para a simulação de micro-ondas foi realizado em uma câmara anecóica eletromagnética na faixa de 4 GHz dentro de um automóvel miniaturizado, reduzido a 1/15 da escala real. Para modelo simplificado do automóvel foi utilizada uma caixa. A distribuição do campo elétrico interno do modelo foi estimada a partir de uma combinação dos modos ressonantes TE animados na caixa que foi considerada uma cavidade ressonante.

Nos últimos vinte anos, o número cada vez maior de terminais portáteis tem servido para aumentar o nível de preocupação com possíveis efeitos biológicos danosos das ondas eletromagnéticas absorvidas pelo corpo humano. Geralmente, quando o sistema de rádio móvel celular está funcionando e o terminal de transmissão é localizado nas proximidades da cabeça humana- menos de 7 mm- uma grande fração de energia irradiada pelo aparelho móvel é absorvida pelo usuário.

Hondou (2002) publicou um trabalho onde é constatado que o nível de campo eletromagnético em transportes públicos pode chegar ao nível de referência para exposição pública em geral (recomendação da ICNIRP) na vida diária. Isto é causado por uma propriedade fundamental do campo eletromagnético, ou seja, a reflexão. O nível de exposição encontrado foi muito

maior do que o estimado pela estrutura convencional de análise que assume que o nível diminui rapidamente com o inverso da distância ao quadrado entre a fonte e a pessoa afetada. Uma fórmula simples para o nível de exposição foi derivada pela aplicação energética para o campo eletromagnético. A fórmula revelou um potencial risco de exposição intensa.

O projeto Reflex, pesquisa de cooperação mundial financiado pela União Européia, iniciado em 2004 por doze laboratórios especializados em sete países, afirmou que a radiação eletromagnética emitida por telefones celulares pode afetar células humanas e causar danos ao DNA, ao alterar a função de certos genes, ativando-os ou desativando-os (Dode, 2010).

Hondou *et al.* (2006) mostraram que a exposição passiva ao telefone celular em dois ambientes: em um contêiner de aproximadamente 28 m<sup>2</sup> e em um elevador para as frequências de 1,2 e 1,4 GHz. Os resultados comprovaram que as reflexões de micro-ondas devem ser consideradas nas avaliações de risco de exposição eletromagnética na vida diária. Foi observado que em elevadores, o nível de exposição passiva é muito maior do que se pensava anteriormente. Outras localidades em que a exposição passiva é susceptível de ser reforçada inclui ônibus, trens e táxis. Com maiores níveis de exposição causados pela reflexão, os seres humanos podem ser passivamente expostos além dos níveis reportados para interferências eletromédicas e para os riscos à saúde.

O trabalho de Hondou é limitado a um ambiente completamente fechado, os resultados do mesmo corroboram com o fenômeno que ocorre no interior de uma câmara de reverberação, porém o tempo de exposição no interior de um elevador é curto, não demora mais que 1 minuto.

Alfaro (2006) desenvolveu em sua dissertação de mestrado uma metodologia de projeto e otimização de antenas para realização de testes de compatibilidade eletromagnética em automóveis. Para tanto, foi necessário considerar a distribuição do campo elétrico gerado pelas antenas dentro de uma câmara semi-anecóica de pequeno porte, situação normal para as condições de teste em automóveis segundo normas internacionais. O trabalho de Alfaro foi justificado pela importância da análise de compatibilidade eletromagnética em equipamentos eletrônicos frente aos vários avanços

tecnológicos envolvidos na construção de automóveis e os diferentes fenômenos eletromagnéticos existentes.

Contudo, a câmara anecóica se caracteriza como um ambiente fechado e não considera as reflexões nas paredes e no teto do veículo. Na presente pesquisa estes fatores são fundamentais na análise dos resultados.

Durante os últimos 10 anos, o valor da Taxa de Absorção Específica (SAR) tem sido o parâmetro padrão de dosimetria na definição da energia absorvida pelo o corpo humano exposto a radiação eletromagnética. Em particular, na RF e bandas de frequências de micro-ondas, a energia eletromagnética absorvida contribui para o aquecimento dos tecidos (Li Li *et al.*, 2010).

Anzaldi *et al.* (2007) publicaram um artigo no qual é analisada a influência das estruturas metálicas de um carro na taxa de absorção (SAR) produzida por um telefone celular sobre um modelo de corpo humano colocado em diferentes locais dentro do veículo, identificando os parâmetros relevantes responsáveis por essas alterações. A modelagem e análise de todo o sistema foi realizada por meio de simulações. Este trabalho utilizou apenas uma fonte de campo, apresentando apenas resultados simulados e não experimentais. O resultado mais relevante encontrado foi a mudança na impedância da fonte de CEM com operação em 835 MHz que afeta a energia irradiada alterando a distribuição da SAR.

Ruddle (2007) publicou um trabalho no qual é investigado o impacto da distribuição dos ocupantes de um automóvel sobre a ameaça a exposição a campos eletromagnéticos devido a um transmissor operando a 400 MHz. Para investigação foram utilizadas simulações numéricas para oito diferentes configurações de ocupação, envolvendo o motorista e até três passageiros. Foram determinados valores apenas simulados e não experimentais de SAR para 1g e 10g utilizando apenas uma fonte de campo.

A presença da estrutura do veículo resultou em uma maior média dos valores de SAR para todos os locais dos passageiros, mas os níveis de SAR são mais baixos no veículo para a posição do motorista. Concluiu-se que para a avaliação da exposição para o público em geral, os níveis de campo obtidos oferecem um fator de segurança para as configurações sob investigação (Ruddle, 2007).

Monebhurrin (2007) para realizar as medidas da potência total irradiada pelos telefones celulares 2G e 3G utilizou uma câmara de reverberação e uma câmara anecóica para realização de testes. Foi investigada numericamente a relação entre a potência total absorvida e a SAR (taxa de absorção específica) em uma massa de absorção mínima. O estudo foi realizado para as frequências de 900 MHz, 1800 MHz e 1950 MHz.

Ruddle (2009) publicou um novo trabalho onde foram avaliados, através de simulações numéricas, níveis de taxa de absorção específica (SAR) em ocupantes do veículo devido a fontes de transmissão operando a 900 MHz. As fontes consideradas foram uma antena externa e transmissores internos que não estavam em contato com o corpo. Foram empregados nas simulações simuladores humanos homogêneos para obter valores de SAR induzidos, investigando uma variedade de configurações de ocupação. Os níveis de SAR, encontrados na simulação e não experimentalmente com apenas uma fonte operando na frequência de 900 MHz, foram bem abaixo dos limites recomendados para exposição à radiação pelo público em geral para níveis típicos de potência.

Santos *et al.* (2009) publicaram um artigo no qual foram apresentados alguns dos resultados do estudo sobre a interferência da proximidade da parede da câmara anecóica em experiências de compatibilidade eletromagnética em veículos automotores. A proximidade do protótipo do carro com as paredes da câmara anecóica foram consideradas como causa de interferência na realização do experimento para medições de campo no interior do veículo. Assim, recomendou-se ao fazer um experimento de compatibilidade dentro de uma câmara semi anecóica, garantir uma distância segura das paredes da mesma. Uma vantagem do presente trabalho é a realização dos experimentos em um automóvel de dimensões reais e inserido no ambiente real.

Costa *et al.* (2010) publicaram um artigo no qual foi realizada uma avaliação da superposição de campo nas proximidades de usuários de telefones celulares para ambientes abertos. A simulação eletromagnética foi realizada com o software CST MICROWAVE STUDIO ® (CST MWS). Os resultados simulados para o campo eletromagnético apresentaram mudanças nas proximidades dos usuários passivos com a presença de mais de um

usuário de telefone celular (usuário ativo). O que valida a teoria e os resultados anteriores com relação à superposição dos campos e combinação em arranjos das fontes de RF para produzir um ganho de sinal.

Ruddle *et al.* (2010) investigaram as possíveis abordagens de SAR induzida em ocupantes de um veículo para avaliação do cumprimento das recomendações para a exposição à campo eletromagnético devido às transmissões de ondas de rádio. Foram realizadas simulações numéricas com modelos 3D baseados na geometria de veículos reais e simuladores humanos com tamanho e forma realistas. Os resultados foram obtidos para as transmissões de antenas operando nas frequências de 400 MHz, 900 MHz, 1,8 GHz e 2,4 GHz.

Comparando a média do campo no veículo com os níveis de referência sugeridos, os níveis de campo para as frequências de 400 MHz e 900 MHz oferecem um razoável fator de segurança para as restrições básicas. No entanto, a comparação dos resultados obtidos a partir de posições idênticas das fontes para as frequências de 900 MHz, 1,8 GHz e 2,4 GHz sugeriram que uma abordagem maior deve ser necessária para frequências acima de 1 GHz (Ruddle *et al.*, 2010).

O estudo dos CEM no Brasil ainda é incipiente, tornando-se necessário o aprofundamento de pesquisas que forneçam mais informações, como prevalência de exposição na população e os possíveis impactos na saúde decorrentes dessa exposição (Dode, 2010).

Portanto, apesar de todas as pesquisas realizadas sobre esse tema, têm-se ainda incertezas científicas que motivam o desenvolvimento de novos estudos visando mensurar essa exposição a CEM e investigar os possíveis impactos sobre a saúde. Essas incertezas incluem tanto os aspectos de precisão dos equipamentos utilizados e disponíveis, da capacidade de processamento e do método numérico utilizado, das incertezas no processo de medição, na reprodutibilidade dos valores, e da diversidade dos veículos, passageiros e tipos de fontes de RF.

Neste trabalho pretende-se diagnosticar o perfil do campo eletromagnético estabelecido em um automóvel da marca Fiat modelo Uno Mille por meio de uma série de medições *in situ* das grandezas eletromagnéticas de interesse envolvidas neste ambiente (campos elétricos,

campos magnéticos e densidade de potência da onda plana), para o caso de fontes polarizadas verticalmente.

Com base nestes resultados de medições e simulações, será realizada uma avaliação crítica de modo a comparar a situação estabelecida no ambiente estudado, interior do automóvel, com os limites de segurança preconizados por organismos competentes.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1. Gerais**

Contribuir com os estudos dos efeitos diretos e indiretos à exposição humana aos campos eletromagnéticos em ambientes quase-fechados na presença de várias fontes de RF. Utilizar um automóvel real como ambiente de medição e comparar os dados obtidos na pesquisa com os limites estabelecidos pelo órgão regulador.

### **1.4.2 Específicos**

- Identificar o tipo e polarização da fonte, antena, a ser utilizada como fonte de campo de RF;
- Identificar as características de blindagem e reverberação de um automóvel marca Fiat modelo Uno Mille;
- Realizar medições com diversas combinações possíveis das fontes no interior do veículo;
- Realizar medições na região de campos distantes da intensidade de campo elétrico proveniente de várias fontes (telefonia celular nas faixas de frequência do padrão UMTS, o qual possui atualmente maior número de transceptores móveis em utilização) em um automóvel obedecendo às normas para procedimentos de medição e calcular grandezas como campo magnético e densidade da onda plana equivalente;
- Comparar os resultados experimentais com as simulações realizadas em pesquisas realizadas anteriormente nas quais é calculado numericamente o

comportamento do campo eletromagnético em um modelo computacional de um veículo.

### **1.5 Organização do Texto**

O texto da dissertação está dividido em 5 capítulos. No Capítulo 2 é apresentada a fundamentação teórica com as principais teorias a respeito do tema. No Capítulo 3 é descrito todo o procedimento experimental deste trabalho dividido em quatro etapas: desenvolvimento das fontes de CEM, medições no interior de uma câmara de reverberação, medições no interior e exterior do automóvel e no espaço livre utilizando uma antena log-periódica como antena receptora e medições no interior do automóvel utilizando uma antena isotrópica denominada dipolo de duplo arco. No Capítulo 4 são apresentados e discutidos os resultados das medições de grandezas elétricas e os cálculos teóricos de grandezas eletromagnéticas realizados nos procedimentos descritos no Capítulo 3. No Capítulo 5 são abordadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2

### FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 2.1 Densidade de Aparelhos Celulares por Habitante

A evolução tecnológica tem promovido um grande impacto na sociedade atual. O telefone celular é incontestavelmente um dos equipamentos eletrônicos que mais tem evoluído em todo mundo, sendo símbolo de modernidade. É sabido que o número de transceptores móveis vendidos no Brasil, por exemplo, bate recorde a cada ano. Dados divulgados pela Anatel indicam que o Brasil terminou o mês de dezembro de 2010 com 202,9 milhões de celulares e uma densidade de 104,68 cel/100 habitantes (BRASIL, 2011). É mostrado na tabela 1 o número de celulares por tecnologia no Brasil. Por apresentar um maior crescimento em número de celulares e por ser o padrão 3G predominante no Brasil adotado por todas as operadoras, a presente pesquisa será desenvolvida na faixa de frequência do padrão UMTS (WCDMA/HSDPA)- 1900/2100 MHz- faixa locada pela Anatel para a implantação do 3G.

Em paralelo com o rápido crescimento da telefonia móvel celular, há também a preocupação a respeito dos possíveis riscos à saúde causados pela exposição aos campos eletromagnéticos emitidos por esses equipamentos de comunicação.

Tabela 1- Número de celulares por tecnologia

Tecnologia	dez/09	dez/10			
		Nº Celulares		Cresc. mês	Cresc. ano
GSM	156.581.825	178.108.707	87,76%	4.499.818	13,75%
WCDMA	4.090.659	14.613.895	7,20%	1.024.797	257,25%
CDMA	8.397.905	4.181.936	2,06%	-253.750	-50,20%
TDMA	311.304	25.440	0,01%	-11.506	-91,83%
AMPS	3.891	0	0,00%	0	-
Term. Dados	4.573.784	6.014.055	2,96%	150.688	31,49%
<b>Total</b>	<b>173.959.368</b>	<b>202.944.033</b>	<b>100,00%</b>	<b>5.410.047</b>	<b>16,66%</b>

Fonte: BRASIL, 2011.

## 2.2 Ondas Eletromagnéticas

As ondas eletromagnéticas utilizadas em comunicações móveis são o veículo da energia transportada através do espaço, na forma de campos elétricos e magnéticos variáveis no tempo. Exemplos típicos de ondas eletromagnéticas incluem as ondas de rádio, os sinais de TV, os feixes de radar e os raios luminosos. Todas as formas de ondas EM compartilham três características principais: todas elas viajam em alta velocidade; ao se propagarem, apresentam propriedades ondulatórias e são irradiadas a partir de uma fonte, sem a necessidade de um meio físico para propagação (Shadiku, 2004).

Alguns grandezas associadas às ondas eletromagnéticas são:

- Frequência: grandeza medida pelo número de oscilações (ciclos) por segundo. A quantidade de energia associada à onda eletromagnética depende de suas frequências  $f$  [ $s^{-1}$ , Hz].

$$f = \frac{1}{T} \quad (1)$$

Em que:

$T$  é o período.

- Comprimento de onda: distância, na direção de propagação, entre dois pontos sucessivos de uma onda periódica, nos quais a oscilação apresenta a mesma fase:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (2)$$

Em que:

$\lambda$  é o comprimento de onda, em metros;

$c$  é a velocidade da luz (aproximadamente 300.000 km/s)

$f$  é a frequência em kHz.

- Intensidade de campo elétrico (E): Amplitude da força exercida sobre uma carga elétrica estacionária positiva e unitária, localizada num ponto de um campo elétrico. Exprime-se em volt por metro (V/m).

- Intensidade de campo magnético (H): Grandeza vetorial que, juntamente com a densidade de fluxo magnético, especifica um campo magnético em qualquer ponto do espaço. Equivale à densidade de fluxo magnético dividida pela permeabilidade do meio. Exprime-se em ampère por metro (A/m).

Escolhendo-se a direção z para identificar o movimento da onda, os campos elétrico e magnético devem ser escritos no domínio do tempo por expressões do tipo (Ribeiro, 2008):

$$\vec{e}(t, z) = \vec{E}máx \times e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \phi) \hat{x} \quad (3.1)$$

$$\vec{h}(t, z) = \vec{H}máx \times e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z + \psi) \hat{y} \quad (3.2)$$

Em que:

$\phi$  e  $\psi$  são ângulos de fase arbitrários

$\beta$  é fator de fase expresso em radianos por metro (rad/m)

$\alpha$  é o fator de atenuação (Np/m)

- Densidade de potência: em radiopropagação, é a potência expressa em watt por metro quadrado  $\mathbf{S}$  [W/m<sup>2</sup>] que atravessa uma unidade de área normal à direção de propagação. Esse vetor  $\mathbf{S}$  é chamado vetor de Poynting, em homenagem a John Henry Poynting que foi o primeiro a definir suas propriedades (Halliday & Resnick).
- Densidade de potência da onda plana equivalente ( $S_{eq}$ ): Densidade de potência de uma onda plana que possua um determinado valor de intensidade de campo elétrico ou campo magnético. Exprime-se em watt por metro quadrado (W/m<sup>2</sup>) (Ribeiro, 2008).

$$S_{eq} = \frac{E^2}{\eta_o} = H^2 \times \eta_o \quad (4)$$

Em que:

$E$  é a intensidade de campo elétrico, em V/m;

$H$  é a intensidade do campo magnético, em A/m;

$\eta_o$  é a impedância intrínseca do espaço livre.

Longe da fonte geradora dos campos, isto é, na assim chamada região de campos distantes, os campos **E** e **H** formam sempre um ângulo de 90° entre si e a relação entre as intensidades de **E** e **H** é mantida constante em todos os pontos sendo dada por:

$$\mathbf{E}/\mathbf{H} = \eta_0 \quad (5)$$

que é a impedância intrínseca do espaço e vale  $120\pi$  ( $\cong 377\Omega$ ). Na Figura 1 é mostrado um exemplo de uma onda eletromagnética (Halliday & Resnick).

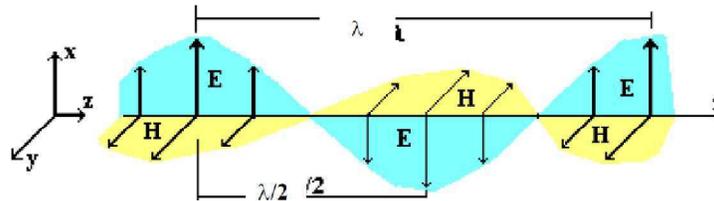


Figura 1: Campos elétrico e magnético perpendiculares entre si.

Outro termo freqüentemente empregado no estudo da propagação das ondas eletromagnéticas é a polarização da onda, que indica a direção do campo **E**. Na Figura 1 a onda tem polarização na direção x, se x indica a vertical, a polarização dita é vertical em qualquer ponto do espaço de propagação livre.

A grande distância da antena transmissora, livre de obstáculos, as ondas emitidas sempre têm as características de uma onda plana (Cabral, 2001).

A Figura 2 apresenta o espectro eletromagnético - conjunto de todas as frequências utilizadas pelos diversos tipos de osciladores ou geradores de ondas. Os sistemas de telefonia móvel celular usam ondas de frequências altas, acima de 800 MHz; diversas frequências do espectro são destinadas para estes sistemas. A faixa de radiofrequências (RF) na qual as ondas eletromagnéticas são transmitidas estende-se de 9.000 hertz (9 kHz) a 300 bilhões de hertz (300 GHz), conforme definido pela União Internacional de Telecomunicações (ITU) e inclui subdivisões tais como faixas de radiofrequência extra baixa, baixa, média, alta, muito alta, ultra alta, entre outras (BRASIL, 2011).

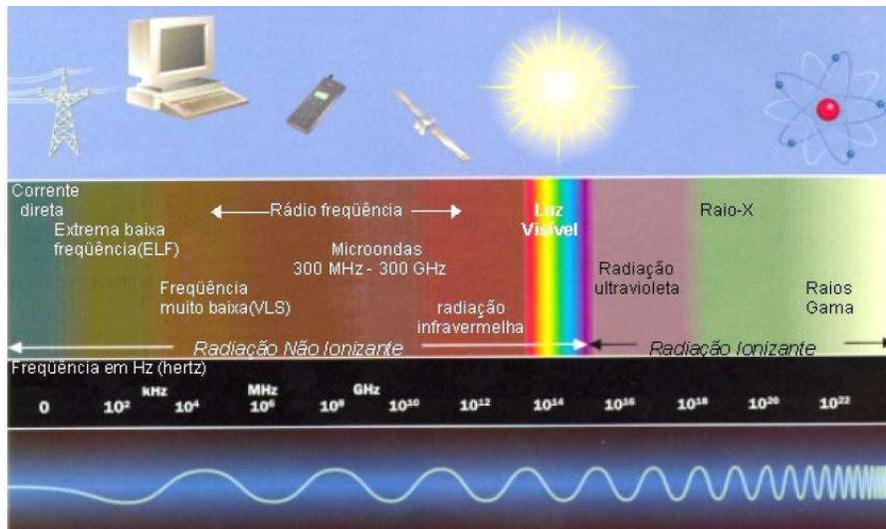


Figura 2- Espectro Eletromagnético (Rodríguez, 2001).

Com o aumento da frequência, a energia das ondas eletromagnéticas se torna maior, tornando-se necessário que se faça uma distinção entre ondas de radiofrequência (RF) que estão na faixa das radiações não ionizantes e ondas de frequências mais altas, que estão na faixa das radiações ionizantes.

As radiações ionizantes, nas quais estão incluídos a parte ultravioleta da luz solar (como os raios UVA e UVB) e o Raio X, por exemplo, estão localizadas na faixa de frequências acima de  $3 \times 10^{15}$  Hz e são capazes de produzir alterações químicas em tecidos do corpo. As ondas de radiofrequências são radiações não ionizantes e mesmo as de intensidade de radiação mais altas não podem alterar a formação química das moléculas, incluindo as de DNA, que codificam a informação biológica das células (BRASIL, 2011).

O objeto de estudo deste trabalho são as radiações não ionizantes na faixa de radiofrequências (RF) usadas pelos transceptores móveis para a transmissão (na região de campos distantes) e recepção.

### 2.3 Taxa de Absorção Específica (SAR)

Quando ondas eletromagnéticas incidem sobre tecidos com condutividade diferente de zero, a energia destas ondas dissipada por efeito Joule pode ser considerada como a energia depositada no tecido. Este

depósito de energia pode ser quantificado através da SAR dada pela seguinte expressão:

$$SAR = \frac{\sigma \cdot |E|^2}{2 \cdot \rho} \quad (6)$$

Em que  $|E|$  denota o módulo do campo elétrico na célula,  $\sigma$  a condutividade elétrica e  $\rho$  o peso específico de cada material.

## 2.4 Mecanismos de Interação das Ondas Eletromagnéticas com o Corpo Humano

As ondas eletromagnéticas quando interagem com o corpo humano, dependendo da frequência e da potência, produzem alguns tipos de efeitos biológicos. Tais efeitos, por si só, não significam necessariamente a existência de perigo. Um efeito biológico se tornará um risco à segurança quando ocorrer uma falha na saúde do indivíduo ou seus descendentes (Cruz, 2005).

As consequências dos mecanismos de interação de ondas eletromagnéticas não-ionizantes com sistemas biológicos podem ser classificadas em dois grupos:

- Efeitos térmicos → são causados pelo aquecimento dos tecidos como consequência da absorção de parte da onda incidente;
- Efeitos não térmicos → são devidos à interação direta com o organismo dos campos eletromagnéticos induzidos.

Dentre os possíveis efeitos térmicos citados na literatura, destaca-se a possibilidade da associação entre a exposição a campos eletromagnéticos não-ionizantes e o desenvolvimento de efeitos adversos, tais como alteração no fluxo de ions na membrana celular, alterações comportamentais, desenvolvimento de tumores, hipertermia, entre outros (Foster & Moulder, 2000).

Alguns efeitos “não térmicos” reportados na literatura incluem efeitos nos sistemas nervoso, cardiovascular e imunológico, bem como no metabolismo e em fatores hereditários (Salles, 2003).

## 2.5 Equações de Maxwell

As equações de Maxwell, conjugadas com as relações constitutivas e definições auxiliares, constituem o sistema básico de equações da eletricidade e do magnetismo clássicos, governando todos os fenômenos eletromagnéticos na faixa de frequências desde zero até as ondas de rádio das mais altas frequências (muitos fenômenos nas frequências da luz), e na faixa de dimensões acima das dimensões atômicas (Ramo et al., 1981). Considerando-se uma região do espaço livre de fontes de corrente elétrica e magnética, na forma diferencial, são:

Lei de Faraday:

$$\vec{\nabla} \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (7)$$

Estabelece que uma variação de campo magnético no tempo induz uma circulação de campo elétrico na região. Essa equação mostra que o campo elétrico  $\vec{E}$  variável no tempo é não conservativo ( $\vec{\nabla} \times \vec{E} \neq 0$ ).

Lei de Ampère:

$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \vec{J}_e + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \quad (8)$$

Estabelece que uma variação de intensidade de campo elétrico na região provoca a circulação de campo magnético, que também pode ser obtida pelo fluxo de cargas  $\vec{J}_e$ .

Lei de Gauss para o campo elétrico:

$$\vec{\nabla} \times \vec{D} = \rho \quad (9)$$

Lei de Gauss para o campo magnético:

$$\vec{\nabla} \times \vec{B} = 0 \quad (10)$$

As duas últimas determinam que, não havendo concentrações de cargas na região, as linhas de fluxo não irão divergir. Essa interação no espaço e tempo entre campo elétrico e campo magnético é que gera a onda eletromagnética.

Usando o sistema de unidades MKS, tem-se:

$\vec{E}$  - Vetor intensidade de campo elétrico (V/m)

$\vec{D}$  - Vetor densidade de fluxo elétrico (C/m<sup>2</sup>)

$\vec{H}$  - Vetor intensidade de campo magnético (A/m)

$\vec{B}$  - Vetor densidade de fluxo magnético (Wb/m<sup>2</sup>)

$\vec{J}_e$  - Vetor densidade de corrente de condução (A/m<sup>2</sup>)

As principais definições e relações auxiliares que devem ser acrescentadas para completar a informação vêm a seguir (Ramo et al., 1981):

1. A lei da força → a força sofrida por uma carga  $q$  que se move com velocidade  $\vec{v}$  através de um campo elétrico  $\vec{E}$  e de um campo magnético de densidade de fluxo  $\vec{B}$  é:

$$\vec{f} = q[\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}]N \quad (11)$$

2. A definição de corrente de condução (Lei de Ohm) em um condutor,

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} (A / m^2) \quad (12)$$

Em que  $\sigma$  é a condutividade em mho/metro.

3. A definição de corrente de convecção → para um densidade  $\rho$  de carga que se move com velocidade  $\vec{v}_p$  a densidade de corrente é

$$\vec{J} = \rho \vec{v}_p (A / m^2) \quad (13)$$

4. A definição de permissividade elétrica → A densidade  $\vec{D}$  de fluxo elétrico está relacionada ao campo elétrico  $\vec{E}$  de pela razão:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} = \epsilon_r \epsilon_0 \vec{E} \quad (14)$$

Em que  $\epsilon_0$  é o valor da permissividade no vácuo e  $\epsilon_r$  é a permissividade relativa, permissividade específica ou constante dielétrica.

5. A definição de permeabilidade magnética → A densidade  $\vec{B}$  do fluxo magnético está relacionada à intensidade de campo magnético  $\vec{H}$  por

$$\vec{B} = \mu \vec{H} = \mu_r \mu_0 \vec{H} \quad (15)$$

Em que  $\mu_0$  é a permeabilidade no vácuo =  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m e  $\mu_r$  chama-se permeabilidade relativa, permeabilidade específica ou constante magnética.

## 2.6 Cavidade Ressonante Retangular

Uma cavidade ressonante pode ser concebida como uma caixa condutora com a energia eletromagnética confinada no interior. As paredes condutoras agem efetivamente como blindagens perfeitas, de modo que esta região interior seja perfeitamente blindada do exterior, não sendo possível qualquer irradiação. Uma vez que as paredes internas da caixa servem como caminhos de corrente, a área grande desejada para fluxo de corrente é fornecida e as perdas são extremamente pequenas (Ramo et al., 1981).

As cavidades são empregadas em frequências a partir da metade da faixa de VHF, envolvendo dimensões de dezenas ou centenas de centímetros, até como elementos de seleção de frequência para geração de sinais ópticos nas faixas de infravermelho e superiores, em que são construídas por métodos especiais com extensões de micrometros (Ribeiro, 2008),

A solução dos campos no interior de uma cavidade retangular de ressonância pode ser obtida partindo-se diretamente das soluções correspondentes demonstradas para guias de ondas se for considerado que a cavidade é uma seção de um guia de ondas retangular em curto-circuito em ambas as extremidades (Bunting et al., 1998). Se adotarmos o ponto de vista de que um modo ressonante é o padrão de onda estacionária para os modos, incidente e refletido, qualquer uma dentre o número infinito de possíveis modos no guia de onda pode ser usada, com qualquer número inteiro de meios comprimentos de onda entre as extremidades em curto. Essa descrição de um padrão de campo particular não é única, pois depende do eixo escolhido para ser a “direção de propagação” para os modos do guia de onda. Portanto, um sistema de coordenadas será escolhido como na Figura 3 e aplicando as equações de Maxwell a uma cavidade retangular de paredes metálicas, os

padrões de campo serão obtidos superpondo as ondas incidente e refletida para vários modos do guia de onda que se propagam na direção z (Ramo et al., 1981).

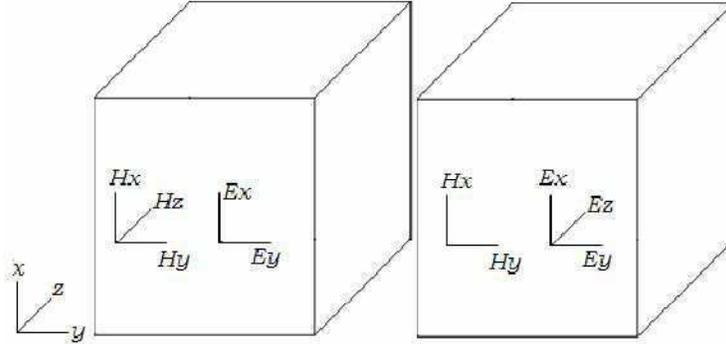


Figura 3- Componentes de campo dos modos TE e TM em uma cavidade retangular (Silva, 2008).

A designação dos modos TE e TM não é única já que se poderia ter definido x, y ou z como “direção de propagação” (na verdade não há propagação em nenhum sentido, mas ondas estacionárias em todas as direções). Por exemplo, um modo TE em relação ao eixo x pode ser um modo TM em relação ao eixo y. Adotando um dos eixos como direção de propagação, os modos são designados como  $TE_{mnp}$  e  $TM_{mnp}$ . Os índices m, n e p correspondem ao número de semiciclos de variação dos campos nas três direções espaciais.

Considerando “a” como a altura, “b” como o comprimento, “d” a largura da cavidade, “m” o modo de ressonância - número de possíveis caminhos de propagação da onda eletromagnética no interior da cavidade (Yu et al., 2003)- no eixo x, “n” o modo em y e “p” o modo em z, temos as equações de campo a seguir. Cada modo terá um autovalor discreto h.

- Para os modos  $TE_{mnp}$

$$E_x = \left(\frac{j\omega\mu_0}{h^2}\right) \left(\frac{n\pi}{b}\right) H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \text{sen}\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \text{sen}\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (16.a)$$

$$E_y = -\left(\frac{j\omega\mu_0}{h^2}\right) \left(\frac{m\pi}{a}\right) H_0 \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \text{sen}\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (16.b)$$

$$E_z = 0 \quad (16.c)$$

$$H_x = -\left(\frac{1}{h^2}\right) \left(\frac{m\pi}{a}\right) \left(\frac{p\pi}{d}\right) H_0 \text{sen}\left(\frac{m\pi x}{a}\right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right) \cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (16.d)$$

$$H_y = -\left(\frac{1}{h^2}\right)\left(\frac{n\pi}{b}\right)\left(\frac{p\pi}{d}\right)H_0\cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (16.e)$$

$$H_z = H_0\cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\sin\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (16.f)$$

$$h^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2 \quad (16.g)$$

Estas equações comprovam a defasagem entre as componentes. Observa-se que  $E_x$  e  $H_y$ ,  $E_y$  e  $H_x$  estão em quadratura de fase, pois quando uma delas for real, a outra é imaginária. Ao calcular o valor médio do vetor de Poynting, o resultado será nulo, indicando que não há transferência de potência no deslocamento das ondas incidente e refletida. Em outras direções que se adotar como sentido original de propagação, as componentes transversais de campo elétrico e magnético obedecem a esta condição. Logo, em condições ideais, existe energia só na cavidade.

- Para os modos  $TM_{mnp}$

$$E_x = -\left(\frac{1}{h^2}\right)\left(\frac{m\pi}{a}\right)\left(\frac{p\pi}{d}\right)E_0\cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\sin\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (17.a)$$

$$E_y = -\left(\frac{1}{h^2}\right)\left(\frac{n\pi}{b}\right)\left(\frac{p\pi}{d}\right)E_0\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\sin\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (17.b)$$

$$E_z = E_0\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (17.c)$$

$$H_x = \left(\frac{j\omega\epsilon_0}{h^2}\right)\left(\frac{n\pi}{b}\right)E_0\sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (17.d)$$

$$H_y = -\left(\frac{j\omega\epsilon_0}{h^2}\right)\left(\frac{m\pi}{a}\right)E_0\cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (17.e)$$

$$H_z = 0 \quad (17.f)$$

$$h^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2 \quad (17.g)$$

Mais uma vez, as componentes transversais dos campos elétrico e magnético estão em quadratura de fase, o valor médio do vetor de Poynting é zero, indicando apenas energia armazenada.

Em relação aos índices  $m$ ,  $n$  e  $p$ , pode-se mostrar que pelo menos dois deles devem ser não nulos. Em outras palavras, os modos TE ou TM “000”, “m00”, “0n0” e “00p” não são permitidos numa cavidade retangular já que tais modos correspondem a campos identicamente nulos.

As frequências de ressonância da cavidade podem ser encontradas utilizando a equação (Ribeiro, 2008):

$$f_0 = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (18)$$

Considerando-se que  $a$  é a maior dimensão transversal da cavidade retangular e que seja possível alterar as dimensões  $b$  e  $d$ , a menor frequência de ressonância encontrada ou modo dominante faz referência ao modo TE<sub>011</sub> dada por (Ribeiro, 2008):

$$f_{oTE011} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{1}{b}\right)^2 + \left(\frac{1}{d}\right)^2} \quad (19)$$

Para aplicações reais, é interessante saber o número de modos possíveis em uma determinada frequência. Em uma aproximação para uma cavidade vazia retangular, o número de modos ressonantes é dado por (Garbe, 2002):

$$N_s(f) = \frac{8\pi}{3} abd \left(\frac{f}{c_0}\right)^3 - (a+b+d) \frac{f}{c_0} + \frac{1}{2} \quad (20)$$

Onde  $C_0$  é a velocidade da luz.

## 2.7 Ambiente Eletromagnético em Estudo

O ambiente eletromagnético de um veículo está definido por valores e grandezas elétricas tais como tensões e correntes nos condutores ou campos eletromagnéticos no espaço, consequência dos fenômenos eletromagnéticos que estão presentes e que envolvem o automóvel, conforme a Figura 4 (Alfaro, 2006).

Basicamente um automóvel pode ser considerado como uma cavidade de ressonância retangular. Idealmente, o campo tomado em um ponto qualquer do interior dessa cavidade é a soma de diversas ondas estacionárias existentes devido às múltiplas reflexões (Silva, 2008).

No interior de ambientes com paredes metálicas, como um automóvel por exemplo, a existência de um ou mais ocupantes perturba a distribuição de micro-ondas, que geralmente diminui a intensidade de absorção, mas pode aumentar a intensidade das reflexões locais. Um estudo entre os dois casos (com e sem ocupante) mostrou que o efeito de um absorvedor na distribuição global de micro-ondas é insignificante em comparação com a ordem de reforço da intensidade de reflexão (Hondou, 2006).

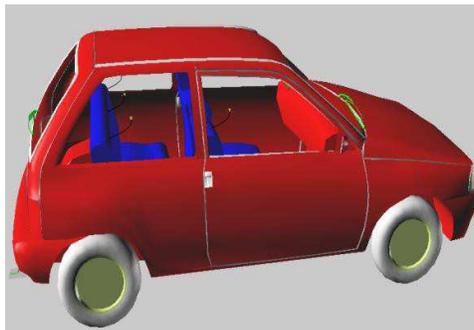
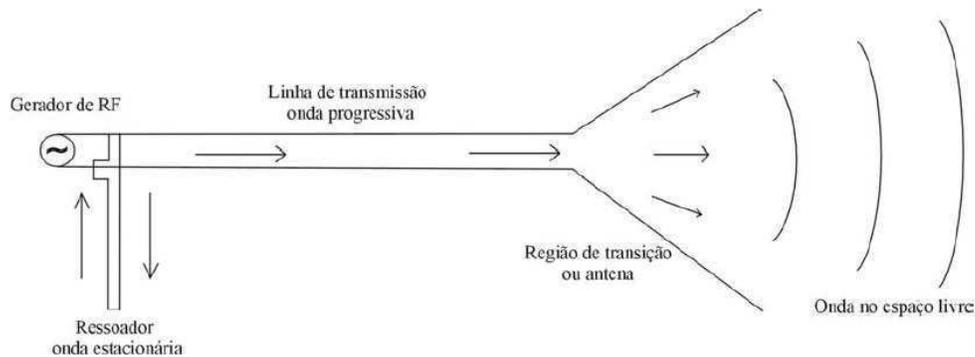


Figura 4- Ambientes fechado em estudo (desenho em software CAD).

O comportamento do campo elétrico no ambiente interno de um veículo com a presença de fontes de radiação eletromagnética pode ser obtido utilizando-se de simulações em softwares como o CST Microwave Studio bem como outros fundamentados em métodos numéricos de análise como o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (Girard et al., 2006).

### 3.8 Antenas

Na norma IEEE Definições Padronizadas de Termos para antenas (*IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas- IEEE Std 145- 1983*), uma antena é definida como “um dispositivo para a radiação ou a recepção de ondas de rádio”. Em outras palavras, uma antena é a estrutura intermediária entre o espaço livre e o dispositivo de guiamento, como mostrado na Figura 5 (Balanis,2005).



**Figura 5:** Representação da região de transição entre uma onda guiada e uma onda no espaço livre.

#### 3.8.1 Caracterização de Antenas

Para descrever o desempenho de uma antena, a definição de diversos parâmetros se faz necessária. As definições de alguns parâmetros serão feitas a seguir.

**(a) Diagrama de Irradiação:** o diagrama de irradiação de uma antena, ou simplesmente o diagrama da antena, é definido como “uma função matemática ou representação gráfica das propriedades de radiação da antena em função de coordenadas espaciais. Na maioria dos casos, o diagrama de radiação é determinado na região de campo distante e é representado como função das coordenadas direcionais. As propriedades de radiação incluem densidade de fluxo de potência, intensidade de irradiação, intensidade de campo, diretividade, fase ou polarização”. A propriedade de radiação de maior interesse é a distribuição bi ou tridimensional de energia radiada em função da

posição do observador ao longo de um percurso ou superfície de raio constante (Balanis, 2005).

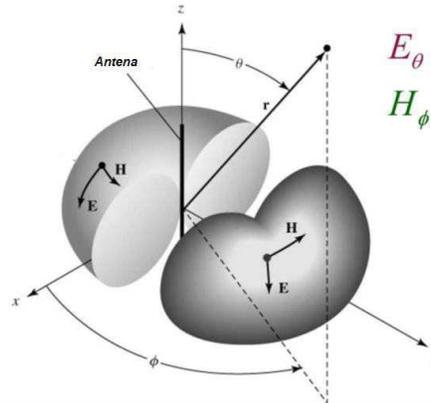


Figura 6- Diagrama de antena omnidirecional (Balanis, 2005).

**(b) Diretividade:** A habilidade de uma antena em concentrar a potência radiada em uma dada direção, ou inversamente, absorver a potência incidente a partir daquela direção, é definida como “diretividade da antena segundo determinada direção”. Em outras palavras a diretividade indica até que ponto a antena é capaz de concentrar energia segundo um ângulo sólido limitado; quanto menor esse ângulo, maior a diretividade (Esteves, 1980).

Quantitativamente, define-se diretividade como a razão entre a densidade de potência radiada, em determinada direção de interesse, e a densidade média de potência irradiada, isto é:

$$D(\theta_0, \phi_0) = \frac{S(\theta_0, \phi_0)}{P_r / 4\pi r^2} \quad (21)$$

**(c) Eficiência:** A eficiência é expressa pela razão entre a potência aplicada  $P_{ap}$  e a potência irradiada  $P_{irrad}$  se uma potência  $P_{ap}$  é aplicada a uma antena e somente  $P_{irrad}$  é irradiada, a diferença é consumida através de perdas ôhmicas, bem como por outras perdas inerentes da própria antena, como por exemplo, um plano de terra pouco eficiente para antenas monopolos (Paul and Nasar, 1987).

$$e = \frac{P_{irrad}}{P_{ap}} \quad (22)$$

(d) **Abertura efetiva:** A abertura efetiva  $A_e$  de uma antena está relacionada com sua capacidade de extrair energia de uma onda eletromagnética incidente. A abertura efetiva de uma antena é expressa pela razão entre a potência recebida  $P_r$  e a densidade de potência da onda incidente  $S_{av}$ , quando as polarizações da onda incidente e da antena receptora são as mesmas (Paul and Nasar,1987).

$$A_e = \frac{P_r}{S_{av}} \quad (23)$$

(e) **Fator de antena:** Se uma antena estiver conectada a um receptor como, por exemplo, um analisador de espectro, como mostra a Figura 7 a tensão medida por este instrumento é chamada de  $V_{rec}$  e é desejável que se relacione com a tensão recebida relativa ao campo elétrico incidente  $E_{inc}$ . Esta relação é feita através do fator de antena que é definido como a razão entre o campo elétrico incidente na superfície da antena de medida e a tensão percebida nos terminais da antena (Paul, 1992).

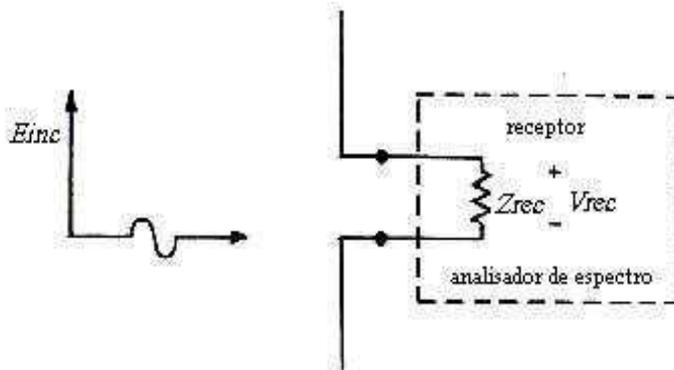


Figura 7- Antena dipolo usada como receptor para medir intensidade de campo elétrico de uma onda polarizada linearmente.

$$AF = \frac{V_m \text{ (na onda incidente)}}{V \text{ (recebida)}} \quad (\text{em 1/m}) \quad (24)$$

$$= \frac{|\hat{E}_{inc}|}{|\hat{V}_{rec}|}$$

Este é frequentemente expresso em dB como:

$$AF_{dB} = dB_{\mu V/m}(\text{campo incidente}) - dB_{\mu V}(\text{tensão recebida}) - \text{Perdas no cabo (dB)} \quad (25)$$

$$dB_{\mu V/m}(\text{campo incidente}) = dB_{\mu V}(\text{tensão recebida}) + AF_{dB} + \text{Perdas no cabo (dB)} \quad (26)$$

Apesar da unidade do fator de antena ser 1/m, o fator de antena é frequentemente expresso em dB. Comumente um gráfico do fator de antena versus frequência (na faixa de uso objetivado pela antena de medição) é fornecido pelo fabricante da antena.

A relação entre os valores conhecidos de campo incidente e a tensão medida nos terminais da antena em dB, de acordo com as equações 24, 25 e 26, é esboçada para o fator de antena versus frequência.

Existem inúmeras suposições importantes implícitas nestes dados de medição do fator de antena. De modo que de qualquer dessas suposições implícitas não for considerada durante o uso desta antena para medição, então os dados medidos são inválidos.

- A primeira suposição importante é que o campo incidente é polarizado para a máxima resposta da antena. Para um dipolo ou outra antena tipo fio, isto significa que a resposta será a componente do campo incidente que é paralela ao eixo da antena.
- A segunda suposição importante é fazer com que a impedância de entrada do receptor seja usada não apenas para fazer a medição, mas também para calibrar a antena. A impedância mais comum é a típica impedância de entrada para praticamente todos os analisadores de espectro, que é de 50Ω. Todavia, o fabricante de antena pode explicitamente declarar qual a impedância terminal usada na calibração. Percebe-se que isto não assegura que o receptor está casado com a antena e normalmente ele não estará.

### 3.8.2 Arranjo de Antenas

Em diversas aplicações é necessário projetar antenas com características muito diretivas (ganhos muito elevados) para atender os requisitos de comunicação de longa distância. Isso somente pode ser conseguido aumentando-se o tamanho elétrico da antena.

Ampliar as dimensões de elementos isolados geralmente resulta em características mais diretivas. Uma outra maneira de se aumentar as dimensões da antena sem necessariamente aumentar o tamanho dos elementos individuais é formar, em configuração elétrica ou geométrica, um agrupamento de elementos radiantes. Esta nova antena, consistindo em múltiplos elementos é denominada arranjo ou conjunto. Na maioria dos casos os elementos de um conjunto são idênticos. Isso não é necessário, mas é conveniente, mais simples e prático. Os elementos individuais de um conjunto podem ter diversas formas (fios, aberturas, etc.) (Balanis, 2005).

O campo total do conjunto é determinado pela adição vetorial dos campos radiados pelos elementos individuais. Isso implica admitir que a corrente em cada elemento é igual à do elemento isolado (desprezando-se o acoplamento). Em geral este não é o caso, e as correntes dependem da separação entre os elementos. Para conseguir diagramas bem direcionais é necessário que os campos dos elementos do conjunto interfiram construtivamente (somem) nas direções desejadas e interfiram destrutivamente (cancelem-se mutuamente) no restante do espaço. Idealmente isso pode ser conseguido, mas na prática apenas aproximadamente. Em um conjunto de elementos idênticos há, pelo menos, cinco mecanismos de controle que podem ser usados para dar forma ao diagrama total da antena. São estes:

1. a configuração geométrica do conjunto global (colinear, circular, retangular, esférica, etc.)
2. a separação relativa entre elementos
3. a amplitude da excitação dos elementos individuais
4. a fase de excitação dos elementos individuais
5. o diagrama relativo dos elementos individuais

Há uma grande variedade de conjuntos de antenas usados para aplicações pessoais, comerciais e militares empregando diferentes elementos, como dipolos, quadros, aberturas, microfitas, cornetas, refletores, etc. Um conjunto é mostrado na Figura 8 (Balanis, 2005).



Figura 8- Arranjo triangular de dipolos usado como antena setorial de estação-base para comunicação móvel.

### **3.9 Fontes Eletromagnéticas da Pesquisa**

Na presente pesquisa foram adotadas como fontes de campo eletromagnético as antenas monopolo de um quarto de comprimento de onda operando com polarização vertical nas faixas de frequência do padrão UMTS, conforme Figura 9. O motivo para a referida adoção é que dipolos e monopolos são os dois tipos de antenas mais usados em sistemas de comunicação sem fio.

Os monopolos, devido à sua simplicidade de construção são talvez os elementos de antena mais comuns para equipamentos portáteis, como telefones celulares, telefones sem fio, automóveis, trens, etc. As características de eficiência de radiação e ganho desses elementos são fortemente influenciadas por seu comprimento elétrico, que está relacionado com a frequência de operação. Em uma unidade portátil, como um telefone celular, a

posição do elemento monopolo na unidade influencia o diagrama de irradiação, mas não tem grande efeito sobre a impedância de entrada e frequência de ressonância. Além de seu uso em sistemas de comunicação móvel, o monopolo de um quarto de comprimento de onda é muito popular em diversas aplicações (Balanis, 2005).

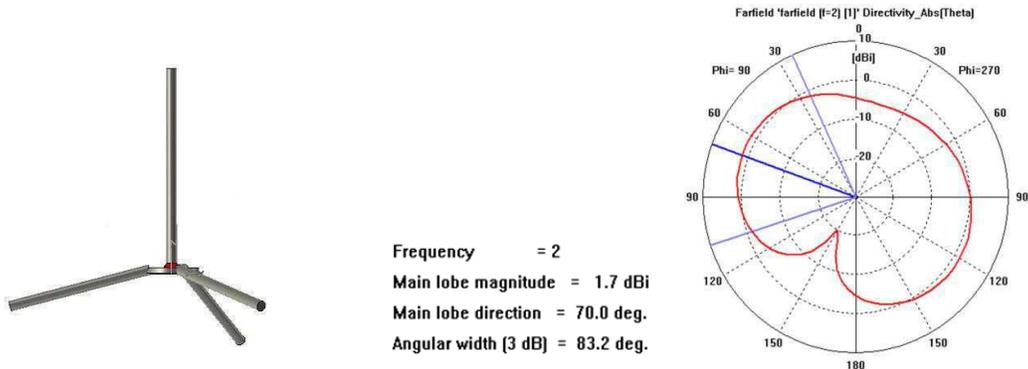


Figura 9- Antena monopolo de  $1/4\lambda$  operando em 2GHz e seu diagrama de irradiação vertical: modelagem e simulação com o software MS-CST.

### 3.10 Região de Campos Distantes

É a região do espaço onde os campos elétrico e magnético possuem características aproximadamente de onda plana e as componentes de campo elétrico e magnético são perpendiculares entre si e ambas são transversais à direção de propagação. A região de campos distantes pode ser determinada a partir das condições relacionadas a seguir (Bansal, 1999):

$$r > \frac{2D^2}{\lambda} \text{ quando } D > 2,5\lambda \quad (27. a)$$

$$r > 1,6\lambda \text{ quando } D < \frac{1}{3}\lambda \quad (27.b)$$

$$r > 5D \text{ quando } \frac{1}{3}\lambda < D < 2,5\lambda \quad (27.c)$$

Em que:  $r$  é a distância da antena à região de campos distantes [m];  $D$  é a máxima dimensão linear da antena [m];  $\lambda$  é o comprimento de onda na frequência de medida [m].

## 2.11 Normas e Limites de Exposição a Campos Eletromagnéticos

As normas para regulamentação dos limites de segurança estabelecem os critérios de segurança e os níveis-limite baseados em evidências científicas sobre o aparecimento de determinadas perturbações ou efeitos danosos, os quais se desejam suprimir ou evitar. Dentre os efeitos biológicos resultantes da interação de campos eletromagnéticos com o corpo humano, os térmicos têm sido estudados há muitas décadas (Bernhart, 1992; Bronzino, 1995; Grant, 1981), e os resultados de absorção dos campos eletromagnéticos por diferentes tipos de tecidos são relativamente bem conhecidos, existindo mesmo normas internacionalmente aceitas que estabelecem limites em função da frequência de operação, do tempo de exposição, do tipo de usuário, etc., como as normas IEEE/ANSI (1992) e ICNIRP (1998) – a rigor, uma diretriz reconhecida pela Organização Mundial de Saúde- OMS.

No Brasil, a avaliação da exposição humana a CEM de radiofrequências foi inicialmente regulamentada pela Resolução nº 303 de 2002 da Agência Nacional de Telecomunicações- ANATEL. Foi criada pela Agência com o objetivo de estabelecer mecanismos que possibilitem a manutenção efetiva e rigorosa da administração do uso do espectro de radiofrequências quanto a este aspecto. Os limites de exposição humana no país foram estabelecidos pela Lei nº 11.934, de 5 de maio de 2009, seguindo as recomendações da OMS. De acordo com os estudos desenvolvidos pela mesma, não há evidências científicas convincentes de que a exposição humana a valores de campos eletromagnéticos abaixo dos limites estabelecidos cause efeitos adversos à saúde (BRASIL, 2011).

O Centro Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (CIRC), agência especializada da Organização Mundial da Saúde (OMS), anunciou no dia 31 de maio de 2011 que o uso de telefones celulares deve ser considerado como fator "possivelmente cancerígeno para o ser humano" (Camargo, 2011).

Os limites de exposição são variáveis com a frequência, por considerar os efeitos, dentre outros, da profundidade pelicular, que leva a menor profundidade de penetração dos campos eletromagnéticos em frequências mais elevadas. Estes limites podem ser estabelecidos em intensidade de campo elétrico (V/m), de campo magnético (A/m), ambos mais utilizados em

frequências mais baixas, por exemplo, até algumas centenas de MHz, ou em densidade de potência ( $\text{mW}/\text{cm}^2$  ou  $\text{W}/\text{m}^2$ ), normalmente mais utilizada acima de algumas centenas de MHz. Por outro lado, um parâmetro dosimétrico largamente utilizado é a taxa de absorção específica (SAR) em tecidos biológicos (Salles, 2003).

Portanto, os limites preconizados pelos documentos em epígrafe serão fundamentais para a presente pesquisa, pois definem o diagnóstico de um ambiente, classificando-o como adequado ou não para a saúde dos seres vivos.

### **2.11.1 Resolução Nº 303 da ANATEL**

Em 15 de julho de 1999, o Conselho Diretor da ANATEL deliberou a adoção dos limites propostos pela Comissão Internacional para Proteção Contra Radiações Não Ionizantes- ICNIRP, como referência provisória para exposição humana a CEMRF provenientes de estações transmissoras de serviços de telecomunicações.

Em 2 de julho de 2002 foram sancionados na Resolução n.º 303 da ANATEL os limites de exposição a CEMRF entre 9 kHz e 300 GHz baseados nas normas da ICNIRP.

Segundo o anexo à resolução no Título II, ela tem por objetivo estabelecer limites para a exposição humana a CEMRF, associados à operação de estações transmissoras de radiocomunicação de serviços de telecomunicações, bem como definir métodos de avaliação e procedimentos a serem observados quando do licenciamento de estações de radiocomunicação, no que diz respeito a aspectos relacionados à exposição a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos na referida faixa de radiofrequências.

Os limites de exposição estabelecidos no regulamento referem-se à exposição ocupacional bem como à exposição da população em geral a CEMRF na faixa de frequência entre 9 KHz e 300 GHz. Como na presente pesquisa, o ambiente quase fechado em estudo se enquadra na situação de exposição não controlada, foram usados valores os limites para exposição da população em geral, apresentados na Tabela 2 desse documento.

Tabela 2. 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).

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

Os limites de exposição estabelecidos na Tabela 2 se referem às médias espacial e temporal das grandezas indicadas, sendo que o pico máximo de exposição nunca deve ser maior que 25 vezes do valor calculado na referida tabela. Para radiofrequências entre 100 KHz e 10 GHz, o período de tempo a ser utilizado para cálculo da média temporal é de 6 (seis) minutos (BRASIL, 2002)

Os limites dos valores de pico dos campos elétricos, para radiofrequências acima de 100 kHz, constam da Figura 10.

Para a fase experimental da pesquisa foram considerados os artigos pertencentes ao Capítulo IV (Dos Métodos de Medição) do Título III (Da Verificação do Atendimento aos Limites) do anexo à Resolução, onde constam a definição dos métodos e técnicas de medição que devem ser aplicados para a obtenção adequada das grandezas elétricas de interesse, garantindo assim a reprodutibilidade e precisão dos resultados.

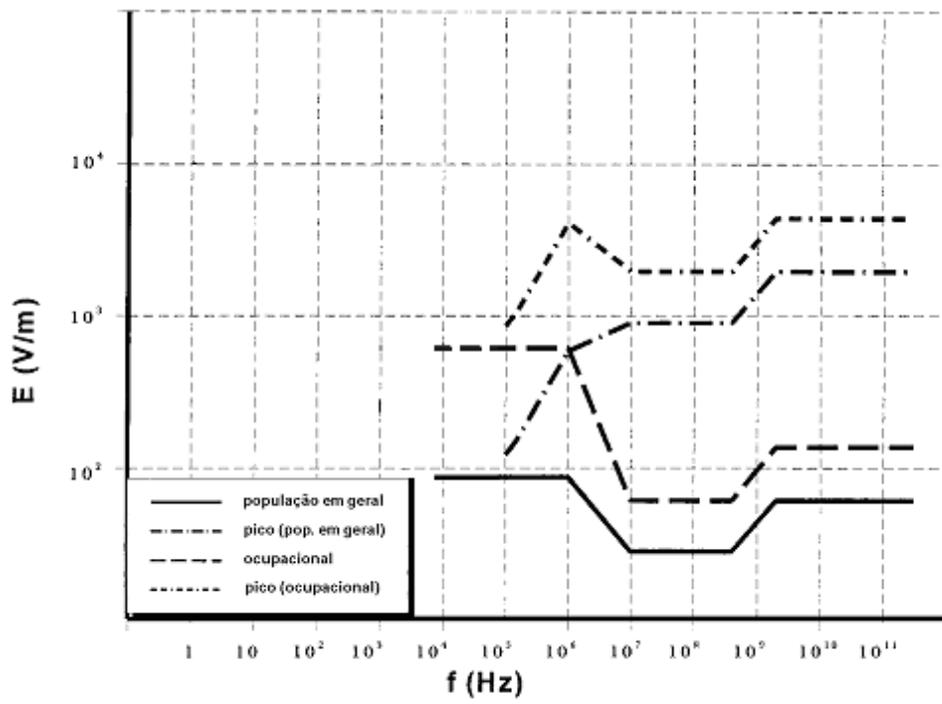


Figura 10 - Limites para exposição a campos elétricos [BRASIL, 2002].

## **CAPÍTULO 3**

### **MATERIAIS E MÉTODOS**

A parte experimental deste trabalho foi desenvolvida em quatro etapas a saber:

- Primeira etapa: construção e calibração das fontes de campo eletromagnético;
- Segunda etapa: medições dos campos provenientes das antenas construídas na etapa anterior, no interior de uma câmara de reverberação;
- Terceira etapa: medições de grandezas eletromagnéticas no interior e exterior de um automóvel utilizando uma antena log-periódica como antena receptora;
- Quarta etapa: medições de grandezas eletromagnéticas no interior de um automóvel utilizando uma antena dipolo de duplo arco como antena receptora.

Diversos fatores influenciam a distribuição dos campos eletromagnéticos o que é refletido nos resultados das medições efetuadas no interior e exterior do automóvel, tais como: a potência das fontes eletromagnéticas, as distâncias das fontes à antena de medição, a polarização da antena de medição, as posições relativas das fontes EM e da antena de medição no interior do carro devido à ocorrência de reflexões, entre outros fenômenos. Assim, visando assegurar reprodutibilidade para a realização dos experimentos e bem como precisão dos resultados, foi adotada uma metodologia que permite verificação de muitas possibilidades de configurações das fontes e de posicionamento da antena de medição com várias repetições de medição. Para tanto foram usadas como referência, a Resolução n.º 303 da ANATEL para os limites de exposição à CEMRF entre 9 kHz e 300 GHz (baseados nas normas da ICNIRP) bem como várias outras referências bibliográficas.

Do anexo à Resolução n.º 303 da ANATEL, foram considerados na fase experimental os seguintes artigos pertencentes ao capítulo IV (Dos Métodos de Medição) do Título III (Da Verificação do Atendimento aos Limites) onde constam a definição dos métodos e técnicas de medição que devem ser aplicados para a obtenção adequada das grandezas elétricas de interesse:

- ✓ Art. 32. Na demonstração do atendimento aos limites de exposição por meio de medições, devem ser utilizados os valores máximos autorizados dos parâmetros de transmissão de cada estação analisada.
- ✓ Art. 33. Todas as medições devem ser efetuadas com equipamentos devidamente calibrados, dentro das especificações do fabricante e devem abranger toda a faixa de radiofrequências de interesse. A descrição dos equipamentos de medição, incluindo marca, modelo e número de série deve constar do Relatório de Conformidade.
- ✓ Art. 34. Na demonstração do atendimento aos limites de exposição por meio de medições, devem ser consideradas as incertezas e erros especificados pelos fabricantes dos instrumentos utilizados.
- ✓ Art. 35. As medições dos CEMRF devem ser efetuadas na ausência de pessoas potencialmente expostas. Para avaliação das correntes induzidas no corpo, nos casos em que sejam necessárias, as medições devem ser efetuadas diretamente nos indivíduos expostos.
- ✓ Art. 37. Inciso II. 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.
- ✓ Art. 46. Na realização de medições, a interação entre os CEMRF incidentes e o corpo da pessoa efetuando as medições deve ser levada em consideração. Essa interação é mais acentuada na faixa de radiofrequências entre 30 MHz e 300 MHz, mas pode ocorrer em todo o espectro. Essas interações campo-corpo podem levar a indicações errôneas do campo real e exposição, que existiria sem o efeito perturbante do corpo.
- ✓ Art. 47. Durante as medições para demonstrar o atendimento aos limites de exposição, áreas altamente localizadas, com campos relativamente intensos, podem ser encontradas. Estas áreas são conhecidas como “pontos quentes” e são normalmente encontradas nas imediações de objetos condutores, pelo efeito de re-radiação, ou em áreas distantes de objetos condutores, mas nas quais existe uma concentração de campos causada por reflexões ou feixes estreitos produzidos por antenas diretivas de alto ganho.

### **3.1 Etapa 1: Construção e Calibração das Fontes Eletromagnéticas**

Nesta etapa para operar como fontes foram confeccionadas quatro antenas monopolo de  $\lambda/4$ , de forma a simular as utilizadas em aparelhos celulares, para frequência de operação de 2,045 GHz (pertencente à faixa de frequência do padrão UMTS- 3G) e realizadas medições de algumas características dessas antenas.

#### **3.1.1 Equipamentos Utilizados**

Nos procedimentos a seguir relacionados, foi utilizado um sistema de medição constituído de: um gerador de sinais Rohde & Schwarz modelo 5M300 acoplado via cabo coaxial (cabo RG 58 C/U de 1,45 m de comprimento) à um distribuidor com suas saídas ligadas a base de cada antena monopolo por um conector tipo SMA e um analisador de malha Agilent modelo E5062A, ENA Series Network Analyzer acoplado via cabo coaxial (cabo HFU2- Z5RS) à antena de recepção- log-periódica Rohde&Schwarz, 12-144980 com fator de antena 28,8 dB:

- calibração e medição das características das antenas monopolo;
- medição de potência para o cálculo do campo proveniente de cada monopolo no espaço-livre para duas distâncias- entre a antena de recepção log-periódica e o monopolo mais próximo desta no interior do automóvel e entre a antena de recepção log-periódica e o monopolo mais distante desta no interior do automóvel; e
- medição das perdas nos cabos utilizados para as antenas monopolo e de recepção.

#### **3.1.2. Fontes de CEM**

Cada antena monopolo foi modelada por uma haste metálica (com diâmetro de 1.8 mm e comprimento de 37,5 mm) e plano de terra condutor composto por três hastes metálicas de 25 mm separadas de 120° entre si. Na

etapa seguinte foi simulada a operação da antena com o software MS-CST conforme figuras 11, 12 e 13.



Figura 11- Projeto de antena monopolo para a faixa de frequência de 1,8 a 2,1 GHz simulada com o software CST: (a) vista de topo e (b) vista lateral.

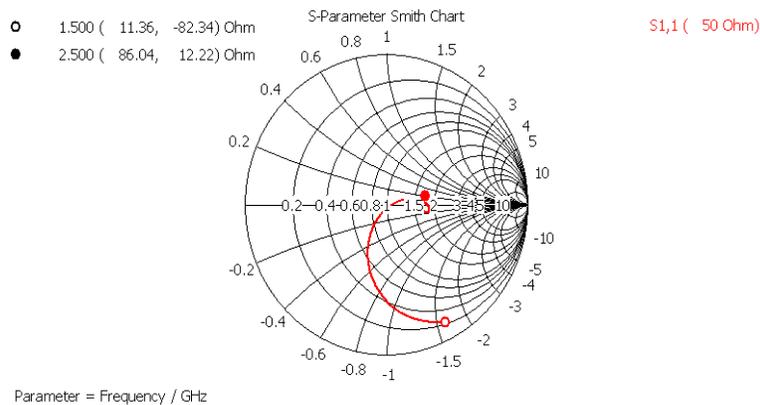
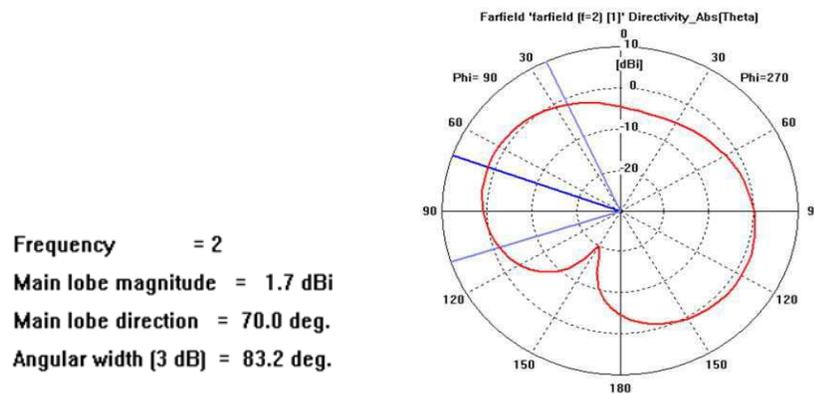
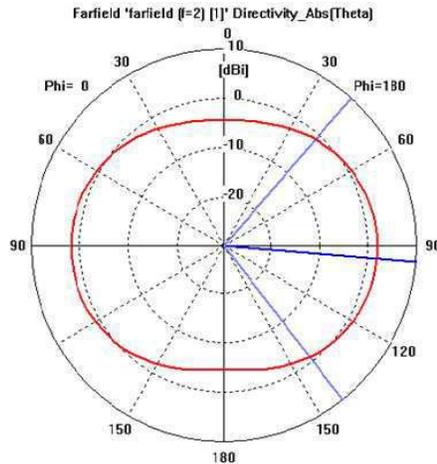


Figura 12- Valores simulados dos parâmetros “S” plotados na Carta de Smith referentes à antena monopolo.

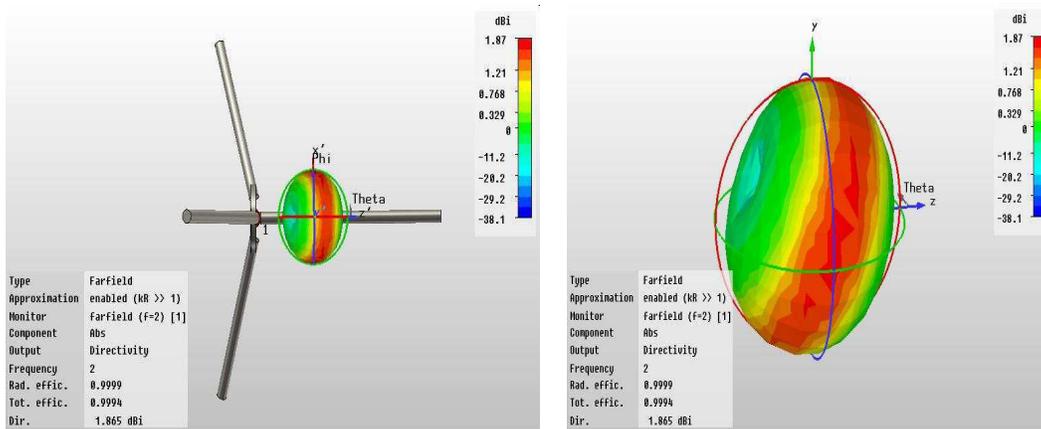


(a) Diagrama de irradiação vertical da monopolo em 2D.

**Frequency = 2 120**  
**Main lobe magnitude = 1.9 dBi**  
**Main lobe direction = 95.0 deg.**  
**Angular width (3 dB) = 100.6 deg.**



(b) Diagrama de irradiação horizontal da antena monopolo em 2D.



(c) Diagramas de irradiação da antena monopolo em 3D.

Figura 13. (a), (b) e (c) Diagramas de irradiação da antena monopolo simulada no software computacional CST.

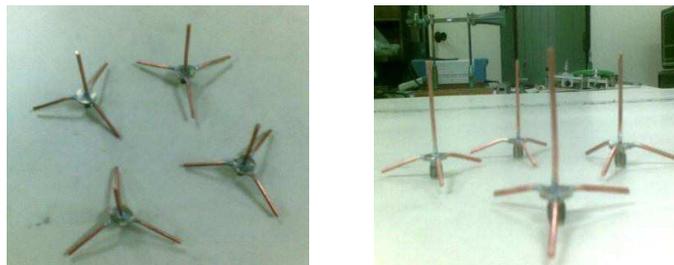


Figura 14. Fotos das antenas monopolos construídas no LEMA- Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados- DEE/CEEI/UFMG.

As antenas monopolo foram calibradas individualmente e verificados seus parâmetros de espalhamento (S11 e S21), razão de onda estacionária

(SWR) e carta de Smith, de forma que estas puderam ser consideradas aproximadamente iguais.

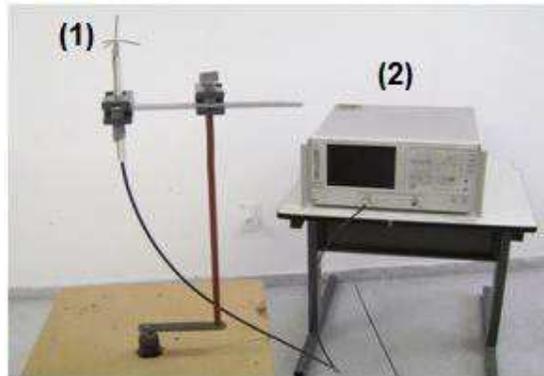


Figura 15. Ambiente do experimento para determinação do  $S_{11}$ , SWR e carta de Smith para cada antena monopolo: (1) Antena monopolo, (2) Analisador de malhas.

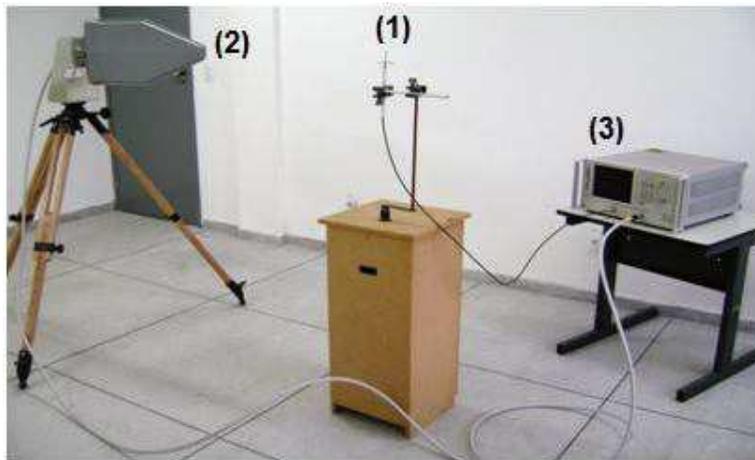
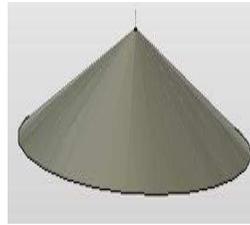
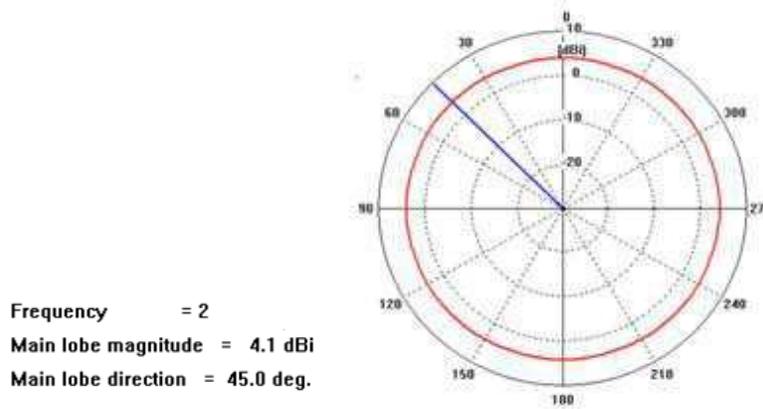


Figura 16. Ambiente do experimento para determinação do  $S_{21}$  para os enlaces de cada antena monopolo com a antena log-periódica: (1) Antena monopolo, (2) Antena log-periódica, (3) Analisador de malhas.

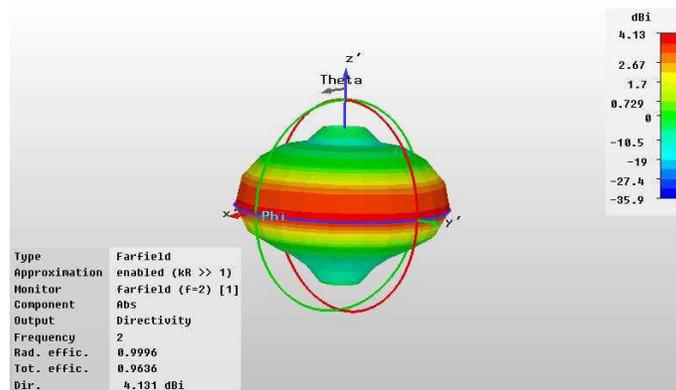
Devido ao plano de terra de cada monopolo construído não ser contínuo (já que foram utilizados radiais) e serem os radiais finitos em comprimento, verificou-se não ocorrer simetria no diagrama de irradiação como seria esperado para um monopolo com plano de terra infinito (ou quase infinito) e contínuo que se comporta como uma fonte de irradiação isotrópica conforme é mostrado na figura 17. Assim, foram verificadas através de medições de potência em torno de cada monopolo em operação, as regiões com máxima potência de irradiação emitida para cada monopolo.



(a)



(b)



(c)

Figura 17. (a) Antena monopolo com plano de terra contínuo e quase infinito simulada com o software CST, (b) Diagrama de irradiação 2D e (c) Diagrama de irradiação 3D.

Foram medidos também os níveis de transmissão e de recepção das antenas das fontes emissoras (monopolos) e da antena de recepção (log-periódica) para a distância entre a antena de recepção e o monopolo mais próximo desta última no interior do automóvel (81 cm) e para a distância entre a antena de recepção e o monopolo mais distante desta última no interior do automóvel (1,20 m). Cada antena monopolo foi posicionada para transmissão

de polarização vertical e a antena de recepção foi posicionada para a captação do campo incidente na máxima resposta da antena monopolo.

Estas medições foram realizadas na região de campos distantes determinada a partir da expressão 27.b representada abaixo:

$$r > 1,6\lambda \text{ quando } D < \frac{1}{3}\lambda$$

Em que:

$r$  = distância da antena ao campo distante [m];

$D$  = máxima dimensão linear da antena [m];

$\lambda$  = comprimento de onda na frequência de medida [m].

Substituindo:  $\lambda = 0.15$  m (em 2.045 GHz) e  $D = 0.048$ m

Chega-se ao resultado de  $r = 24$  cm.

A antena usada para medição (log-periódica), de acordo com a carta de calibração do fabricante apresenta, para a frequência de 2.045 GHz, fator de antena de 28,8 dB, ganho de 7,4 dBi (fator multiplicativo de 5,6) e uma impedância, medida com o ENA Series Network Analyzer E5062A Agilent, de  $Z = (47 + j7,8) \Omega$ . Foram medidos os níveis de recepção e de transmissão (que apresentaram valores praticamente iguais para cada monopolo, (obedecendo assim o Teorema da Reciprocidade), e calculado o campo elétrico proveniente de cada monopolo.

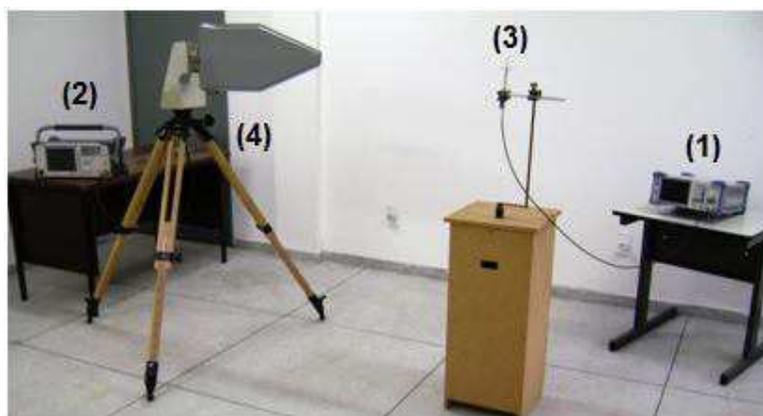


Figura 18- Ambiente de medição dos níveis de transmissão das antenas monopolos: (1) Gerador de Sinais, (2) Analisador de Espectro, (3) Antena monopolo, (4) Antena log-periódica.

### 3.1.3 Níveis de Potência das Fontes EM

No sistema GSM até oito usuários compartilham o mesmo canal de frequência e cada telefone transmite apenas um oitavo do tempo. Isto significa que a potência média é 1/8 da potência de pico. Nos telefones 3G (UMTS/WCDMA) não se separam os sinais no tempo ou na frequência (Ericsson, 2011).

Telefones GSM têm uma potência de pico de 2W (GSM 800/900) ou 1W (GSM 1800/1900). A potência média máxima é de 1/8 da potência de pico, daí 250mW (GSM 800 / 900) ou 125 mW (GSM 1800 / 1900). Para GPRS, os níveis de potência de pico são os mesmos que os para GSM comum, mas a potência média quando se utiliza dois *timeslots* pode ser até 0,5 W para 900MHz e 250 mW para 1800 MHz (Ericsson, 2011).

Para 3G (UMTS / WCDMA) a potência máxima depende da classe a qual pertence o terminal conforme a tabela 3.

Tabela 3. Níveis de potência de telefones celulares 3G/UMTS

Potência (dBm)	Potência (W)	Comentários
33 dBm	2 W	Máxima potência de saída para telefones celulares UMTS/3G (Potência dos celulares classe 1). Máxima potência de saída para telefones celulares GSM 850/900.
27 dBm	500 mW	Potência de transmissão típica de telefones celulares. Máxima potência de saída de um telefone móvel UMTS/3G (potência para celulares classe 2).
24 dBm	250 mW	Máxima potência de saída de telefone móvel UMTS/3G (potência para celulares classe 3).
21 dBm	125 mW	Máxima potência de saída de telefone móvel UMTS/3G (potência para celulares classe 4).

Assim para a alimentação de cada antena monopolo construída foi utilizada a potência máxima de saída dos telefones celulares UMTS/3G da classe 2 isto é, 500 mW.

### 3.2 Etapa 2: Medições na Câmara de Reverberação

O objetivo dessa etapa foi verificar a amplificação do campo eletromagnético gerado pelas antenas monopolo em uma cavidade ressonante com dimensões menores que as dimensões de um automóvel para posterior comparação.

Uma câmara de reverberação (CR) é uma cavidade de ressonância eletricamente grande e altamente condutora (norma IEC 61000-4-21) que funciona como um amplificador de RF. Ela é construída com um revestimento blindado em cujo interior normalmente são posicionados elementos agitadores de modos. Idealmente o campo tomado em um ponto qualquer do interior dessa cavidade é a soma de diversas ondas estacionárias existentes devido às múltiplas reflexões (Huang *et al.*, 2005).

A câmara de reverberação utilizada para o experimento com as antenas tipo monopolo foi desenvolvida por Erik Farias da Silva durante seu mestrado (Silva, 2008). As paredes da mesma foram feitas utilizando chapas de alumínio número 18 cada uma medindo 2x1 m<sup>2</sup> conforme é mostrado na Figura 19.



Figura 19- Câmara de reverberação construída no LEMA/DEE/CEEI/UFCG.

Existe uma região no interior da câmara de reverberação na qual o campo eletromagnético é uniforme em qualquer polarização. Para conseguir que o campo médio seja relativamente uniforme a câmara deve ter um número suficiente de modos ressonantes constantemente deslocados, o que é

conseguido variando as condições de contorno no interior da cavidade. Essas condições são alcançadas através da alteração das características do agitador de modos; daí a importância desse elemento (Bai *et al.*, 1999)

O campo eletromagnético em um volume no interior da CR, a ser utilizado como zona útil de teste, pode ser caracterizado como sendo (Huang, 2005):

- Estatisticamente isotrópico;
- Aleatoriamente polarizado;
- Homogêneo.

O experimento na câmara foi realizado em duas etapas: a primeira etapa com duas antenas monopolo inseridas na zona útil de teste com a presença dos agitadores de modo e a segunda etapa sem os agitadores de modo. A antena de medição utilizada no interior da câmara foi a dipolo de duplo arco, antena isotrópica desenvolvida por Edvaldo da Silva Pires em seu mestrado (Pires, 2006). Foi utilizado um gerador de sinais Rohde & Schwarz modelo 5M300 e um analisador de espectro Agilent CSA- N1996A. Na Figura 20 são apresentadas algumas fotos das medições no interior da câmara de reverberação. As antenas ficaram na altura de 45 cm no interior da câmara.



Figura 20- Ambiente de Medição no interior da câmara de reverberação: (1) Antena de medição- dipolo de duplo arco construído no LEMA/DEE/UFCEG, (2) e (3) Antenas monopolo em um suporte de madeira, (4) Dipolo de duplo arco conectado ao cabo ligado ao analisador de espectro, (5) Agitadores de modos, (6) Câmara sem os agitadores de modo.

### 3.3 Etapa 3: Medições com a Antena Log-periódica

Nesta etapa foram realizados experimentos utilizando como antena de medição a antena log-periódica Rohde&Schwarz 12-144980 com fator de antena 28,8 dB conforme a Figura 21. Foram realizadas medições de potência dos sinais provenientes das antenas monopolo no interior do automóvel, ao redor do automóvel e no espaço-livre para posteriores comparações.

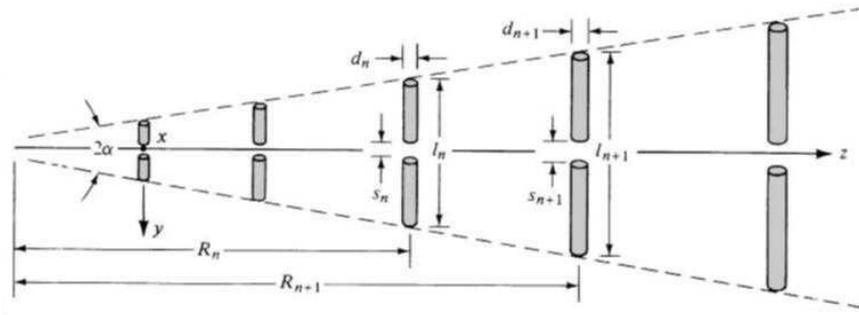


Figura 21- Antena log-periódica Rohde&Schwarz 12-144980.

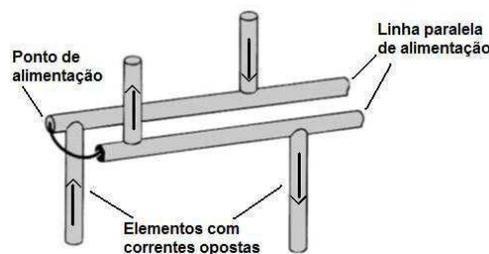
#### 3.3.1 Antenas Log-periódicas

Uma antena log-periódica é aquela que tem sua estrutura geometricamente escolhida de modo que a impedância de entrada e os diagramas de radiação variem, periodicamente, com o logaritmo da frequência (Esteves, 1980).

A estrutura mais conhecida de antena log-periódica é a configuração introduzida por Isbell, mostrada na Figura 22 (a) (Balanis, 2005). Consiste em um conjunto de dipolos, colocados paralelamente em um plano. Os comprimentos  $l_n$  dos dipolos e os espaçamentos  $d_n$  entre os mesmos formam uma progressão geométrica de razão  $r < 1$ . A antena é alimentada através de uma linha balanceada ligada ao elemento menor. Os elementos que constituem a antena são excitados por um alimentador balanceado de impedância constante, sendo os elementos adjacentes ligados ao alimentador de forma alternada como mostra a figura 22 (b) (Esteves, 1980).



(a)



(b)

Figura 22: (a) Conjunto de dipolos, (b) Detalhe da alimentação das antenas log-periódicas em dipolos.

A diretividade das antenas log-periódicas é obtida e mantida ao longo de bandas muito largas (Balanis, 2005).

### 3.3.2 Experimento no Interior do Automóvel

No interior de um automóvel foram coletados valores do nível de potência para vários casos de disposição das antenas monopolo.

As antenas monopolo foram posicionadas no interior do automóvel-marca Fiat, modelo Uno Mille Fire Flex, ano 2006- de modo a simular a altura do aparelho celular em uso por um ser humano adulto. As antenas foram dispostas da seguinte forma: uma antena no banco de passageiro dianteiro e as outras três no banco traseiro de modo que estas ficaram com as seguintes distâncias para a antena receptora de medição: 81 cm, 90 cm, 104 cm e 126 cm (Figura 23). A antena de recepção (log-periódica) foi colocada no exterior do automóvel, mas em visada direta com as fontes (antenas monopolo) próxima à

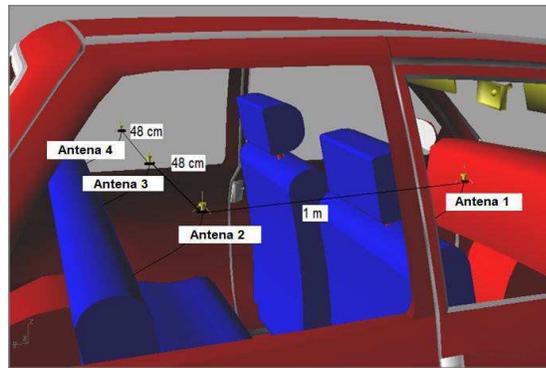
janela do banco do motorista como é mostrado na Figura 24. O automóvel encontrava-se com as janelas abertas das quatro portas.



(a)



(b)



(c)

Figura 23: (a) Foto do automóvel marca Fiat, modelo Uno Mille Fire Flex utilizado nos experimentos, (b) Foto interior do automóvel e (c) Perspectiva do interior do automóvel e posicionamento das antenas monopolo criadas no software computacional Rhinoceros.

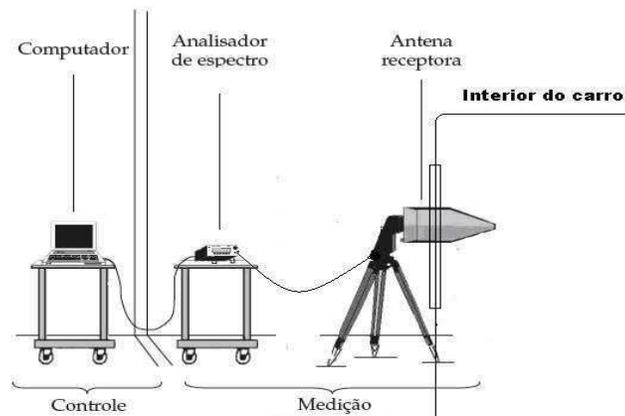


Figura 24- Esquema da disposição da antena de recepção, log-periódica, e dos equipamentos para medição no exterior do automóvel.

Para avaliação do ambiente eletromagnético, ou seja, da distribuição de campo no interior do automóvel proveniente das quatro antenas em operação ou não, foram realizadas 16 medições de potência com o analisador de espectro Agilent CSA- N1996A, utilizando-se do princípio de contagem do sistema de numeração posicional binário (antena ativa, antenna inativa). Para a alimentação das fontes (antenas monopolo) foi utilizado um gerador de sinais, Rohde & Schwarz, modelo 5M300 e um distribuidor.

### 3.3.3 Cálculo do Nível de Radiação Eletromagnética no Interior do Automóvel

Em uma antenna log-periódica constituída por dipolos, com a variação da frequência de operação, a forma geral das distribuições para tensão e corrente não muda, apesar da região ativa mover-se para elementos diferentes. Por exemplo, quando a frequência aumenta, a região ativa desloca-se em direção ao elemento menor (Esteves, 1980). Para efeito de cálculos, consideraremos a log-periódica operando como um único dipolo na frequência de operação de 2.045 GHz.

A antenna log-periódica, de acordo com a carta de calibração, apresenta para a frequência de 2,045 GHz, fator de antenna de 28,8 dB (fator multiplicativo de 27,7) e uma impedância de entrada  $Z = (47 + j7,8) \Omega$ . A perda ôhmica medida do cabo de alimentação utilizado com a log-periódica- referência HFU 2-Z5R5- foi de 2,54 dB.

Para calcular a tensão nos terminais da antenna log-periódica foram utilizadas as seguintes expressões (Kaiser, 2005):

$$P_{ant} (W) = 10^{-3} \times 10^{[P_{anal} (dBm) - P_{cabo} (dB)]} \quad (28)$$

$$V_{antena} = \sqrt{R_{antena} \times P_{antena}} \quad (29)$$

Em que:

$P_{ant}$  = Potência da antenna de recepção;

$P_{anali}$  = Potência do sinal medida com o analisador;

$P_{cabo}$  = Perda ôhmica no cabo de alimentação;

$V_{antena}$  = Tensão nos terminais da antenna de recepção;

$R_{antena} = 47\Omega$ ;

Para os cálculos de campo elétrico e magnético provenientes dos monopolos e para o cálculo da densidade de potência da onda plana equivalente foi utilizado o seguinte conjunto de expressões já citadas em capítulo anterior:

$$E (V/m) = V_{antena}(V) \times AF (1/m) \quad (24)$$

$$H (A/m) = E/377 \quad (5)$$

$$S_{eq} = \frac{E^2}{\eta_0} = H^2 \times \eta_0 \quad (4)$$

Em que: E = Campo Elétrico incidente na antena de recepção, AF = Fator de antena da antena receptora, H= Campo Magnético incidente e  $\eta_0 = 377 \Omega$  é valor da impedância do espaço livre em ohms.

### 3.3.4 Experimento na Região Externa do Automóvel

Além de verificar a intensidade de campo no interior do automóvel, faz-se necessário também a medição do campo eletromagnético que o envolve, permitindo assim a análise da influência da estrutura metálica do automóvel no valor do campo resultante gerado pelas antenas monopolo em qualquer ponto do seu interior. Assim, pode-se portanto validar a teoria de que a estrutura de um automóvel se assemelha a uma cavidade de ressonância retangular.

As antenas monopolo foram posicionadas do mesmo modo como no experimento para medições no interior do automóvel. O gerador de sinais, o analisador de espectro, a antena log-periódica e os cabos utilizados no experimento também foram os mesmos para as medições no interior do automóvel.

O experimento foi realizado com a antena log-periódica em quatro posições: na frente do automóvel, com a extremidade da log-periódica a 1m do vidro dianteiro, em cada lado do automóvel com a extremidade da log-periódica a 40 cm do automóvel e atrás do automóvel com a extremidade da log-periódica a 40 cm do vidro traseiro.

Para cada posição da antena log-periódica foram realizadas medições para duas configurações das antenas monopolo: todas ligadas e todas desligadas. As medições foram realizadas para duas etapas em cada

configuração das antenas: com todas as janelas fechadas e em seguida com todos as janelas abertas. Esses procedimentos foram realizados para dois planos horizontais: as antenas monopolos dispostas no automóvel a 1,26 m de altura (plano 1) e a 1,12 m de altura (plano 2). Logo, foram realizadas no total 32 medições para esta etapa experimental.

Na Figura 25 são apresentadas algumas fotos do procedimento experimental para a etapa de medições ao redor do automóvel.



Figura 25 - Experimento ao redor do carro: (1) Três antenas monopolo posicionadas no banco traseiro do automóvel, (2) Uma antena monopolo posicionada no banco do passageiro dianteiro, (3) e (4) Medições do nível de sinal nas laterais do automóvel com a log-periódica, (5) Medição com a log-periódica do nível de sinal próximo ao vidro dianteiro do automóvel e (6) Medição com a log-periódica próxima ao vidro traseiro do automóvel.

### 3.3.5 Medições no Espaço livre com a Antena Log-periódica

O objetivo desta etapa é medir o campo eletromagnético proveniente das antenas monopolo juntas e com a mesma distância entre elas quando as mesmas estão no interior do automóvel. O ambiente escolhido para as medições (pátio do bloco CJ- UFCG) foi o mais livre possível de interferência externas para que os valores medidos sejam decorrentes exclusivamente das fontes de irradiação local (antenas monopolo).

Os valores obtidos do campo eletromagnético gerado pelo conjunto de antenas monopolo para as dezesseis configurações no espaço livre foram comparados com os valores medidos do campo para as mesmas configurações das antenas monopolo no interior do automóvel com as janelas abertas. Assim, foi possível observar o efeito das múltiplas reflexões no nível do campo resultante devido à estrutura metálica do automóvel.

As antenas, os equipamentos e os cabos utilizados neste experimento foram os mesmos utilizados no experimento no interior do automóvel. Na figura 26 temos todas as distâncias entre a antena receptora e as antenas monopolo para a realização do experimento no espaço livre.

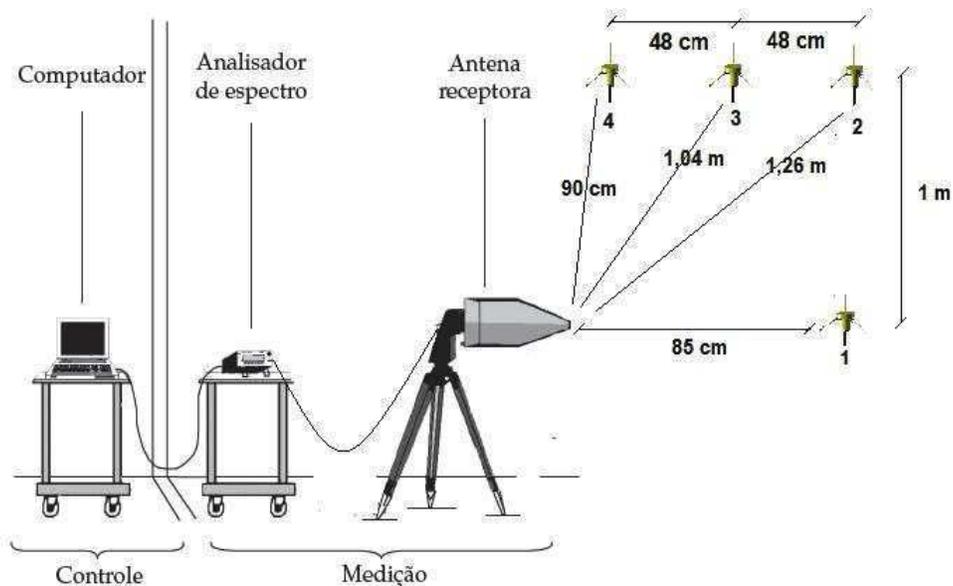


Figura 26- Esquema da disposição da antena receptora, log-periódica, e das antenas monopolo para as medições no espaço livre.

### 3.4 Etapa 4: Medições com a Antena Dipolo de Duplo Arco

Nesta etapa efetuou-se o mapeamento do campo eletromagnético no interior do automóvel. Foram realizadas medições de tensão e potência dos sinais provenientes das antenas monopolo utilizando como antena de medição o dipolo de duplo arco produzido por Edvaldo Silva Pires em seu mestrado na UFCG. Essa antena foi projetada para irradiar uniformemente duas polarizações nos três planos perpendiculares. O formato e as dimensões para a geometria da antena dipolo de duplo arco estão apresentados na Figura 27 (Pires, 2006).

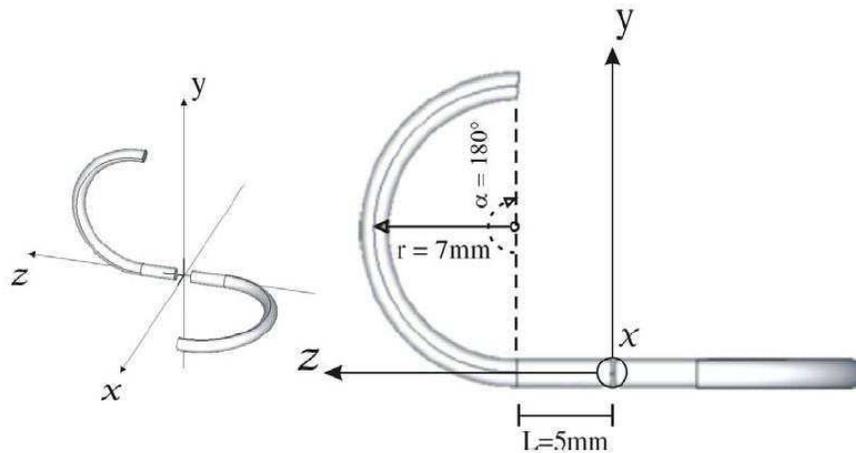
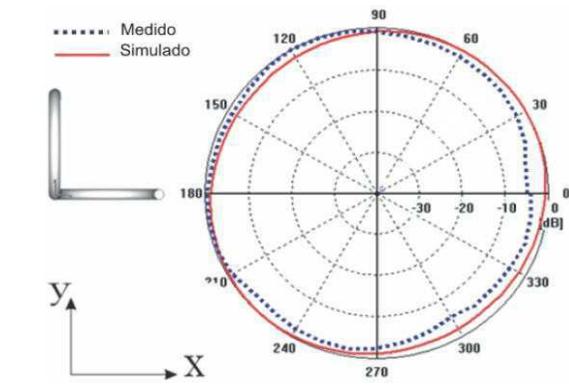


Figura 27- Antena de dipolo de duplo arco e suas dimensões em comprimento de onda.

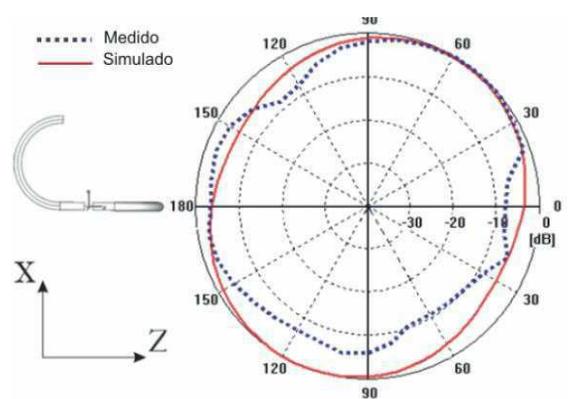
Com essa configuração a antena irradia e recebe energia em duas polarizações lineares nos três eixos. Cada braço da antena tem  $\frac{1}{4}$  do comprimento de onda. Essa antena foi construída para irradiar na frequência de 2,45 GHz (Pires, 2006).

#### 3.4.1 Características do Dipolo de Duplo Arco

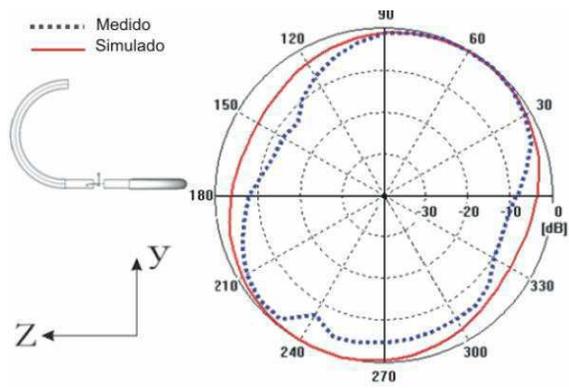
Os diagramas de irradiação do dipolo de duplo arco apresentam características próximas ao irradiador isotrópico conforme são apresentados na Figura 28.



(a)



(b)



(c)

Figura 28- Diagrama de irradiação do dipolo de duplo arco: (a) plano YX, (b) plano XZ e (c) plano ZY.

O ganho simulado para essa antena, tendo a antena isotrópica como referência, foi de 1,849 dB e a diretividade ficou em 1,834 dBi ambos na frequência de operação. Esses valores se aproximam do valor da antena isotrópica ideal que é de zero dB para o ganho e para a diretividade. Esses

valores reforçam as características de quase isotropia da antena de duplo arco (Pires, 2006).

### 3.4.2 Determinação do Fator de Antena do Dipolo de Duplo Arco

Na realização dos experimentos para o mapeamento da distribuição do campo eletromagnético no interior do automóvel faz-se necessária a utilização de uma antena de medição com o fator de antena conhecido. Logo, foi preciso determinar a característica do fator de antena do dipolo de duplo arco.

O experimento para a determinação do fator de antena foi realizado em duas etapas.

A primeira etapa consistiu em medir com uma antena com fator de antena conhecido o campo proveniente de outra antena. A antena de medição utilizada nesta etapa foi a log-periódica A. H. Systems SAS- 510-7 com fator de antena 29,9 dB/m para a faixa de frequência de 2 a 2,1 GHz e a antena transmissora utilizada foi a log-periódica Rohde & Schwarz 12-144980 com fator de antena 28,8 dB para a mesma faixa de frequência conforme a Figura 29.

A segunda etapa consistiu em substituir a antena de medição log-periódica pelo dipolo de duplo arco. Ela foi posta na mesma posição do elemento irradiador da log-periódica na frequência de 2,045 GHz, estando agora conhecido o valor do campo elétrico proveniente da log-periódica transmissora conforme é mostrado na figura 30.

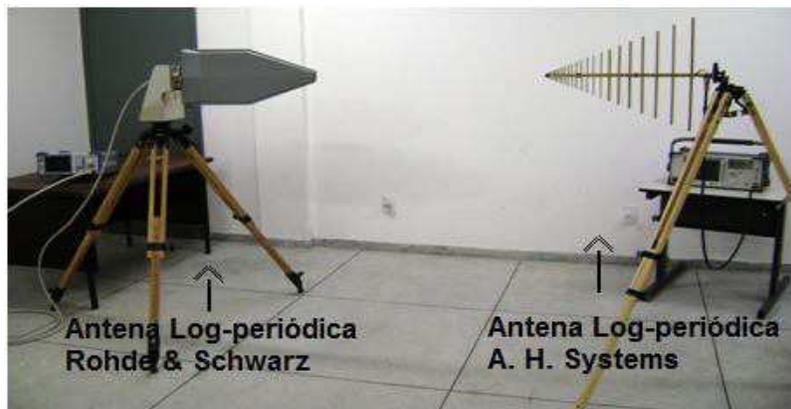


Figura 29- Primeira etapa do experimento para determinação do fator de antena do dipolo de duplo arco.

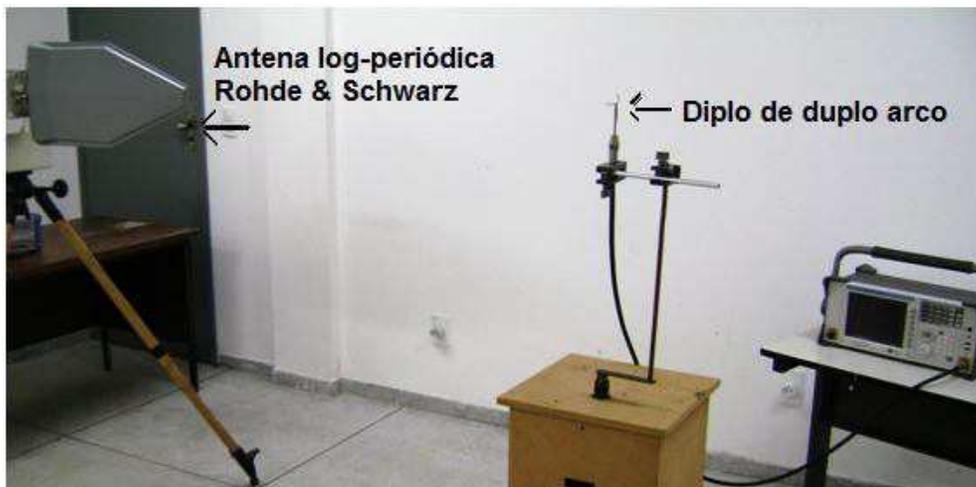


Figura 30- Segunda etapa do experimento para determinação do fator de antena do dipolo de duplo arco.

Os equipamentos utilizados para esse experimento foram, o gerador de sinais Rohde & Schwarz modelo 5M300 acoplado via cabo coaxial a antena transmissora e o analisador de espectro Agilent CSA- N1996A acoplado via cabo coaxial (Belden 8268- RG-214/U type) em cada antena receptora.

### **3.4.3 Experimento no Interior do Automóvel com a Antena Dipolo de Duplo Arco.**

Nesta etapa, as antenas monopolo foram posicionadas do mesmo modo como no experimento para medições no interior do automóvel com a antena log-periódica. O gerador de sinais, o analisador de espectro e os cabos utilizados neste experimento também foram os mesmos, mas a antena de medição utilizada foi o dipolo de duplo arco.

O experimento foi realizado com o dipolo de duplo arco em cinco posições: no banco do motorista, no banco do passageiro dianteiro, no banco traseiro nos três lugares ocupados por passageiros. Para o posicionamento do dipolo no banco do motorista foram realizadas medições para todas as configurações das antenas monopolo, e para o posicionamento nos bancos ocupados pelos passageiros foram realizadas medições para cada posição e para várias configurações das antenas monopolo.

Para cada posição do dipolo de duplo arco foram realizadas medições para dois planos horizontais: a uma altura de 1,12 m do solo simulando a altura de um adulto (plano 1) e a 1,26 m do solo simulando a altura de uma criança ou adulto menor (plano 2). As medições foram realizadas para duas etapas em cada configuração das antenas: com todas as janelas fechadas e em seguida com todas as janelas abertas. Assim no total, foram realizadas 384 medições de tensão e potência para diversas situações no interior do automóvel.

Nas Figuras 31 e 32 são apresentadas algumas fotos do procedimento experimental para o mapeamento do ambiente eletromagnético no interior do automóvel utilizando o dipolo de duplo arco.



Figura 31- Experimento no interior do automóvel com as antenas dispostas no plano 1 (1,12 m do solo): (1) Antena monopolo no banco dianteiro ocupado pelo passageiro, (2) Antenas monopolo no banco traseiro para os três assentos dos passageiros, (3) Antena dipolo de duplo arco no banco do passageiro e (4) Antena dipolo no banco traseiro em uma das posições dos passageiros.



Figura 32- Experimento no interior do automóvel com as antenas dispostas no plano 2 (1,26 m do solo): (1) Antena dipolo de duplo arco no banco do motorista, (2) Antenas monopolo no banco traseiro para os três assentos dos passageiros, (3) Antena dipolo de duplo arco no banco traseiro na posição do monopolo 2 e (4) Antena dipolo no banco traseiro na posição do monopolo 3.

## **CAPÍTULO 4**

### **RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Nesse capítulo são apresentados e analisados os resultados das medições de grandezas elétricas e os cálculos teóricos de grandezas eletromagnéticas realizados nos procedimentos de: construção e calibração das fontes de Campo Eletromagnético (antenas monopolo), medições no interior de uma câmara de reverberação com as antenas monopolo inseridas, medições no interior e exterior de um automóvel utilizando uma antena log-periódica e medições no interior de um automóvel utilizando uma antena dipolo de duplo arco.

#### **4.1 Características das Fontes EM Produzidas**

As antenas monopolo produzidas no LEMA/DEE/UFMG foram calibradas individualmente e foram verificadas algumas de suas características.

Nas figuras 33 e 34 são comparados os valores dos parâmetros de espalhamento S11 e S21 respectivamente para as quatro antenas monopolo. Estes valores foram medidos com a antena log-periódica Rohde & Schwarz de impedância de entrada  $Z = (47 + j7,8) \Omega$  acoplada via cabo coaxial ao analisador de malhas ENA Series Network Analyzer E5062A Agilent na faixa de frequência de 1,8 a 2,1 GHz.

É possível observar que as quatro antenas ressoam de forma satisfatória na frequência de 2,05 GHz através dos gráficos do coeficiente de reflexão S11. Na mesma frequência é observado também que o nível da potência de transmissão é satisfatório para todas as antenas através das respostas do coeficiente de transmissão S21 para cada monopolo transmitindo e a log-periódica recebendo. Assim, observou-se que as antenas monopolos operam praticamente iguais.

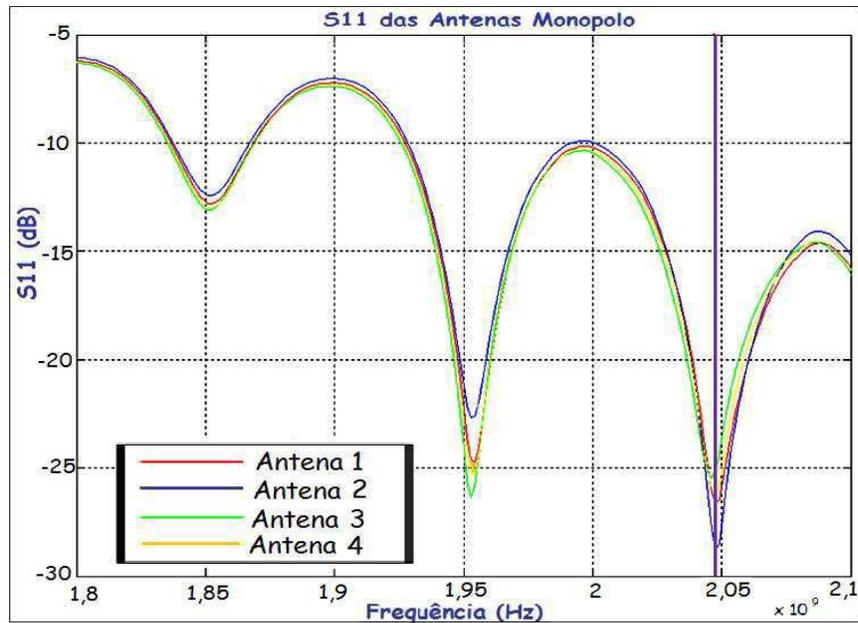


Figura 33- Coeficiente de reflexão S11 das quatro antenas monopolo construídas no LEMA/ DEE/ UFCG.

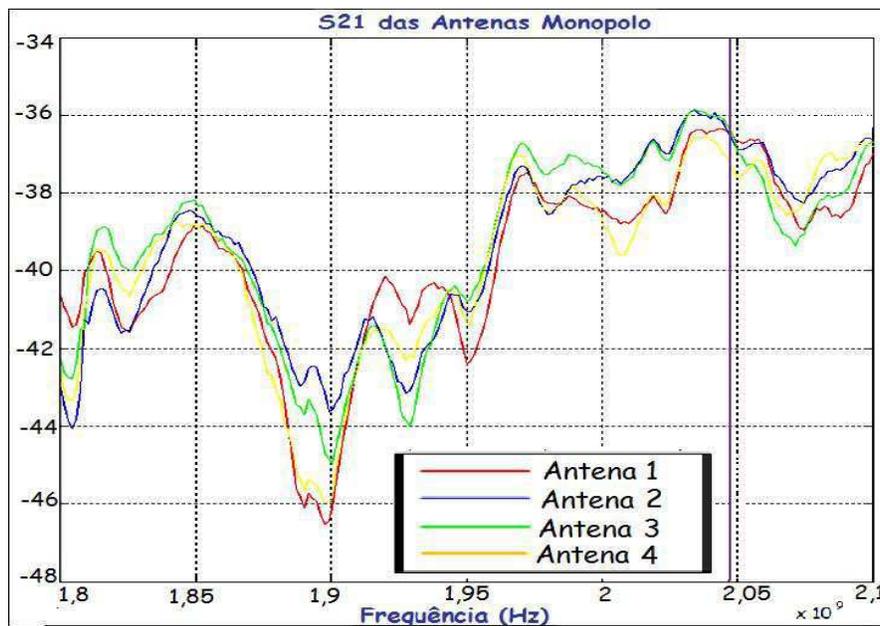


Figura 34- Coeficiente de transmissão S21 de quatro enlaces, em cada enlace uma antena monopolo transmitindo e a log-periódica recebendo.

Os valores das impedâncias de entrada das antenas monopolo na frequência de 2.05 GHz medidos com o analisador de malhas ENA Series Network Analyzer E5062A Agilent encontram-se adiante na tabela 4. Os

valores iguais das impedâncias também comprovam que estas antenas foram fabricadas para possuírem características idênticas.

Tabela 4- Valores medidos das impedâncias de entrada das antenas monopolo com freqüência de operação de 2,045 GHz.

	Antena 1	Antena 2	Antena 3	Antena 4
<b>Impedância de entrada (<math>Z_0</math>)</b>	50 $\Omega$	50 $\Omega$	50 $\Omega$	50 $\Omega$

As tabelas 5 e 6 apresentam os níveis de recepção para as antenas monopolo na freqüência de operação de 2,045 Ghz, calculados nos terminais da antena de recepção. Foram calculados também níveis de campo elétrico, campo magnético e densidade de potência da onda plana equivalente provenientes de cada monopolo para duas distâncias: entre a antena log-periódica e o monopolo mais próximo desta no interior do automóvel (81 cm) e entre a antena log-periódica e o monopolo mais distante no interior do automóvel (1,20 m). Os valores encontrados das grandezas eletromagnéticas em questão foram muito próximos para as quatro antenas.

Os valores de potência foram obtidos fornecendo inicialmente a cada monopolo 1mW, calculando um ganho de 26,99 dB tem-se um valor de potência fornecida a cada antena de 500 mW. Foram obtidos valores em dBm, para convertê-los para Watt foi usada a seguinte expressão somando a perda no cabo RGC58 Celular de 1,45 m (-2,54 dB):

$$P_{ant} (W) = 10^{-3} \times 10^{[P_{antena}(dBm) - P_{cabo}(dB)]} \quad (30)$$

Tabela 5 – Níveis de potência, de campo eletromagnético e de densidade de potência da onda plana equivalente dos monopolos operando em 2,045 GHz a 81 cm de distância da antena de medição.

Antena	Nível de recepção nos terminais da log-periódica $P_{\text{antena}} (\mu\text{W})$	Campo elétrico proveniente de cada monopolo E (V/m)	Campo magnético proveniente de cada monopolo H (mA/m)	Densidade de potência de onda plana equivalente S ( $\text{mW}/\text{m}^2$ )
1	103,27	1,93	5,12	9,88
2	108,89	1,98	5,25	10,40
3	108,64	1,98	5,25	10,40
4	105,92	1,95	5,17	10,10

Tabela 6 – Níveis de potência, de campo eletromagnético e de densidade de potência da onda plana equivalente dos monopolos operando em 2,045 GHz a 1,20m de distância da antena de medição.

Antena	Nível de recepção nos terminais da log-periódica $P_{\text{antena}} (\mu\text{W})$	Campo elétrico proveniente de cada monopolo E (V/m)	Campo magnético proveniente de cada monopolo H (mA/m)	Densidade de potência de onda plana equivalente S ( $\text{mW}/\text{m}^2$ )
1	45,92	1,29	3,41	4,41
2	46,99	1,30	3,45	4,48
3	38,81	1,18	3,14	3,69
4	43,05	1,25	3,30	2,89

Portanto, conclui-se a partir da análise das características analisadas das quatro antenas monopolo que estas podem ser consideradas praticamente iguais.

## 4.2 Experimento Utilizando a Câmara de Reverberação

Nesta etapa foram verificados os níveis de potência e calculados os valores de campo eletromagnético proveniente de antenas monopolo no interior de uma câmara de reverberação produzida no LEMA (Silva, 2008). A medição na câmara serve como referência na análise da variação de campo com relação a um ambiente quase fechado (automóvel).

Uma câmara de reverberação possibilita a medição de potência total irradiada por fontes, proporcionando densidade de energia uniforme em todo o volume de trabalho. Com modestas fontes de energia a câmara atinge altos valores de campo. Tais requisitos são alcançados quando há um significativo número de modos de ressonância excitados dentro da câmara.

A Zona de Campo Uniforme (ZCU), região ou volume no interior da câmara de reverberação que obedece aos limites estabelecidos pela norma referente aos aspectos de calibração da mesma, utilizada no experimento possui dimensões  $55 \times 60 \times 65 \text{ cm}^3$ . Devido à limitação destas dimensões reduzidas da câmara em relação às dimensões de um automóvel, restringiu-se o número de antenas monopolo no interior do ambiente fechado para duas antenas, pois com as quatro antenas juntas, estas iriam se comportar como um tipo de arranjo, formando combinações construtivas e destrutivas de campo, tornando-se a região ainda mais diferente do ambiente no interior do automóvel.

As medições foram realizadas com e sem o espalhador de modos. Essa estrutura é uma lâmina metálica que perturba continuamente o campo no interior de uma câmara de reverberação (Hoeppe et al., 2001). Quando se utiliza um agitador de modos móvel, a cada variação de sua posição ocorre uma modificação das condições de contorno e conseqüentemente os modos ressonantes são também alterados, reduzindo a degeneração de modos e elevando a uniformidade do campo no interior da câmara.

Como antena de medição foi utilizada a antena dipolo de duplo arco de impedância  $Z = (53,8 + j 46,3)$  acoplada via cabo coaxial (RFS RG213/ 50 ohms com atenuação na frequência de 2 GHz de 1,27 dB) a um analisador de espectro Agilent CSA, N1996A.

Um gerador de sinais Rohde & Schwarz foi utilizado para alimentar as antenas monopolo com potência de 1mW. Em seguida, aos valores de potência medidos foi acrescido um ganho, para que a potência de entrada de cada antena chegue a 500 mW devido ao baixo nível de sinal fornecido pelo gerador de sinais e somada a atenuação do cabo (1,27 dB).

Os valores de potência foram medidos em dBm e em seguida foram convertidos para a unidade Watt através da expressão 25. De posse dos valores de potência, foram calculadas as grandezas eletromagnéticas campo

elétrico, campo magnético e densidade de potência de onda plana equivalente através das equações 4, 5, 24 e 30.

Para realizar os cálculos das grandezas eletromagnéticas foi necessário determinar o fator de antena da antena dipolo de duplo arco conforme o procedimento descrito no item (3.4.1) do capítulo 3. As expressões (26) e (25) foram utilizadas nos cálculos das etapas 1 e 2 respectivamente. Assim:

$$E(dB_{\mu}V/m) = 71,25 + 29,9 + 2,17 = 103,32 \quad (31)$$

$$AF(dB) = 103,32 - 56,94 - 2,17 = 44,21 \quad (32)$$

$$AF(1/m) = 10^{\frac{AF(dB)}{20}} = 10^{\frac{44,21}{20}} = 162,37 \quad (33)$$

Nas tabelas 7 e 8 são mostrados os valores de potência, de campo eletromagnético e de densidade de potência de onda plana equivalente para as medidas realizadas no interior da câmara de reverberação.

Tabela 7- Valores de grandezas eletromagnéticas para quatro configurações de antenas monopolo no interior de uma câmara de reverberação com a presença do espalhador de modos.

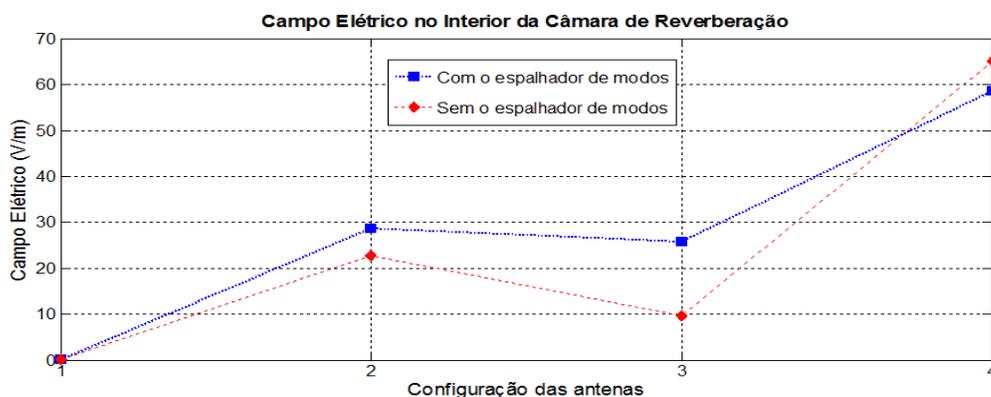
Com o Espalhador de Modos						
Configuração das antenas			P (dBm)	P(W)	E(V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )
	Antena 2	Antena 1				
1	0	0	-55,71	2,69E-09	0,06	0,00
2	0	1	-2,35	5,82E-04	28,73	2,19
3	1	0	-3,26	4,72E-04	25,88	1,78
4	1	1	3,85	2,43E-03	58,67	9,13

Tabela 8- Valores de grandezas eletromagnéticas para quatro configurações de antenas monopolo no interior de uma câmara de reverberação sem a presença do espalhador de modos.

Sem o Espalhador de Modos						
Configuração das antenas		P (dBm)	P(W)	E(V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	
Antena 2	Antena 1					
1	0	0	-53,39	4,58E-09	0,08	0,00
2	0	1	-4,35	3,67E-04	22,82	1,38
3	1	0	-11,91	6,44E-05	9,56	0,24
4	1	1	4,75	2,99E-03	65,07	11,23

Na figura 35 é mostrado o gráfico que compara os valores obtidos para o campo elétrico no interior da câmara de reverberação com e sem espalhador de modos.

Figura 35- Comparação dos valores de campo elétrico calculados para as medições no interior da câmara de reverberação com e sem espalhador de modos.



Na ZCU de uma estrutura de múltímodos ressonante o valor médio do campo eletromagnético é uniforme em qualquer polarização; contudo a câmara de reverberação é capaz de possibilitar a medição de potência total irradiada por fontes e não o campo elétrico a uma distância específica. No experimento em questão, foram medidos os níveis de potência irradiada total para várias configurações das antenas monopolo visando o cálculo de campo elétrico em um único ponto, por isso a proximidade dos valores para as situações com e sem a presença do espalhador de modos.

Porém, tais valores de campo foram maiores com a presença do espalhador de modos no interior da câmara em duas configurações das antenas (com apenas uma antena ativa de cada vez) e nas outras duas os

campos foram maiores sem a presença do espalhador; com uma diferença considerável principalmente na configuração que se tem duas antenas ativas no interior da câmara constituindo um arranjo de antenas o que modifica a distribuição do campo. Este resultado deve-se ao fato do espalhador de modos uniformizar o campo e no instante da medição sem o espalhador de modos, o valor de campo obtido em um determinado ponto ser menor ou maior que o valor do campo uniforme proporcionado pela presença do espalhador.

### 4.3 Experimentos com a antena log-periódica

#### 4.3.1 Experimento no interior do automóvel

Nesta etapa foram verificados os valores de grandezas eletromagnéticas no interior de um automóvel utilizando a antena log-periódica Rohde&Schwarz 12-144980 devido à presença de quatro antenas monopolo no interior do mesmo. Foram verificadas dezesseis configurações das antenas monopolo, nas quais as antenas apresentavam-se ligadas ou desligadas.

A numeração designada para as várias configurações de status das antenas no interior do automóvel durante as medições está na tabela 9.

Tabela 9- Numeração designada para as várias configurações de status das antenas no interior do automóvel.

Configuração das antenas no interior do automóvel.	Status das antenas			
	Antena 1	Antena 2	Antena 3	Antena 4
1	Inativa	Inativa	Inativa	Inativa
2	Inativa	Inativa	Inativa	Ativa
3	Inativa	Inativa	Ativa	Inativa
4	Inativa	Inativa	Ativa	Ativa
5	Inativa	Ativa	Inativa	Inativa
6	Inativa	Ativa	Inativa	Ativa
7	Inativa	Ativa	Ativa	Inativa
8	Inativa	Ativa	Ativa	Ativa
9	Ativa	Inativa	Inativa	Inativa
10	Ativa	Inativa	Inativa	Ativa
11	Ativa	Inativa	Ativa	Inativa
12	Ativa	Inativa	Ativa	Ativa
13	Ativa	Ativa	Inativa	Inativa
14	Ativa	Ativa	Inativa	Ativa
15	Ativa	Ativa	Ativa	Inativa
16	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa

Na tabela 10, para cada caso de configuração das antenas são apresentadas as leituras de potência obtidas com o analisador de espectro em [dBm]. A leitura de potência é somada ao ganho (para que a potência de entrada de cada antena chegue a 500 mW) e à atenuação do cabo (-2,54 dB). As conversões dos valores de [dBm] para [W] são feitas de acordo com a expressão (25).

Tabela 10- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição.

Configuração das antenas	Potência de recepção da antena log-periódica $P_{\text{antena}}$ (dBm)	Potência de recepção da antena log-periódica $P_{\text{antena}}$ (W)
1	-76,30	2,34E-11
2	-9,31	1,17E-04
3	-16,14	2,43E-05
4	-9,57	1,10E-04
5	-18,38	1,45E-05
6	-6,93	2,03E-04
7	-27,96	1,60E-06
8	-6,48	2,25E-04
9	-18,72	1,34E-05
10	-5,82	2,62E-04
11	-15,87	2,59E-05
12	-5,50	2,82E-04
13	-10,30	9,33E-05
14	-7,12	1,94E-04
15	-15,08	3,10E-05
16	-1,91	6,44E-04

Na tabela 11 são apresentados os valores de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente obtidos através das expressões (4), (26) e (29) respectivamente, utilizando os valores de fator de antena da log-periódica (fator multiplicativo de 27,7) e impedância de entrada de 47  $\Omega$ .

Nas figuras 36, 37 e 38 são mostrados os gráficos que comparam os valores medidos de potência nos terminais de entrada da log-periódica, os valores obtidos do campo elétrico e os valores obtidos da densidade de potência de onda plana equivalente para dezesseis configurações das quatro antenas monopolo no interior do automóvel.

Tabela 11- Valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente.

Configuração das Antenas	Campo Elétrico Resultante (V/m)	Densidade de Potência de Onda Plana Equivalente S (W/m <sup>2</sup> )
1	0,0009	2,24E-09
2	2,06	1,12E-02
3	0,94	2,33E-03
4	2,00	1,06E-02
5	0,72	1,39E-03
6	2,70	1,94E-02
7	0,24	1,53E-04
8	2,85	2,15E-02
9	0,70	1,28E-03
10	3,07	2,50E-02
11	0,97	2,48E-03
12	3,19	2,70E-02
13	1,83	8,93E-03
14	2,65	1,86E-02
15	1,06	2,97E-03
16	4,82	6,16E-02

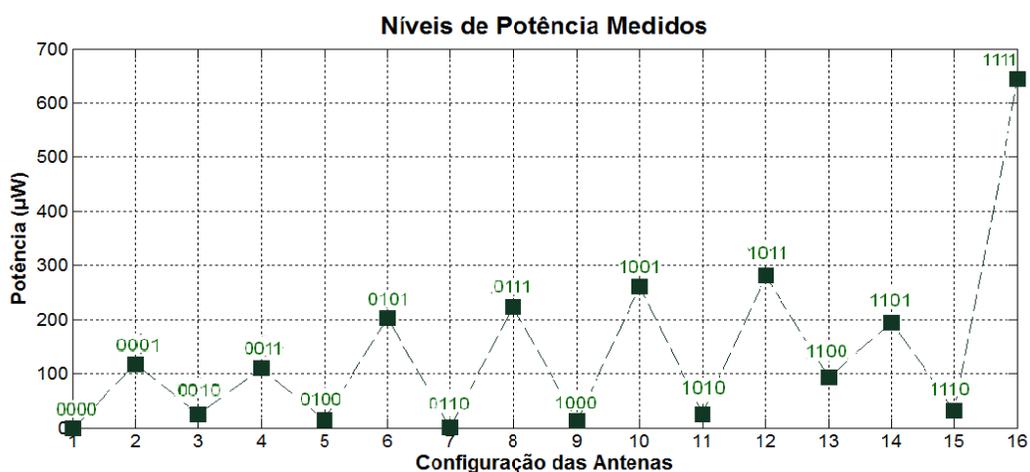


Figura 36- Níveis de Potência medidos com a antena log-periódica para dezesseis configurações das antenas monopolo no interior do automóvel.

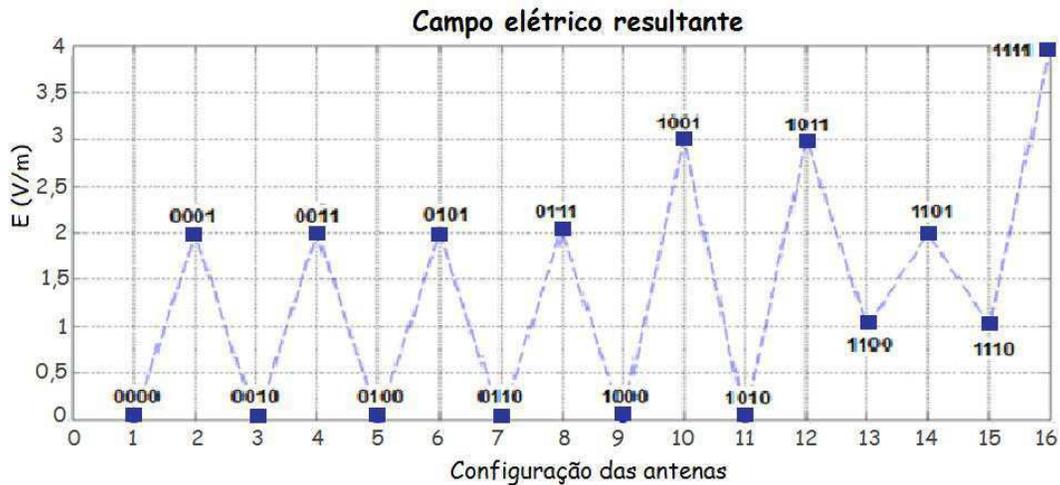


Figura 37- Valores calculados de campo elétrico para dezesseis configurações das antenas monopolo no interior do automóvel.

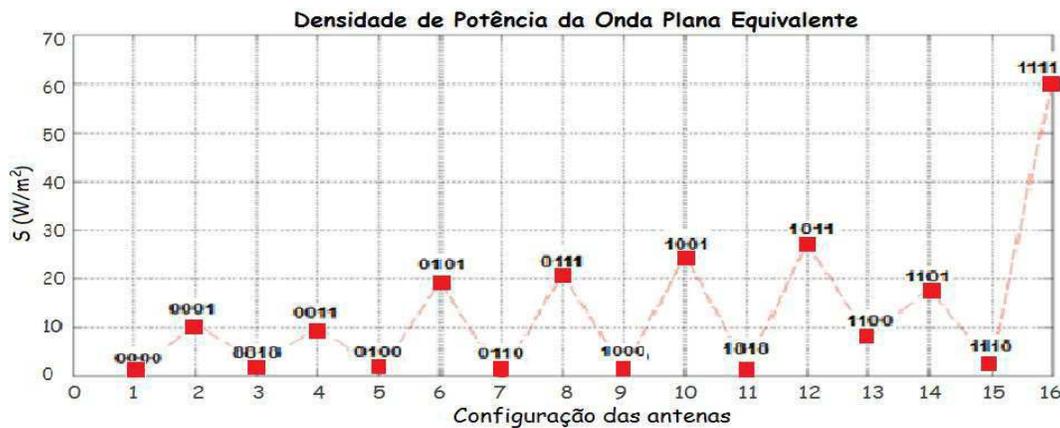


Figura 38- Valores calculados da densidade de potência de onda plana equivalente para dezesseis configurações das antenas monopolo no interior do automóvel.

Analisando os valores da tabela 10 observa-se que os níveis máximos de potência foram encontrados para as configurações das antenas 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14 e 16.

Este fato deve-se principalmente à ativação da antena 4 em todas as configurações referidas conforme é verificado no gráfico da figura 36, pois esta antena (localizada no banco do passageiro traseiro) encontra-se mais próxima da antena de medição log-periódica (localizada na janela da porta correspondente ao banco do motorista), mais precisamente a 90 cm de distância.

Analisando a tabela 11 e os gráficos das figuras 37 e 38, comparando os valores calculados de campo elétrico incidente e densidade de potência de onda plana equivalente no interior do automóvel com os limites de exposição estabelecidos pela Anatel, na faixa de frequência de 2 GHz a 300 GHz que são de 61 V/m e 10 W/m<sup>2</sup> respectivamente, nota-se que a contribuição das fontes eletromagnéticas para as distâncias de medição adotadas é muito pequena no cálculo do campo elétrico resultante. Este se apresentou muito abaixo, em todas as configurações das antenas, do valor limite recomendado pela Anatel, por conseguinte os valores de densidade de potência obtidos também ficaram muito abaixo do valor limite preconizado pela norma.

Logo, após o experimento com a antena log-periódica para a determinação da distribuição do campo eletromagnético no interior do automóvel, foi decidido utilizar uma antena menor que pudesse ser disposta em vários pontos no interior do automóvel obtendo assim, além de uma variabilidade do canal em função das fontes, uma maior proximidade entre a antena de medição e as fontes, permanecendo na região de campo distante, para a medição da potência absorvida no ambiente quase fechado.

#### **4.3.2 Experimento na Região Externa do Automóvel**

Nesta etapa foram verificados os valores de grandezas eletromagnéticas no exterior de um automóvel utilizando a antena log-periódica Rohde&Schwarz 12-144980 devido à presença de quatro antenas monopolo no interior do mesmo, com o intuito de observar a semelhança entre a estrutura metálica do automóvel e uma cavidade ressonante.

Foram realizadas medições para quatro regiões em volta do automóvel; para cada posição da antena de medição, foram medidos valores de potência para duas configurações das antenas monopolo: todas ligadas e todas desligadas e em duas situações: com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Tais medições foram realizadas para dois planos horizontais: as antenas monopolos dispostas no automóvel a 1,12 m de altura (plano 1) e a 1,26 m de altura (plano 2), conforme metodologia descrita no item (3.3.4) do capítulo 3.

Nas tabelas 12 a 15 são mostrados os valores de potência, de campo eletromagnético e de densidade de potência de onda plana equivalente para as medidas realizadas no exterior do automóvel para as antenas monopolo dispostas na altura do plano 1 no interior do mesmo. E nas tabelas 16 a 19 são mostradas as mesmas grandezas para as antenas monopolo dispostas na altura do plano 2 no interior do automóvel.

Tabela 12- Valores medidos de potência nos terminais de entrada da antena de medição em volta do automóvel com as antenas monopolo no interior do mesmo dispostas na altura do plano 1 e com todas as janelas fechadas.

Posições da antena log-periódica	Plano 1 (1,12 m)			
	Com as janelas fechadas			
	Todas as monopolos ativas		Todas as monopolos inativas	
	P (dBm)	P (W)	P (dBm)	P(W)
Na frente do automóvel	-8,91	1,29E-04	-47,49	1,78E-08
Na lateral esquerda- lado do banco do motorista	-10,05	9,89E-05	-51,48	7,11E-09
Na lateral direita- lado do banco do passageiro dianteiro	-6,73	2,12E-04	-47,46	1,79E-08
Atrás do automóvel	-0,41	9,10E-04	-42,27	5,93E-08

Tabela 13- Valores medidos de potência nos terminais de entrada da antena de medição em volta do automóvel com as antenas monopolo no interior do mesmo dispostas na altura do plano 1 e com todas as janelas abertas.

Posições da antena log-periódica	Plano 1 (1,12 m)			
	Com as janelas abertas			
	Todas as monopolos ativas		Todas as monopolos inativas	
	P (dBm)	P (W)	P (dBm)	P(W)
Na frente do automóvel	-12,15	6,10E-05	-46,88	2,05E-08
Na lateral direita – lado do banco do passageiro dianteiro	-12,99	5,02E-05	-48,71	1,35E-08
Na lateral esquerda- lado do banco do motorista	-7,88	1,63E-04	-50,59	8,73E-09
Atrás do automóvel	-1,23	7,53E-04	-40,94	8,05E-08

Tabela 14- Valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente em volta do automóvel com as antenas monopolo no interior do mesmo dispostas na altura do plano 1 e com todas as janelas fechadas.

Posições da antena log-periódica	Plano 1 (1,12 m)			
	Com as janelas fechadas			
	Todas as monopolos ativas		Todas as monopolos inativas	
	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )
Na frente do automóvel	2,15	1,23E-02	0,03	1,70E-06
Na lateral esquerda- lado do banco do motorista	1,89	9,46E-03	0,02	6,80E-07
Na lateral direita - lado do banco do passageiro dianteiro	2,77	2,03E-02	0,03	1,72E-06
Atrás do automóvel	5,73	8,70E-02	0,05	5,67E-06

Tabela 15- Valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente em volta do automóvel com as antenas monopolo no interior do mesmo dispostas na altura do plano 1 e com todas as janelas abertas.

Posições da antena log-periódica	Plano 1 (1,12 m)			
	Com as janelas abertas			
	Todas as monopolos ativas		Todas as monopolos inativas	
	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )
Na frente do automóvel	1,48	5,83E-03	0,03	1,96E-06
Na lateral direita - lado do banco do passageiro dianteiro	1,35	4,81E-03	0,02	1,29E-06
Na lateral esquerda- lado do banco do motorista	2,42	1,56E-02	0,02	8,35E-07
Atrás do automóvel	5,21	7,21E-02	0,05	7,70E-06

Na figura 39 é mostrado o gráfico que compara os valores obtidos do campo elétrico para as quatro localizações da antena de medição (1- na frente do automóvel, 2- na lateral direita- lado do banco do passageiro dianteiro, 3- na lateral esquerda- lado do banco do motorista e 4- atrás do automóvel) nas seguintes situações: todos os monopolos ativos com as janelas do automóvel fechadas, todos os monopolos ativos com as janelas abertas e todos os

monopólos inativos. Os valores de campo elétrico são para as antenas posicionadas no plano 1.

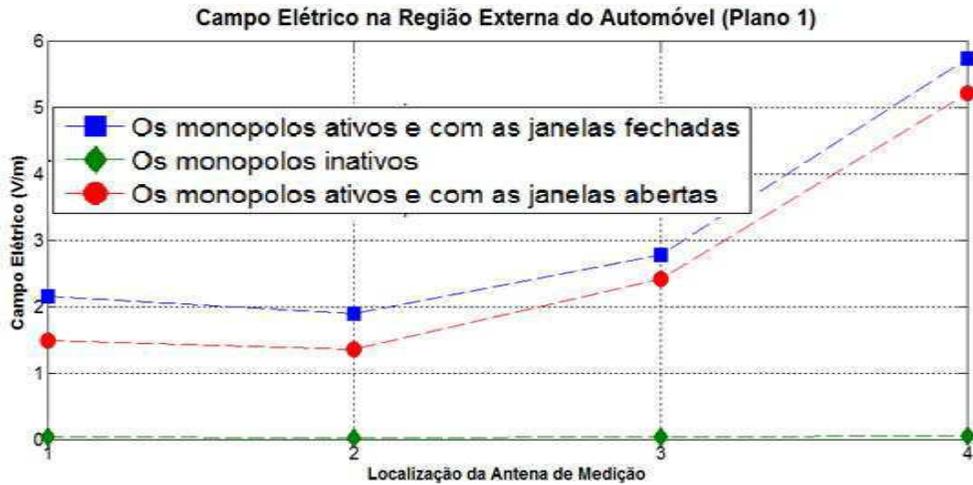


Figura 39- Valores calculados de campo elétrico para várias posições das antenas de medição no exterior do automóvel e com as antenas monopolo no interior do mesmo ativas e inativas.

Tabela 16- Valores medidos de potência nos terminais de entrada da antena de medição em volta do automóvel com as antenas monopolo no interior do mesmo dispostas na altura do plano 2 e com todas as janelas fechadas.

Posições da antena log-periódica	Plano 2 (1,26 m)			
	Com as janelas fechadas			
	Todas as monopólos ativas		Todas as monopólos inativas	
	P (dBm)	P (W)	P (dBm)	P (W)
Na frente do automóvel	-7,6	1,74E-04	-53,9	4,07E-09
Na lateral esquerda-lado do banco do motorista	-9,3	1,17E-04	-47,91	1,62E-08
Na lateral direita-lado do banco do passageiro dianteiro	-8,19	1,52E-04	-44,23	3,78E-08
Atrás do automóvel	-7,76	1,67E-04	-43,23	4,75E-08

Tabela 17- Valores medidos de potência nos terminais de entrada da antena de medição em volta do automóvel com as antenas monopolo no interior do mesmo dispostas na altura do plano 2 e com todas as janelas abertas.

Posições da antena log-periódica	Plano 2 (1,26 m)			
	Com as janelas abertas			
	Todas as monopolos ativas		Todas as monopolos inativas	
	P (dBm)	P (W)	P (dBm)	P(W)
Na frente do automóvel	-10,87	8,18E-05	-51,91	6,44E-09
Na lateral esquerda- lado do banco do motorista	-12,38	5,78E-05	-51,65	6,84E-09
Na lateral direita- lado do banco do passageiro dianteiro	-9,9	1,02E-04	-42,93	5,09E-08
Atrás do automóvel	-7,77	1,67E-04	-42,34	5,83E-08

Tabela 18- Valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente em volta do automóvel com as antenas monopolo no interior do mesmo dispostas na altura do plano 2 e com todas as janelas fechadas.

Posições da antena log-periódica	Plano 2 (1,26 m)			
	Com as janelas fechadas			
	Todas as monopolos ativas		Todas as monopolos inativas	
	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )
Na frente do automóvel	2,50	1,66E-02	0,01	3,90E-07
Na lateral esquerda- lado do banco do motorista	2,06	1,12E-02	0,02	1,55E-06
Na lateral direita- lado do banco do passageiro dianteiro	2,34	1,45E-02	0,04	3,61E-06
Atrás do automóvel	2,46	1,60E-02	0,04	4,55E-06

Tabela 19- Valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente em volta do automóvel com as antenas monopolo no interior do mesmo dispostas na altura do plano 2 e com todas as janelas abertas.

Posições da antena log-periódica	Plano 2 (1,26 m)			
	Com as janelas abertas			
	Todas as monopolos ativas		Todas as monopolos inativas	
	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )
Na frente do automóvel	1,72	7,83E-03	0,02	6,16E-07
Na lateral esquerda- lado do banco do motorista	1,44	5,53E-03	0,02	6,54E-07
Na lateral direita- lado do banco do passageiro dianteiro	1,92	9,79E-03	0,04	4,87E-06
Atrás do automóvel	2,45	1,60E-02	0,05	5,58E-06

Na figura 40 é mostrado o gráfico que compara os valores obtidos do campo elétrico para as quatro localizações da antena de medição nas mesmas situações analisadas na figura 39, mas agora os valores de campo elétrico são para as antenas posicionadas no plano 2.

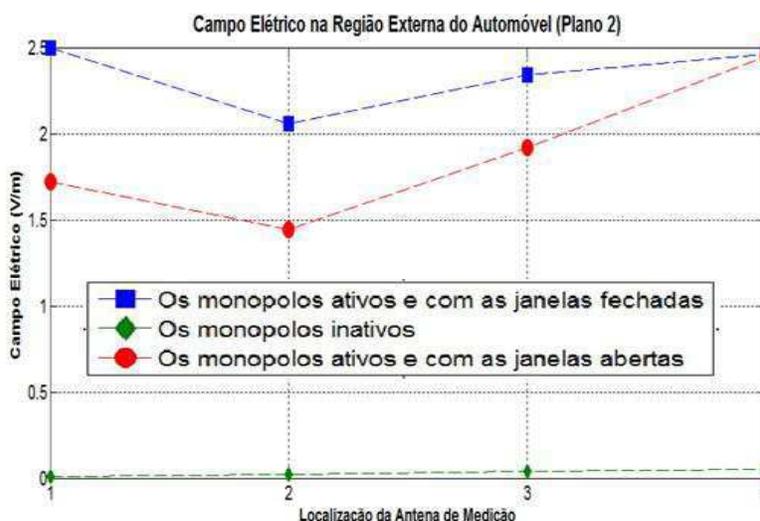


Figura 40- Valores calculados de campo elétrico para várias posições das antenas de medição no exterior do automóvel e com as antenas monopolo no interior do mesmo ativas e inativas.

As medidas no exterior do automóvel demonstraram que mesmo com a variação das posições das antenas monopolo no interior do automóvel com as janelas abertas ou fechadas e variação da posição da antena de medição no exterior do automóvel, chegou-se a resultados semelhantes.

Comparando os valores de campo elétrico obtidos para as situações em que as antenas estavam desligadas com os valores obtidos para as situações

com todas as antenas ligadas, conclui-se que o ambiente quase fechado do automóvel não possui comportamento tão próximo a câmara de reverberação para que esta sirva como referência na análise da variação de campo. Portanto, o automóvel não possui algumas características de uma cavidade ressonante, pois suas paredes metálicas não agem efetivamente como blindagens perfeitas, de modo que sua região interior seja perfeitamente blindada do exterior, impedindo qualquer irradiação.

Este resultado é comprovado pela influência das fontes ligadas no interior do automóvel no campo determinado no ambiente externo que o envolve. O campo resultante gerado pelas antenas monopolo não fica confinado no interior do automóvel. Os valores de campo elétrico obtidos no ambiente ao redor do automóvel chegam a aumentar até 250 vezes com a presença de todas as antenas monopolo ligadas no interior do mesmo, como no caso da medição na frente do automóvel conforme é mostrado na tabela 18.

#### **4.3.3 Medições no Espaço Livre com a Antena Log-periódica**

Nesta etapa foram verificados os valores de grandezas eletromagnéticas provenientes das quatro antenas monopolo conforme a metodologia descrita no item (3.3.5) do capítulo 3. As antenas estavam dispostas de forma a reproduzir com semelhança as distâncias entre os monopolos e a antena de medição no experimento realizado no interior do automóvel utilizando a antena log-periódica Rohde&Schwarz. Foram verificadas dezesseis configurações das antenas monopolo, nas quais as antenas apresentavam-se ligadas ou desligadas.

Essa etapa teve como intuito comparar os valores das grandezas obtidos no espaço livre como os valores das grandezas obtidos no interior do automóvel, e assim analisar a influência da estrutura metálica do automóvel no valor do campo elétrico resultante calculado para as várias configurações das fontes.

Na tabela 20, para cada caso de configuração das antenas são apresentadas as leituras de potência obtidas com o analisador de espectro em [dBm] e os valores convertidos para watt através da expressão (25). A leitura de potência é somada ao ganho (para que a potência de entrada de cada

antena chegue a 500 mW) e à atenuação do cabo (-2,54 dB) ligado a antena de medição log-periódica.

Tabela 20- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição para a situação dos monopolos no espaço livre.

Configurações das antenas	Potência de recepção da antena log-periódica $P_{antena}$ (dBm)	Potência de recepção da antena log-periódica $P_{antena}$ (W)
1	-54,32	3,70E-09
2	-21,89	6,47E-06
3	-11,70	6,76E-05
4	-6,74	2,12E-04
5	-16,05	2,48E-05
6	-12,34	5,83E-05
7	-13,27	4,71E-05
8	-7,53	1,77E-04
9	-18,49	1,42E-05
10	-12,10	6,17E-05
11	-6,85	2,07E-04
12	-4,00	3,98E-04
13	-11,38	7,28E-05
14	-6,89	2,05E-04
15	-5,95	2,54E-04
16	-2,30	5,89E-04

Na tabela 21 são apresentados os valores de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente obtidos através das expressões (4), (24) e (30), utilizando os valores de fator de antena da log-periódica (fator multiplicativo de 27,7) e impedância de entrada de 47  $\Omega$ .

Tabela 21- Valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para a situação das antenas monopolo dispostas no espaço livre.

Configurações das antenas	Campo Elétrico Resultante (V/m)	Densidade de Potência de Onda Plana Equivalente $S$ (W/m <sup>2</sup> )
1	0,01	3,54E-07
2	0,48	6,19E-04
3	1,56	6,47E-03
4	2,76	2,03E-02
5	0,95	2,38E-03
6	1,45	5,58E-03
7	1,30	4,51E-03
8	2,52	1,69E-02
9	0,71	1,35E-03
10	1,49	5,90E-03
11	2,73	1,98E-02
12	3,79	3,81E-02
13	1,62	6,96E-03
14	2,72	1,96E-02
15	3,03	2,43E-02
16	4,61	5,63E-02

Na figura 41 vê-se no gráfico onde se pode comparar os valores obtidos de campo elétrico para as dezesseis configurações das quatro antenas monopolo para duas situações: no interior do automóvel e no espaço livre com posicionamentos dos monopolos semelhantes.

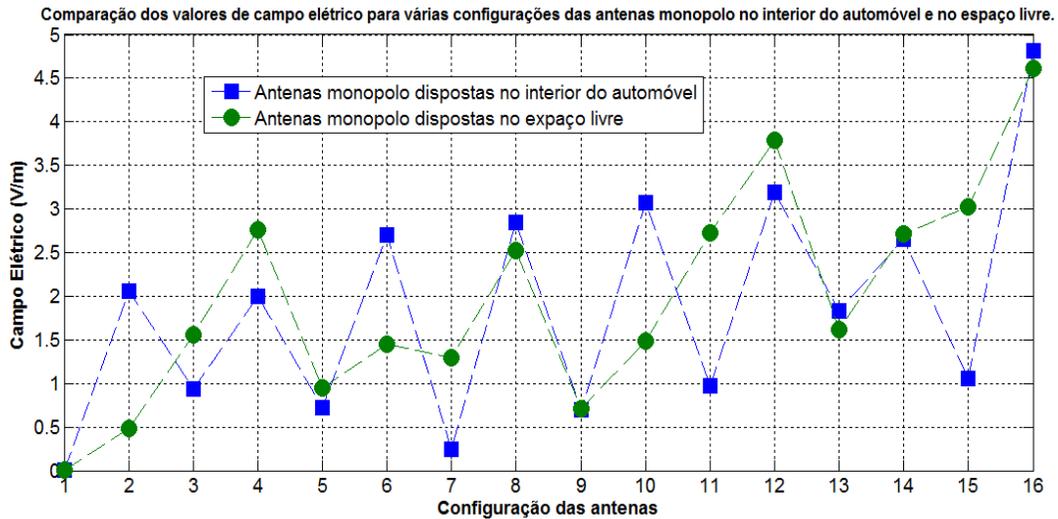


Figura 41- Comparação dos valores calculados de campo elétrico para várias configurações das antenas monopolo no interior do automóvel e no espaço livre.

Analisando o gráfico da Figura 41 e comparando os valores de campo elétrico obtidos para as dezesseis configurações das antenas nas duas situações: no interior do automóvel e no espaço livre, observou-se que para algumas configurações de status dos monopolos (2, 6, 8, 10, 13 e 16) os valores de campo no interior do automóvel foram maiores; este fato deve-se à soma de diversas ondas estacionárias existentes na estrutura metálica devido às múltiplas reflexões, formando assim combinações construtivas de campo.

Nas configurações de status dos monopolos que os valores de campo no interior do automóvel foram menores que os valores obtidos no espaço livre (1, 3, 4, 5, 7, 9, 11, 12, 14 e 15), têm-se uma formação de combinações destrutivas de campo no interior da estrutura metálica decorrentes dos elementos absorvedores como os bancos do automóvel e da degeneração de modos.

## **4.4 Experimento no Interior do Automóvel com a Antena Dipolo de Duplo Arco**

Nesta etapa para o mapeamento da distribuição do campo eletromagnético no interior do automóvel, foram realizadas medições de tensão e potência e calculados os valores de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente dos sinais provenientes das antenas monopolo. Utilizou-se como antena de medição o dipolo de duplo arco conforme metodologia descrita no item (3.4.3) do capítulo 3.

Os resultados do procedimento experimental foram organizados para duas etapas de medições realizadas em dois planos horizontais: a uma altura de 1,12 m do solo simulando a altura de uma criança ou adulto menor (plano 1) e a 1,26 m do solo simulando a altura de um adulto (plano 2), totalizando 384 medições. Essa metodologia foi adotada com o intuito de obter um maior número de pontos de medição para o mapeamento do campo eletromagnético no interior do automóvel, no qual é observada a influência da estrutura metálica e dos objetos absorvedores na constituição dos campos.

São apresentadas comparações entre os valores obtidos com as medições utilizando a antena log-periódica no interior do automóvel e no espaço livre, as medições utilizando o dipolo de duplo arco no interior do automóvel e o valor limite para a exposição humana a campos elétricos estabelecido pela Resolução nº 303 da Anatel de 2 de julho de 2002. São apresentadas também comparações entre valores obtidos para o plano 1 e 2 com os experimentos utilizando o dipolo de duplo arco no interior do automóvel.

### **4.4.1 Medições no Plano Horizontal 1 (1,12 m do Solo)**

As medições no plano horizontal 1 foram realizadas em cinco localizações da antena de medição dipolo de duplo arco no interior do automóvel: no banco do motorista, no banco do passageiro dianteiro e nos três lugares ocupados por passageiros no banco traseiro, para várias configurações das antenas monopolo. Para cada localização da antena de medição foram realizadas leituras de potência e tensão em duas situações: todas as janelas do

automóvel abertas e todas as janelas fechadas com o propósito de observar a reflexão e a refração das ondas eletromagnéticas nos vidros da janela.

#### 4.4.1.1 Antena de Medição Localizada no Banco do Motorista

Na tabela 22, para cada caso de configuração das antenas são apresentadas as leituras de potência obtidas pelo analisador de espectro em [dBm] com a antena de medição posicionada no banco ocupado pelo motorista, nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Os valores de potência para todas as localizações da antena de medição foram obtidos fornecendo inicialmente 1mW para as quatro antenas e em seguida foram somados aos ganhos (para que a potência de entrada de cada antena monopolo chegue a 500 mW) e à atenuação do cabo ligado a antena de medição dipolo de duplo arco (-2,54 dB).

Tabela 22- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco localizada no banco do motorista para os monopolos situados no interior do automóvel (plano 1).

Configuração das Antenas	Status das Antenas				Janelas Abertas	Janelas Fechadas
	Antena 01	Antena 02	Antena 03	Antena 04	Potência (dBm)	Potência (dBm)
1	Inativa	Inativa	Inativa	Inativa	-55,51	-53,68
2	Inativa	Inativa	Inativa	Ativa	-23,77	-22,38
3	Inativa	Inativa	Ativa	Inativa	-20,53	-17,22
4	Inativa	Inativa	Ativa	Ativa	-18,85	-16,69
5	Inativa	Ativa	Inativa	Inativa	-21,69	-22,27
6	Inativa	Ativa	Inativa	Ativa	-16,49	-18,27
7	Inativa	Ativa	Ativa	Inativa	-14,76	-12,85
8	Inativa	Ativa	Ativa	Ativa	-16,48	-14,4
9	Ativa	Inativa	Inativa	Inativa	-23,89	-26,63
10	Ativa	Inativa	Inativa	Ativa	-24,16	-18,76
11	Ativa	Inativa	Ativa	Inativa	-21,98	-23,3
12	Ativa	Inativa	Ativa	Ativa	-16,98	-11,73
13	Ativa	Ativa	Inativa	Inativa	-13,99	-15,94
14	Ativa	Ativa	Inativa	Ativa	-18,56	-19,06
15	Ativa	Ativa	Ativa	Inativa	-11,04	-12,33
16	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	-11,15	-7,91

Na tabela 23, para cada caso de configuração das antenas são apresentadas as leituras de tensão obtidas pelo analisador de espectro em [dB $\mu$ V] com a antena de medição posicionada no banco ocupado pelo motorista e os respectivos valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente, nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Os valores de tensão em todo as etapas do experimento com o dipolo de duplo arco foram obtidos fornecendo inicialmente a cada monopolo 1mW e em seguida foram somados aos ganhos (para que a potência de entrada de cada antena monopolo chegue a 500 mW). Estes valores de tensão obtidos nos experimentos foram medidos em instantes diferentes dos valores de potência para a mesma configuração das antenas monopolo, por exemplo, as grandezas tensão e potencia na configuração 14 das medições com o dipolo no banco do motorista foram medidas em instantes diferentes não podendo assim ser relacionadas.

Para o cálculo do campo elétrico foi utilizada a expressão (23), onde a perda do cabo considerada foi de 2,54 dB. Os valores de campo foram obtidos em dB $\mu$ V/m, para convertê-los para V/m foi usada a seguinte expressão:

$$E(V / m) = 10^{-6} \times 10^{\frac{E(dB\mu V/m)}{20}} \quad (34)$$

Para o cálculo da densidade de potência de onda plana equivalente foi utilizada a expressão (4).

Tabela 23- Valores medidos de tensão e valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para a situação das antenas monopolo dispostas no interior do automóvel utilizando como antena de medição dipolo de duplo arco localizada no banco do motorista (plano 1).

Configuração das Antenas	Janelas Abertas				Janelas Fechadas			
	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )
1	49,44	96,19	0,06	1,10E-05	52,61	99,36	0,09	2,29E-05
2	83,07	129,82	3,10	2,54E-02	80,99	127,74	2,44	1,58E-02
3	86,05	132,80	4,37	5,05E-02	87,75	134,50	5,31	7,48E-02
4	82,61	129,36	2,94	2,29E-02	87,80	134,55	5,34	7,56E-02
5	82,33	129,08	2,84	2,15E-02	83,26	130,01	3,17	2,66E-02
6	87,09	133,84	4,92	6,42E-02	86,69	133,44	4,70	5,86E-02
7	89,52	136,27	6,51	1,12E-01	91,77	138,52	8,43	1,89E-01
8	86,09	132,84	4,39	5,10E-02	90,19	136,94	7,03	1,31E-01
9	80,88	127,63	2,41	1,54E-02	77,46	124,21	1,62	6,99E-03
10	81,95	128,70	2,72	1,97E-02	85,08	131,83	3,90	4,04E-02
11	83,16	129,91	3,13	2,60E-02	80,45	127,20	2,29	1,39E-02
12	87,96	134,71	5,44	7,85E-02	91,98	138,73	8,64	1,98E-01
13	91,17	137,92	7,87	1,64E-01	88,53	135,28	5,81	8,95E-02
14	86,21	132,96	4,45	5,24E-02	86,32	133,07	4,50	5,38E-02
15	93,99	140,74	10,89	3,15E-01	92,35	139,10	9,02	2,16E-01
16	93,42	140,17	10,20	2,76E-01	96,45	143,20	14,45	5,54E-01

Na figura 42 é mostrado o gráfico que compara os valores obtidos de potência entre as medições utilizando a antena log-periódica no interior do automóvel e no espaço livre e as medições utilizando o dipolo de duplo arco no interior do automóvel.

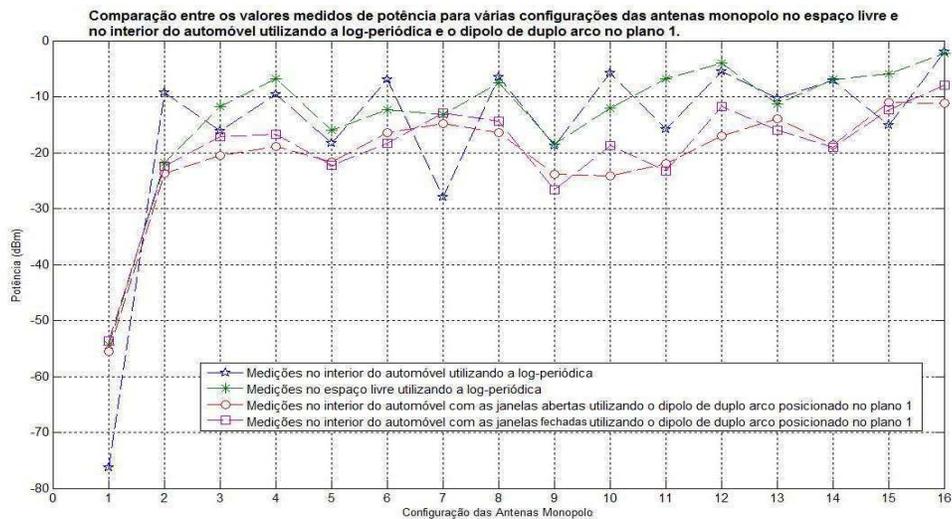


Figura 42- Comparação entre os valores de potência para dezesseis configurações das antenas monopolo em quatro situações.

Observando o gráfico da figura 42, constata-se que foram obtidos maiores níveis de potencia nas medições realizadas com a antena log-periodica em comparação com os níveis obtidos utilizando o dipolo de duplo arco, este fato deve-se principalmente por a antena log-periodica apresentar um melhor fator de antena como antena de recepção.

Na figura 43 é mostrado o gráfico que compara os valores obtidos de campo elétrico entre as medições utilizando a antena log-periódica no interior do automóvel e no espaço livre, as medições utilizando o dipolo de duplo arco no interior do automóvel e o valor limite para a exposição humana a campos elétricos estabelecido pela Resolução.

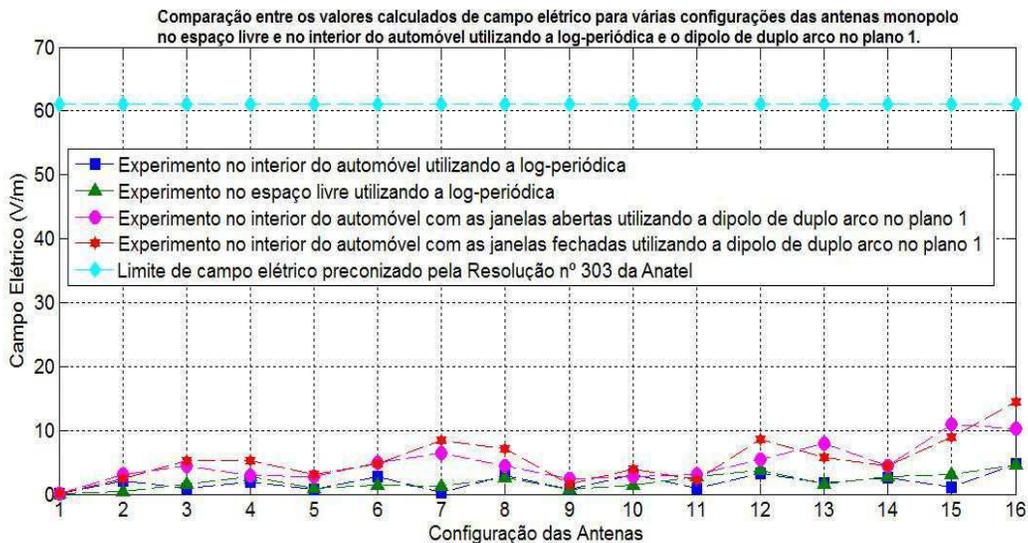


Figura 43- Comparação entre os valores de campo elétrico para dezesseis configurações das antenas monopolo em quatro situações e o valor limite estabelecido pela norma.

Observando o gráfico da figura 43, constata-se que foram obtidos maiores valores de campo elétrico nas medições realizadas com o dipolo de duplo arco em comparação com os níveis obtidos utilizando a log-periodica, este fato deve-se principalmente pelas menores distancias entre as antenas monopolo e a antena de medição dipolo de duplo arco com relação às distancias entre os monopolos e a log-periodica. Para as situações com as janelas abertas e fechadas com o dipolo de duplo arco no interior do automóvel, em nove configurações foram obtidos valores de campo maiores com as janelas fechadas, o que mostra a influência das reflexões das ondas

estacionarias devido ao vidro que se somam aumentando o valor do campo resultante no interior do automóvel. O valor limite de campo elétrico estabelecido pela Resolução nº 303 da Anatel é bem maior do que os valores obtidos nas situações estudadas nesta etapa.

#### 4.4.1.2 Antena de Medição Localizada no Banco do Passageiro Dianteiro (Posição da Antena 01)

Na tabela 24, para cada caso de configuração de três antenas monopolo são apresentadas as leituras de potência obtidas pelo analisador de espectro em [dBm] com a antena de medição posicionada no banco ocupado pelo passageiro dianteiro, nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Tabela 24- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro dianteiro (da antena 01) para os monopolos situados no interior do automóvel.

Configuração das antenas 	Status das antenas			Janelas abertas	Janelas fechadas
	Antena 02	Antena 03	Antena 04	Potência (dBm)	Potência (dBm)
1	Inativa	Inativa	Inativa	-55,36	-50,95
2	Inativa	Inativa	Ativa	-26,67	-23,74
3	Inativa	Ativa	Inativa	-22,40	-22,78
4	Inativa	Ativa	Ativa	-20,63	-18,72
5	Ativa	Inativa	Inativa	-19,43	-18,42
6	Ativa	Inativa	Ativa	-16,61	-14,66
7	Ativa	Ativa	Inativa	-12,80	-13,11
8	Ativa	Ativa	Ativa	-10,9	-10,93

Na tabela 25, para cada caso de configuração das antenas são apresentadas as leituras de tensão obtidas pelo analisador de espectro em [dBµV] e os respectivos valores de campo elétrico e densidade de onda plana equivalente com a antena de medição posicionada no banco ocupado pelo passageiro dianteiro, nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

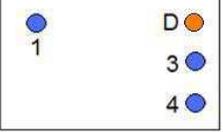
Tabela 25- Valores medidos de tensão e calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para a situação das antenas monopolo dispostas no interior do automóvel utilizando como antena de medição dipolo de duplo arco localizada no banco do passageiro dianteiro (plano 1).

Configuração das Antenas	Janelas abertas				Janelas fechadas			
	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )
1	54,41	101,16	0,11	3,46E-05	55,41	102,16	0,13	4,36E-05
2	83,94	130,69	3,42	3,11E-02	83,47	130,22	3,24	2,79E-02
3	85,63	132,38	4,16	4,59E-02	85,57	132,32	4,13	4,53E-02
4	86,45	133,20	4,57	5,54E-02	84,55	131,30	3,67	3,58E-02
5	86,61	133,36	4,66	5,75E-02	88,49	135,24	5,78	8,86E-02
6	90,00	136,75	6,88	1,26E-01	92,84	139,59	9,54	2,41E-01
7	94,23	140,98	11,19	3,32E-01	94,06	140,81	10,98	3,20E-01
8	95,40	142,15	12,81	4,35E-01	95,31	142,06	12,68	4,26E-01

#### 4.4.1.3 Antena de Medição Localizada no Banco do Passageiro Traseiro (Posição da Antena 02)

Na tabela 26, para cada caso de configuração de três antenas monopolo são apresentadas as leituras de potência obtidas pelo analisador de espectro em [dBm] com a antena de medição localizada no banco traseiro ocupado pelo passageiro na posição da antena 02, nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Tabela 26- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro traseiro da antena 02 para os monopolos situados no interior do automóvel (plano 1).

Configuração das antenas 	Status das antenas			Janelas abertas	Janelas fechadas
	Antena 01	Antena 03	Antena 04	Potência (dBm)	Potência (dBm)
1	Inativa	Inativa	Inativa	-49,78	-46,75
2	Inativa	Inativa	Ativa	-17,95	-19,17
3	Inativa	Ativa	Inativa	-16,89	-17,06
4	Inativa	Ativa	Ativa	-17,23	-15,06
5	Ativa	Inativa	Inativa	-20,59	-17,81
6	Ativa	Inativa	Ativa	-21,69	-26,69
7	Ativa	Ativa	Inativa	-11,78	-11,94
8	Ativa	Ativa	Ativa	-11,38	-11,22

Na tabela 27, para cada caso de configuração das antenas são apresentadas as leituras de tensão obtidas pelo analisador de espectro em [dB $\mu$ V] e os respectivos valores de campo elétrico e densidade de onda plana equivalente com a antena de medição posicionada no banco ocupado pelo passageiro do banco traseiro (antena 02) , nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

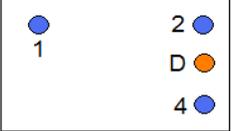
Tabela 27- Valores medidos de tensão e calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para a situação das antenas monopolo dispostas no interior do automóvel utilizando como antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro do banco traseiro- antena 02 (plano 1).

Configuração das Antenas	Janelas abertas				Janelas fechadas			
	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )
1	54,81	101,56	0,12	3,80E-05	60,88	107,63	0,24	1,54E-04
2	87,71	134,46	5,28	7,41E-02	87,52	134,27	5,17	7,09E-02
3	89,3	136,05	6,35	1,07E-01	90,52	137,27	7,30	1,41E-01
4	89,44	136,19	6,45	1,10E-01	92,09	138,84	8,75	2,03E-01
5	86,52	133,27	4,61	5,63E-02	83,61	130,36	3,30	2,88E-02
6	85,00	131,75	3,87	3,97E-02	81,47	128,22	2,58	1,76E-02
7	95,14	141,89	12,43	4,10E-01	95,33	142,08	12,71	4,28E-01
8	94,99	141,74	12,22	3,96E-01	95,70	142,45	13,26	4,66E-01

#### 4.4.1.4 Antena de Medição Localizada no Banco do Passageiro Traseiro (Posição da Antena 03)

Na tabela 28, para cada caso de configuração de três antenas monopolo são apresentadas as leituras de potência obtidas pelo analisador de espectro em [dBm] com a antena de medição localizada no banco traseiro ocupado pelo passageiro na posição da antena 03, nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Tabela 28- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro traseiro da antena 03 para os monopolos situados no interior do automóvel (plano 1).

Configuração das antenas 	Status das antenas			Janelas abertas	Janelas fechadas
	Antena 01	Antena 02	Antena 04	Potência (dBm)	Potência (dBm)
1	Inativa	Inativa	Inativa	-56,77	-56,50
2	Inativa	Inativa	Ativa	-18,92	-18,82
3	Inativa	Ativa	Inativa	-19,15	-23,01
4	Inativa	Ativa	Ativa	-12,23	-12,02
5	Ativa	Inativa	Inativa	-28,28	-27,07
6	Ativa	Inativa	Ativa	-14,09	-13,81
7	Ativa	Ativa	Inativa	-16,41	-18,17
8	Ativa	Ativa	Ativa	-9,01	-9,62

Na tabela 29, para cada caso de configuração das antenas são apresentadas as leituras de tensão obtidas pelo analisador de espectro em [dB $\mu$ V] e os respectivos valores de campo elétrico e densidade de onda plana equivalente com a antena de medição localizada no banco traseiro ocupado pelo passageiro na posição da antena 03, nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Tabela 29- Valores medidos de tensão e calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para os monopolos dispostos no interior do automóvel utilizando como antena de medição o dipolo de duplo arco na posição do passageiro do banco traseiro-antena 03 (plano 1).

Configuração das Antenas	Janelas abertas				Janelas fechadas			
	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )
1	50,30	97,05	0,07	1,34E-05	50,41	97,16	0,07	1,38E-05
2	88,19	134,94	5,58	8,27E-02	87,97	134,72	5,45	7,86E-02
3	87,25	134,00	5,01	6,66E-02	84,19	130,94	3,52	3,29E-02
4	94,77	141,52	11,91	3,76E-01	95,81	142,56	13,43	4,78E-01
5	76,60	123,35	1,47	5,74E-03	79,87	126,62	2,14	1,22E-02
6	93,20	139,95	9,94	2,62E-01	92,62	139,37	9,30	2,29E-01
7	90,09	136,84	6,95	1,28E-01	89,36	136,11	6,39	1,08E-01
8	98,23	144,98	17,74	8,35E-01	97,20	143,95	15,76	6,59E-01

#### 4.4.1.5 Antena de Medição Localizada no Banco do Passageiro Traseiro (Posição da Antena 04)

Na tabela 30, para cada caso de configuração de três antenas monopolo são apresentadas as leituras de potência obtidas pelo analisador de espectro em [dBm] com a antena de medição localizada no banco traseiro ocupado pelo passageiro na posição da antena 04, nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Tabela 30- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro traseiro da antena 04 para os monopolos situados no interior do automóvel (plano 1).

Configuração das antenas 	Status das antenas			Janelas abertas	Janelas fechadas
	Antena 01	Antena 02	Antena 03	Potência (dBm)	Potência (dBm)
1	Inativa	Inativa	Inativa	-50,86	-52,73
2	Inativa	Inativa	Ativa	-21,65	-20,78
3	Inativa	Ativa	Inativa	-19,85	-21,21
4	Inativa	Ativa	Ativa	-15,88	-15,80
5	Ativa	Inativa	Inativa	-20,35	-21,03
6	Ativa	Inativa	Ativa	-17,17	-14,34
7	Ativa	Ativa	Inativa	-22,05	-24,28
8	Ativa	Ativa	Ativa	-21,04	-16,55

Na tabela 31, para cada caso de configuração das antenas são apresentadas as leituras de tensão obtidas pelo analisador de espectro em [dBµV] e os respectivos valores de campo elétrico e densidade de onda plana equivalente com a antena de medição localizada no banco traseiro ocupado pelo passageiro na posição da antena 04, nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Tabela 31- Valores medidos de tensão e calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para os monopolos dispostos no interior do automóvel utilizando como antena de medição o dipolo de duplo arco na posição do passageiro do banco traseiro- antena 04 (plano 1).

Configuração das Antenas	Janelas abertas				Janelas fechadas			
	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )
1	58,78	105,53	0,19	9,48E-05	52,50	99,25	0,09	2,23E-05
2	84,97	131,72	3,85	3,94E-02	85,80	132,55	4,24	4,77E-02
3	84,91	131,66	3,83	3,89E-02	84,69	131,44	3,73	3,70E-02
4	91,30	138,05	7,99	1,69E-01	91,77	138,52	8,43	1,89E-01
5	86,38	133,13	4,53	5,45E-02	85,60	132,35	4,14	4,56E-02
6	89,89	136,64	6,79	1,22E-01	93,27	140,02	10,02	2,66E-01
7	85,44	132,19	4,07	4,39E-02	81,00	127,75	2,44	1,58E-02
8	95,90	142,65	13,57	4,88E-01	89,92	136,67	6,82	1,23E-01

#### 4.4.2 Medições no Plano Horizontal 2 (1,26 m do Solo)

As medições no plano horizontal 2 foram realizadas nas mesmas cinco localizações da antena de medição dipolo de duplo arco no interior do automóvel para o plano horizontal 1. E para as mesmas situações: todas as janelas do automóvel abertas e todas as janelas fechadas com o mesmo propósito.

##### 4.4.2.1 Antena de Medição Localizada no Banco do Motorista (Plano 2)

Na tabela 32, para cada caso de configuração das antenas são apresentadas as leituras de potência obtidas pelo analisador de espectro em [dBm] com a antena de medição posicionada no banco ocupado pelo motorista, nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Os valores de potencia nos experimentos realizados no plano 2 foram obtidos nas mesmas condições que os experimentos realizados no plano 1.

Tabela 32- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco localizada no banco do motorista para os monopolos situados no interior do automóvel (plano 2).

Configuração das Antenas	Status das Antenas				Janelas abertas	Janelas fechadas
					Potência (dBm)	Potência (dBm)
1	Inativa	Inativa	Inativa	Inativa	-53,85	-52,41
2	Inativa	Inativa	Inativa	Ativa	-25,16	-19,3
3	Inativa	Inativa	Ativa	Inativa	-23,11	-24,77
4	Inativa	Inativa	Ativa	Ativa	-21,73	-16,23
5	Inativa	Ativa	Inativa	Inativa	-22,08	-25,45
6	Inativa	Ativa	Inativa	Ativa	-19,65	-20,46
7	Inativa	Ativa	Ativa	Inativa	-18,76	-19,32
8	Inativa	Ativa	Ativa	Ativa	-19,54	-15,08
9	Ativa	Inativa	Inativa	Inativa	-21,14	-23,17
10	Ativa	Inativa	Inativa	Ativa	-15,40	-13,99
11	Ativa	Inativa	Ativa	Inativa	-14,87	-13,29
12	Ativa	Inativa	Ativa	Ativa	-9,73	-11,18
13	Ativa	Ativa	Inativa	Inativa	-20,87	-19,38
14	Ativa	Ativa	Inativa	Ativa	-12,56	-13,00
15	Ativa	Ativa	Ativa	Inativa	-20,00	-20,25
16	Ativa	Ativa	Ativa	Ativa	-12,80	-13,48

Na tabela 33, para cada caso de configuração das antenas dispostas no plano 2 são apresentadas as leituras de tensão obtidas pelo analisador de espectro em [dB $\mu$ V] com a antena de medição posicionada no banco ocupado pelo motorista e os respectivos valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente, nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Na Figura 44 é mostrado o gráfico que compara os valores obtidos de potência entre as medições utilizando a antena log-periódica no interior do automóvel e no espaço livre e as medições utilizando o dipolo de duplo arco no interior do automóvel para a situação dos monopolos dispostos no plano 2 .

Tabela 33- Valores medidos de tensão e valores calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para a situação das antenas monopolo dispostas no interior do automóvel utilizando como antena de medição dipolo de duplo arco localizada no banco do motorista (plano 2).

Configuração das Antenas	Janelas abertas				Janelas fechadas			
	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )
1	50,22	96,97	0,07	1,32E-05	50,88	97,63	0,08	1,54E-05
2	79,10	125,85	1,96	1,02E-02	84,38	131,13	3,60	3,44E-02
3	81,27	128,02	2,52	1,68E-02	80,90	127,65	2,41	1,54E-02
4	82,62	129,37	2,94	2,29E-02	88,17	134,92	5,57	8,23E-02
5	81,87	128,62	2,70	1,93E-02	78,77	125,52	1,89	9,45E-03
6	86,09	132,84	4,39	5,10E-02	85,12	131,87	3,92	4,08E-02
7	87,16	133,91	4,96	6,53E-02	84,97	131,72	3,85	3,94E-02
8	83,71	130,46	3,33	2,95E-02	89,54	136,29	6,52	1,13E-01
9	82,29	129,04	2,83	2,13E-02	80,60	127,35	2,33	1,44E-02
10	89,42	136,17	6,43	1,10E-01	89,86	136,61	6,77	1,22E-01
11	89,41	136,16	6,43	1,10E-01	91,58	138,33	8,25	1,81E-01
12	94,45	141,20	11,48	3,50E-01	94,09	140,84	11,02	3,22E-01
13	84,91	131,66	3,83	3,89E-02	85,81	132,56	4,25	4,78E-02
14	91,92	138,67	8,58	1,95E-01	91,12	137,87	7,83	1,62E-01
15	84,32	131,07	3,58	3,39E-02	85,46	132,21	4,08	4,41E-02
16	89,31	136,06	6,35	1,07E-01	90,76	137,51	7,51	1,50E-01

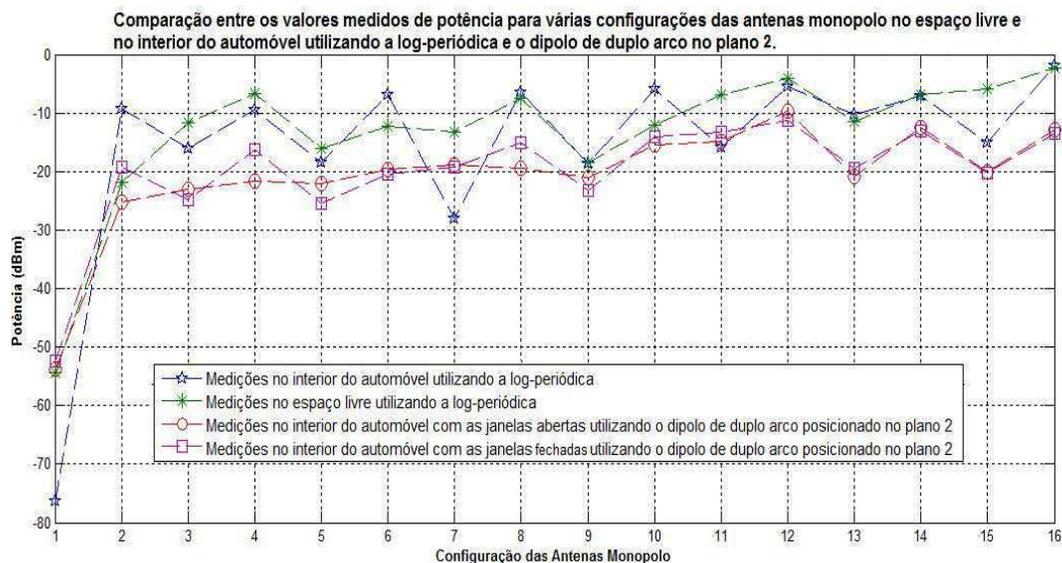


Figura 44- Comparação entre os valores de potência para dezesseis configurações das antenas monopolo em quatro situações, sendo estas posicionadas no plano 2 quando no interior do automóvel com o dipolo de duplo arco.

Observando o gráfico da figura 44, constata-se que foram obtidos maiores níveis de potência nas medições realizadas com a antena log-periodica em comparação com os níveis obtidos utilizando o dipolo de duplo arco. Com era de se esperar, pois este mesmo fato ocorreu com as medições utilizando o mesmo dipolo de duplo arco no plano 1.

Na figura 45 vê-se o gráfico onde se pode comparar os valores obtidos de campo elétrico entre as medições utilizando a antena log-periódica no interior do automóvel e no espaço livre, as medições utilizando o dipolo de duplo arco no interior do automóvel (plano 2) e o valor limite para a exposição humana a campos elétricos estabelecido pela Resolução.

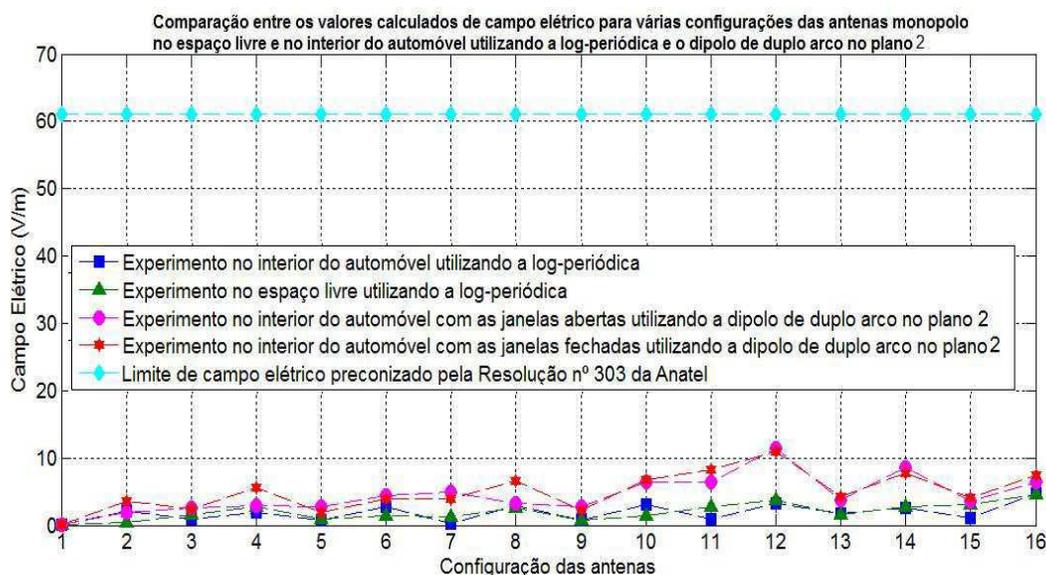


Figura 45- Comparação entre os valores de campo elétrico para dezesseis configurações das antenas monopolo em quatro situações, sendo estas posicionadas no plano 2 quando no interior do automóvel com o dipolo de duplo arco, e o valor limite estabelecido pela norma.

Observando o gráfico da figura 45, constata-se novamente que foram obtidos maiores valores de campo elétrico nas medições realizadas com o dipolo de duplo arco em comparação com os níveis obtidos utilizando a log-periodica, pelo mesmo motivo descrito para o experimento no plano 1. Para as situações com as janelas abertas e fechadas com o dipolo de duplo arco no interior do automóvel, no caso dos experimentos no plano 2, os valores de campo obtidos para as duas situações- com janelas abertas e janelas fechadas foram mais próximos do que os experimentos realizados no plano 1 nas mesmas situações, mostrando assim uma variação da distribuição dos campos de um plano para outro mais próximo da estrutura metálica

superior do automóvel. Nas situações estudadas nesta etapa os valores de campo e densidade de potência de onda plana equivalente permaneceram bem abaixo do valor limite de campo elétrico e densidade de potência estabelecidos pela Resolução nº 303 da Anatel.

#### 4.4.2.2 Antena de Medição Localizada no Banco do Passageiro Dianteiro (Posição da Antena 01 no Plano 2)

Na tabela 34, para cada caso de configuração de três antenas monopolo são apresentadas as leituras de potência obtidas pelo analisador de espectro em [dBm] com a antena de medição posicionada no banco ocupado pelo passageiro dianteiro (plano 2), nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Tabela 34- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro dianteiro (da antena 01) para os monopolos situados no interior do automóvel- plano 2.

Configuração das antenas 	Status das antenas			Janelas abertas	Janelas fechadas
	Antena 02	Antena 03	Antena 04	Potência (dBm)	Potência (dBm)
1	Inativa	Inativa	Inativa	-55,25	-57,39
2	Inativa	Inativa	Ativa	-30,09	-28,78
3	Inativa	Ativa	Inativa	-26,24	-24,48
4	Inativa	Ativa	Ativa	-20,86	-20,13
5	Ativa	Inativa	Inativa	-24,9	-26,79
6	Ativa	Inativa	Ativa	-17,31	-18,41
7	Ativa	Ativa	Inativa	-19,72	-19,59
8	Ativa	Ativa	Ativa	-14,44	-14,65

Na tabela 35, para cada caso de configuração das antenas são apresentadas as leituras de tensão obtidas pelo analisador de espectro em [dBµV] e os respectivos valores de campo elétrico e densidade de onda plana equivalente com a antena de medição posicionada no banco ocupado pelo passageiro dianteiro (plano 2), nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

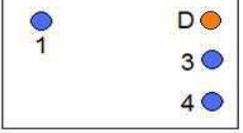
Tabela 35- Valores medidos de tensão e calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para a situação das antenas monopolo dispostas no interior do automóvel utilizando como antena de medição dipolo de duplo arco localizada no banco do passageiro dianteiro (plano 2).

Configuração das Antenas	Janelas abertas				Janelas fechadas			
	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )
1	50,44	97,19	0,07	1,39E-05	52,08	98,83	0,09	2,03E-05
2	77,75	124,50	1,68	7,48E-03	77,49	124,24	1,63	7,04E-03
3	80,52	127,27	2,31	1,41E-02	82,15	128,90	2,79	2,06E-02
4	87,23	133,98	5,00	6,63E-02	88,14	134,89	5,55	8,18E-02
5	79,99	126,74	2,17	1,25E-02	80,68	127,43	2,35	1,47E-02
6	89,39	136,14	6,41	1,09E-01	88,09	134,84	5,52	8,08E-02
7	88,17	134,92	5,57	8,23E-02	86,03	132,78	4,36	5,03E-02
8	92,07	138,82	8,73	2,02E-01	92,37	139,12	9,04	2,17E-01

#### 4.4.2.3 Antena de Medição Localizada no Banco do Passageiro Traseiro (Posição da Antena 02 no Plano 2)

Na tabela 36, para cada caso de configuração de três antenas monopolo são apresentadas as leituras de potência obtidas pelo analisador de espectro em [dBm] com a antena de medição localizada no banco traseiro ocupado pelo passageiro na posição da antena 02 (plano 2), nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Tabela 36- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro traseiro da antena 02 para os monopulos situados no interior do automóvel (plano 2).

Configuração das antenas 	Status das antenas			Janelas abertas	Janelas fechadas
	Antena 01	Antena 03	Antena 04	Potência (dBm)	Potência (dBm)
1	Inativa	Inativa	Inativa	-57,44	-56,38
2	Inativa	Inativa	Ativa	-27,45	-25,34
3	Inativa	Ativa	Inativa	-21,70	-24,07
4	Inativa	Ativa	Ativa	-19,69	-16,75
5	Ativa	Inativa	Inativa	-29,49	-25,76
6	Ativa	Inativa	Ativa	-23,08	-24,42
7	Ativa	Ativa	Inativa	-24,84	-20,38
8	Ativa	Ativa	Ativa	-20,68	-17,04

Na tabela 37, para cada caso de configuração das antenas são apresentadas as leituras de tensão obtidas pelo analisador de espectro em [dB $\mu$ V] e os respectivos valores de campo elétrico e densidade de onda plana equivalente com a antena de medição posicionada no banco ocupado pelo passageiro do banco traseiro (antena 02 no plano 2), nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Tabela 37- Valores medidos de tensão e calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para a situação das antenas monopolo dispostas no interior do automóvel utilizando como antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro do banco traseiro- antena 02 (plano 2).

Configuração das Antenas	Janelas abertas				Janelas fechadas			
	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )
1	50,44	97,19	0,07	1,39E-05	49,19	95,94	0,06	1,04E-05
2	77,37	124,12	1,61	6,85E-03	80,87	127,62	2,40	1,53E-02
3	84,26	131,01	3,55	3,35E-02	83,71	130,46	3,33	2,95E-02
4	86,53	133,28	4,61	5,64E-02	90,61	137,36	7,38	1,44E-01
5	81,27	128,02	2,52	1,68E-02	76,29	123,04	1,42	5,34E-03
6	80,20	126,95	2,23	1,31E-02	82,52	129,27	2,91	2,24E-02
7	83,83	130,58	3,38	3,03E-02	87,12	133,87	4,94	6,47E-02
8	85,28	132,03	3,99	4,23E-02	89,49	136,24	6,49	1,12E-01

#### 4.4.2.4 Antena de Medição Localizada no Banco do Passageiro Traseiro (Posição da Antena 03 no plano 2)

Na tabela 38, para cada caso de configuração de três antenas monopolo são apresentadas as leituras de potência obtidas pelo analisador de espectro em [dBm] com a antena de medição localizada no banco traseiro ocupado pelo passageiro na posição da antena 03 (plano 2), nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Tabela 38- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro traseiro da antena 03 para os monopolos situados no interior do automóvel (plano 2).

Configuração das antenas	Status das antenas			Janelas abertas	Janelas fechadas
	Antena 01	Antena 02	Antena 04	Potência (dBm)	Potência (dBm)
1	Inativa	Inativa	Inativa	-56,42	-54,92
2	Inativa	Inativa	Ativa	-21,49	-21,76
3	Inativa	Ativa	Inativa	-29,48	-24,10
4	Inativa	Ativa	Ativa	-15,39	-15,28
5	Ativa	Inativa	Inativa	-26,60	-29,21
6	Ativa	Inativa	Ativa	-14,83	-15,97
7	Ativa	Ativa	Inativa	-18,61	-23,14
8	Ativa	Ativa	Ativa	-10,54	-12,49

Na tabela 39, para cada caso de configuração das antenas são apresentadas as leituras de tensão obtidas pelo analisador de espectro em [dB $\mu$ V] e os respectivos valores de campo elétrico e densidade de onda plana equivalente com a antena de medição posicionada no banco ocupado pelo passageiro do banco traseiro (antena 03 no plano 2) , nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Tabela 39- Valores medidos de tensão e calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para a situação das antenas monopolo dispostas no interior do automóvel utilizando como antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro do banco traseiro- antena 03 (plano 2).

Configuração das Antenas	Janelas abertas				Janelas fechadas			
	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )
1	53,42	100,17	0,10	2,76E-05	51,64	98,39	0,08	1,83E-05
2	85,90	132,65	4,29	4,88E-02	84,35	131,10	3,59	3,42E-02
3	77,35	124,10	1,60	6,82E-03	80,71	127,46	2,36	1,48E-02
4	91,83	138,58	8,49	1,91E-01	91,44	138,19	8,12	1,75E-01
5	79,18	125,93	1,98	1,04E-02	78,71	125,46	1,87	9,33E-03
6	92,67	139,42	9,35	2,32E-01	89,98	136,73	6,86	1,25E-01
7	89,09	135,84	6,19	1,02E-01	84,81	131,56	3,78	3,80E-02
8	96,37	143,12	14,32	5,44E-01	94,59	141,34	11,67	3,61E-01

#### 4.4.2.5 Antena de Medição Localizada no Banco do Passageiro Traseiro (Posição da Antena 04)

Na tabela 40, para cada caso de configuração de três antenas monopolo são apresentadas as leituras de potência obtidas pelo analisador de espectro em [dBm] com a antena de medição localizada no banco traseiro ocupado pelo passageiro na posição da antena 04 (plano 2), nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Tabela 40- Valores medidos de potência com o analisador de espectro nos terminais de entrada da antena de medição dipolo de duplo arco na posição do passageiro traseiro da antena 04 para os monopolos situados no interior do automóvel (plano 2).

Configuração das antenas 	Status das antenas			Janelas abertas	Janelas fechadas
	Antena 01	Antena 02	Antena 03	Potência (dBm)	Potência (dBm)
1	Inativa	Inativa	Inativa	-55,42	-56,47
2	Inativa	Inativa	Ativa	-22,26	-23,64
3	Inativa	Ativa	Inativa	-22,01	-22,6
4	Inativa	Ativa	Ativa	-21,47	-21,34
5	Ativa	Inativa	Inativa	-25,09	-24,78
6	Ativa	Inativa	Ativa	-25,44	-23,77
7	Ativa	Ativa	Inativa	-16,11	-17,47
8	Ativa	Ativa	Ativa	-21,62	-20,79

Na tabela 41, para cada caso de configuração das antenas são apresentadas as leituras de tensão obtidas pelo analisador de espectro em [dBµV] e os respectivos valores de campo elétrico e densidade de onda plana equivalente com a antena de medição localizada no banco traseiro ocupado pelo passageiro na posição da antena 04 (plano 2), nas situações do automóvel com todas as janelas abertas e com todas as janelas fechadas.

Tabela 41- Valores medidos de tensão e calculados de campo elétrico e densidade de potência de onda plana equivalente para os monopolos dispostos no interior do automóvel utilizando como antena de medição o dipolo de duplo arco na posição do passageiro do banco traseiro-antena 04 (plano 2).

Configuração das Antenas	Janelas abertas				Janelas fechadas			
	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )	V (dB $\mu$ V)	E (dB $\mu$ V/m)	E (V/m)	S (W/m <sup>2</sup> )
1	52,31	99,06	0,09	2,14E-05	52,17	98,92	0,09	2,07E-05
2	85,18	131,93	3,95	4,14E-02	82,76	129,51	2,99	2,37E-02
3	84,04	130,79	3,46	3,18E-02	83,66	130,41	3,32	2,92E-02
4	85,88	132,63	4,28	4,86E-02	85,12	131,87	3,92	4,08E-02
5	82,72	129,47	2,98	2,35E-02	85,35	132,10	4,03	4,30E-02
6	84,47	131,22	3,64	3,51E-02	80,30	127,05	2,25	1,34E-02
7	90,89	137,64	7,62	1,54E-01	89,97	136,72	6,85	1,25E-01
8	84,28	131,03	3,56	3,36E-02	84,99	131,74	3,86	3,96E-02

#### 4.4.3 Comparação entre os Valores de Campo Elétrico Obtidos para os Dois Planos no Interior do Automóvel

O gráfico da figura 46 apresenta a comparação entre os valores de campo elétrico mostrados nas tabelas 25 e 35 para os experimentos nos planos 1 e 2, nos quais as antenas monopolo estavam dispostas no interior do automóvel e foi utilizado como antena de medição o dipolo de duplo arco localizado no banco do passageiro dianteiro (posição da antena monopolo 01).

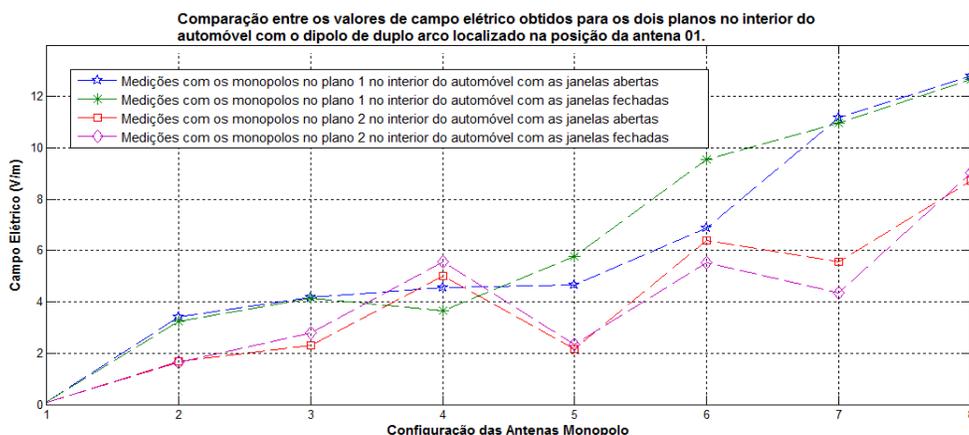


Figura 46- Comparação entre os valores de campo elétrico obtidos para os dois planos no interior do automóvel com o dipolo de duplo arco localizado na posição da antena monopolo 01.

Na figura 46 pode-se observar que os valores obtidos de campo elétrico no plano 1 estão próximos entre as situações do automóvel com as janelas fechadas e com as janelas abertas, assim como no plano 2 os valores de campo também estão próximos entre as duas situações; porém os valores obtidos de campo no plano 1 na maioria das configurações das antenas apresentam-se maiores do que os valores obtidos no plano 2, esse resultado confirma a variação da distribuição de campo de um plano para outro discutida anteriormente.

O gráfico da figura 47 apresenta a comparação entre os valores de campo elétrico mostrados nas tabelas 27 e 37 para os experimentos nos planos 1 e 2, nos quais as antenas monopolo estavam dispostas no interior do automóvel e foi utilizado como antena de medição o dipolo de duplo arco localizado no banco do passageiro traseiro (posição da antena monopolo 02).

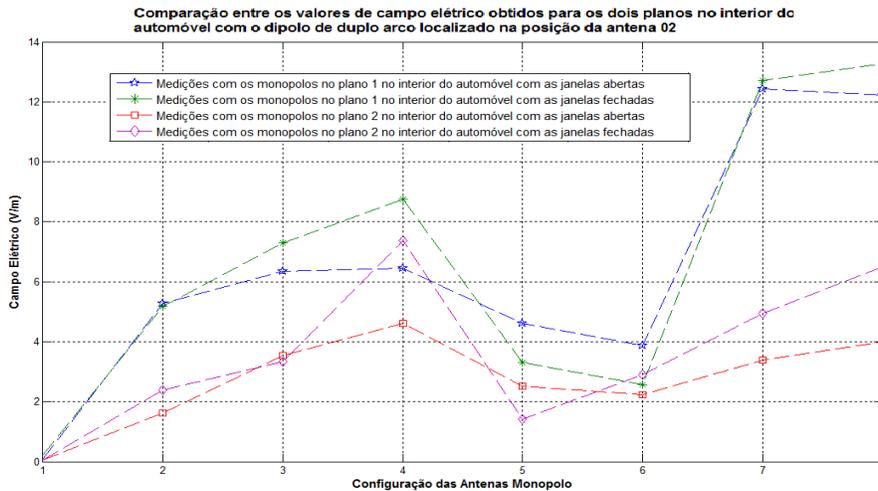


Figura 47- Comparação entre os valores de campo elétrico obtidos para os dois planos no interior do automóvel com o dipolo de duplo arco localizado na posição da antena monopolo 02.

Observando a figura 47, nota-se que os valores obtidos de campo elétrico se comportam de forma semelhante à figura 46 para os planos 1 e 2, havendo uma diferença ainda maior para os valores de campo na configuração 8 das antenas monopolo, onde os valores de campo no plano 1 apresentam-se

consideravelmente maiores que os valores de campo obtidos nas medições no plano 2.

O gráfico da figura 48 apresenta a comparação entre os valores de campo elétrico mostrados nas tabelas 29 e 39 para os experimentos nos planos 1 e 2, nos quais as antenas monopolo estavam dispostas no interior do automóvel e foi utilizado como antena de medição o dipolo de duplo arco localizado no banco do passageiro traseiro (posição da antena monopolo 03).

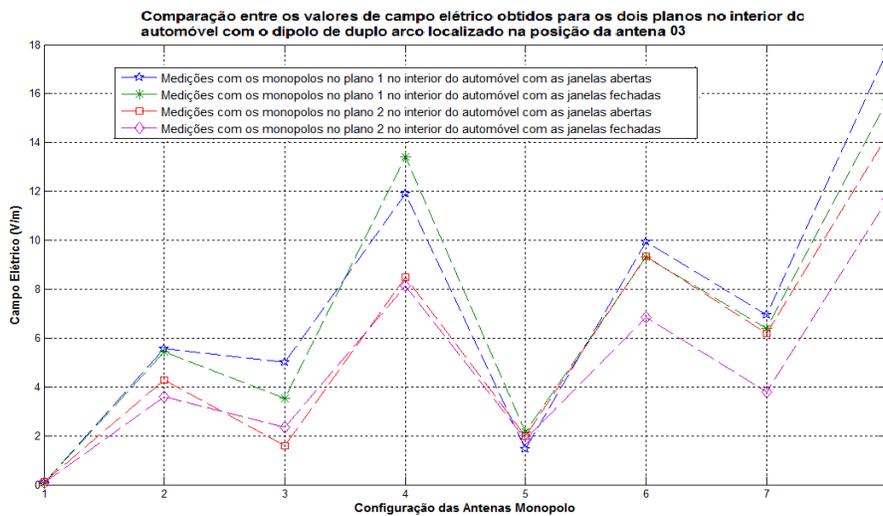


Figura 48- Comparação entre os valores de campo elétrico obtidos para os dois planos no interior do automóvel com o dipolo de duplo arco localizado na posição da antena monopolo 03.

No gráfico da figura 48, para o dipolo de duplo arco na posição da antena 3 nota-se uma maior proximidade entre os valores obtidos de campo elétrico nas medições realizadas nos planos 1 e 2. Ainda assim, com uma diferença um pouco menor em relação às outras posições do dipolo no interior do automóvel, os valores de campo no plano 1 apresentam-se maiores que os valores de campo obtidos nas medições no plano 2.

O gráfico da figura 49 apresenta a comparação entre os valores de campo elétrico mostrados nas tabelas 31 e 41 para os experimentos nos planos 1 e 2, nos quais as antenas monopolo estavam dispostas no interior do automóvel e foi utilizado como antena de medição o dipolo de duplo arco localizado no banco do passageiro traseiro (posição da antena monopolo 04).

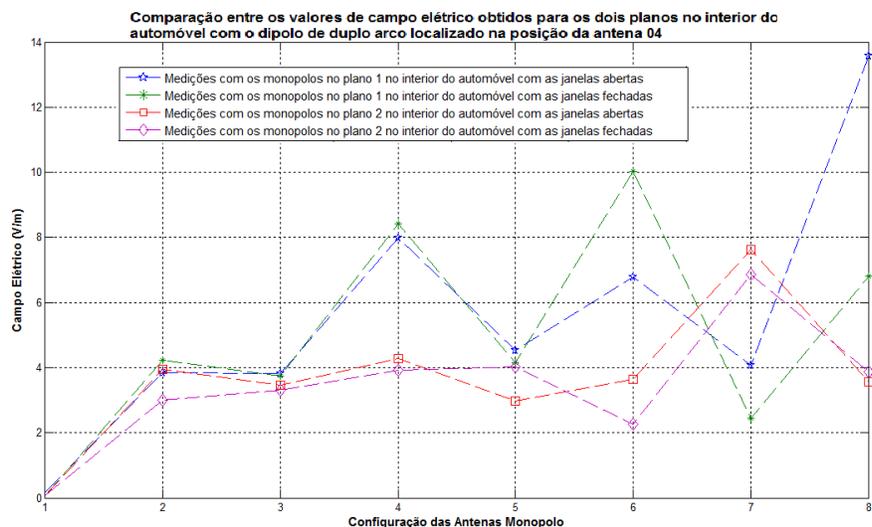


Figura 49- Comparação entre os valores de campo elétrico obtidos para os dois planos no interior do automóvel com o dipolo de duplo arco localizado na posição da antena monopolo 04.

No gráfico da figura 49, para o dipolo de duplo arco na posição da antena 4 nota-se uma diferença maior entre as medições com as janelas abertas e fechadas no plano 1 para as configurações 7 e 8, mostrando assim a influência da presença dos vidros das janelas em medições em um único plano. Enquanto que para as medições com as janelas abertas e fechadas no plano 2 apresentaram uma maior proximidade entre os valores obtidos de campo elétrico para todas as configurações das antenas monopolo. Ainda assim, na maioria das configurações das antenas monopolo, os valores de campo no plano 1 apresentam-se maiores que os valores de campo obtidos nas medições no plano 2.

## CAPÍTULO 5

### CONCLUSÕES

Diante do atual cenário de preocupação em nível mundial quanto à classificação anunciada neste ano pelo Centro Internacional de Pesquisa sobre o Câncer (CIRC), agência especializada da Organização Mundial de Saúde (OMS), após um número crescente de pedidos de cautela sobre o risco potencial da radiação eletromagnética emitida pelo celular, este trabalho apresenta-se como uma contribuição importante aos atuais e aos futuros estudos de medições de campo eletromagnético em ambientes quase fechados. Esses ambientes variam de tamanho, forma, número e tamanho das aberturas, quantidade e qualidade de material em seu interior, tempo de permanência do ser humano no seu interior, do número de fontes de campo e, principalmente, do número de pessoas em seu interior. Esses ambientes são os automóveis, ônibus, trens, vans, trailers onde os usuários podem permanecer no seu interior por horas. Portanto, devido à diversidade de ambientes este trabalho se restringiu a realizar o estudo de medições no interior de um veículo de modelo e marca específicos.

A partir dos resultados observados é possível constatar que no interior do automóvel a exposição dos seres humanos a CEM pode ser intensificada pela reflexão das ondas eletromagnéticas nas estruturas metálicas. Parte da energia das fontes de RF presentes no interior do automóvel é refletida favorecendo a reverberação dos CEM e gerando a superposição dos mesmos; outra parte da energia é absorvida pela presença de elementos como os bancos do veículo e também a presença do motorista e dos passageiros; e uma terceira porção é refletida e refratada pelos vidros das janelas.

Na realização dos experimentos foram encontradas algumas dificuldades e limitações. A primeira preocupação foi utilizar fontes de RF que operassem com potência fixa, uma vez que em condições normais de operação é praticamente impossível medir a intensidade do campo elétrico produzido pelo aparelho celular já que esta é variável e depende da potência de transmissão. Assim foram confeccionadas antenas monopolo de  $\frac{1}{4} \lambda$  para operarem de forma semelhante ao aparelho celular, mas com potência fixa. A

limitação da baixa potência fornecida pelo gerador de sinais utilizado para a alimentação das fontes de RF foi compensada com um ganho calculado para os resultados experimentais obtidos. Diante das limitações quanto aos aparelhos disponíveis para medição que pudessem realizar a média temporal das grandezas elétricas, foram utilizadas juntamente com um analisador de espectro, antenas disponíveis no LEMA que possibilitassem medições na faixa de frequência dos sinais emitidos pelas fontes de RF e assim pudessem ser calculadas as grandezas eletromagnéticas conforme as restrições da ANATEL. Algumas precauções que devem ser tomadas para a realização destes experimentos são: utilizar valores máximos autorizados dos parâmetros de transmissão das fontes de RF, efetuar as medições com equipamentos devidamente calibrados e as medições dos CEMRF devem ser efetuadas na ausência de pessoas potencialmente expostas.

Comparando os dados obtidos nos experimentos realizados nas proximidades da estrutura externa do automóvel com os dados obtidos nos experimentos no interior do automóvel utilizando como antena receptora uma log-periódica, pode-se concluir que o ambiente quase fechado do automóvel sob teste, onde foram amplificados os níveis de campo em alguns pontos em seu interior, apresentou algumas características semelhantes a uma cavidade ressonante cuja estrutura é perfeitamente blindada e funciona como um amplificador de RF, como é o caso da câmara de reverberação.

Com relação aos experimentos realizados no interior do automóvel e no espaço livre com a mesma disposição das fontes de RF e a antena de medição, pode-se observar que a estrutura metálica gera combinações construtivas e destrutivas de campo para as várias configurações das fontes de RF, ressaltando o valor de campo elétrico superior no interior do automóvel para o arranjo das quatro fontes ligadas. Observou-se ainda que o posicionamento das fontes no interior do automóvel tem forte influência no valor do campo total medido na posição do motorista. Isso valida a teoria de superposição de campos e da combinação de arranjos de antenas que proporcionam aumento do sinal em uma dada direção.

Nos experimentos com a antena dipolo de duplo arco (desenvolvida no LEMA) no interior do automóvel com medições em vários pontos em diferentes níveis (dois planos horizontais denominados no trabalho plano 1 e plano 2),

pode-se observar que a maioria das medições nos pontos mais próximos ao teto do veículo (no plano 2) apresentam valores menores que as medições nos pontos pertencentes ao plano 1. Pode-se observar também valores maiores de campo para as medições com as janelas fechadas, validando assim a teoria de que quando uma onda encontra a superfície limítrofe entre dois meios com propriedades diferentes, uma parte da energia é refletida, outra pode ser absorvida pelo material existente após a superfície refletora e ao outra parte pode refratar-se e se propagar no segundo meio.

Em todas as medições outros fatores importantes influenciaram na obtenção dos valores de campo elétrico como: o arranjo de antenas formado pela configuração presente no interior do veículo no instante da medição, as características da antena de medição e a distância destas em relação às fontes de RF. Se comparados os valores obtidos com as duas antenas receptoras utilizadas: a log-periódica e o dipolo de duplo arco, esta última apresentou maior eficiência para o propósito deste trabalho, devido à maior mobilidade e proximidade de suas características a de uma antena isotrópica.

Comparando os valores calculados de campo elétrico e densidade de potência da onda plana equivalente no interior do automóvel com os limites de exposição estabelecidos pela ANATEL para a população em geral aos CEMRF na faixa de 2 GHz a 300 GHz, considerando os valores de campos não perturbados, ou seja, valores medidos na ausência de indivíduos expostos e sem a introdução de objetos absorvedores ou refletores de CEMRF durante o processo de medição, concluí-se que os valores calculados não excedem os valores preconizados pelo regulamento. Contudo, como é constatado que a exposição pública a telefones móveis pode ser reforçada pela reflexão de micro-ondas em ambientes fechados, motiva-se a continuidade do estudo do efeito da reflexão nesses ambientes para a avaliação do risco à saúde da população.

Logo, para continuidade deste trabalho pode-se sugerir a realização de simulação numérica para condições e configurações semelhantes ao ambiente experimental estudado. Essas simulações podem contribuir para determinar o número e a disposição das fontes que podem gerar o maior nível de campo possível no interior do veículo.

Uma etapa a ser realizada por futuros trabalhos é a realização dos

experimentos descritos neste trabalho com a introdução de manequins com propriedades físicas, elétricas e magnéticas próximas às do corpo humano e com dimensões de humanos adultos. Realizados os procedimentos experimentais no interior do automóvel, propõe-se o cálculo da Taxa de Absorção Específica (SAR) para várias configurações das antenas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALFARO, J. A. G. **Projeto de Antena Otimizada para a Realização de Testes de Compatibilidade Eletromagnética em Automóveis**. Dissertação de Mestrado- Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Elétrica, 2006.

ANZALDI, G.; SILVA, F.; FERNÁNDEZ, M., QUÍLEZ, M; RIU, P. **Initial Analysis of SAR From a Cell Phone Inside a Vehicle by Numerical Computation**, IEEE Transactions on Biomedical Engineering, vol. 54, nº 5, pp. 921-930, May 2007.

ARAÚJO, A. R. **Radiações Perigosas: tese mostra correlação entre os casos de morte por câncer e localização das antenas de telefonia celular**. Boletim da UFMG. Disponível em: <http://www.ufmg.br/boletim/bol1690/4.shtml>. Acessado em 19/12/2010.

BAI, L.; WANG, L.; WANG, B.; SONG, J. **Effects of paddle configurations on the uniformity of the reverberation chamber**. IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 12–16, August 1999.

BALANIS, C. A. **Teoria das antenas: análise e síntese**. Vol. 1, 3ª edição, LTC, Rio de Janeiro, 2005.

BANSAL, R. **The far-field: how far is far enough?**, Applied Microwave and Wireless, November, 1999.

BERNHART, J.H. **Non-ionizing radiation safety: Radiofrequency radiation, electric and magnetic fields**. Physics on Medicine and Biology, Vol. 37, Nº 4, pp. 807-844, 1992.

BRASIL, **Agência Nacional de Telecomunicações (ANATEL)**. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br/Portal/exibirPortalNivelDois.do?acao=&codItemCanal=1173>. Acessado em 07/02/2011.

\_\_\_\_\_. Resolução Nº 303, 2002. Disponível em: <http://www.anatel.gov.br>.

BRONZINO, J.D. **The Biomedical Engineering Handbook**. New York: CRC Press and IEEE Press, pp. 1380-1440, 1995.

BUNTING, C. F.; MOELLER, K. J.; REED, C. J.; SCEARCE, S. A. **Finite Element Analysis of Reverberation Chambers: A Two-Dimensional Study at Cutoff**, Electromagnetic Compatibility, IEEE International Symposium on Vol. 1, pp. 208 – 212, Aug., 1998.

CABRAL, S. C. B. **Interferência eletromagnética em equipamento eletromédico ocasionada por telefonia móvel celular**. Dissertação de Mestrado- Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, 2001.

CAMARGO, L. **OMS anuncia que radiação de celular pode causar câncer.** Disponível em [http://www.correiodoestado.com.br/noticias/oms-anuncia-que-radiacao-de-celular-pode-causar-cancer\\_112849/](http://www.correiodoestado.com.br/noticias/oms-anuncia-que-radiacao-de-celular-pode-causar-cancer_112849/). Acessado em 31/05/2011.

COSTA, C. P.; FONTGALLAND, G.; BARBIN, S. E. **Near fields radiation superposition assessment in human nearby users of cellular phones,** IEEE Asia-Pacific International Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC), pp. 40-43, April 2010.

CRUZ, S. C. da. **Verificação dos Níveis de Radiação Emitidos pelas Antenas das ERBS e a Percepção das Comunidades Próximas.** Dissertação de Mestrado- Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Elétrica do Centro Técnico Científico da PUC-Rio, 2005.

DODE, A. C. **Neoplasias e a Telefonia Celular no Município de Belo Horizonte- Minas Gerais.** Tese de Doutorado- Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia, 2010.

ERICSSON. **Radio waves and health- Mobile communications.** Ericsson Company Magazine, 2011.

ESTEVES, L. C. **Antenas: teoria básica e aplicações.** McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 1980.

FOSTER, K. R. & MOULDER, J. E. **Health Effects of Cellular Telephones: Recent Scientific Developments.** Polish GSM Conference, Warsaw, May 2000.

GARBE, H. **New EMC Test Facilities for Radiation Measurement,** University of Hanover, Hanover, Germany, June 2002.

GIRARD, S.; DIOUF, F.; PALADIAN, F. **Electric Field – Power Relationship in Mode Stirred Reverberation Chamber,** EMC Europe, Barcelona, 2006.

GRANT, L.J. **Practical Aspects of Non-Ionizing Radiation Protection.** Leeds: The Hospital Physicists Association, 1981.

HABERMANN, M.; MARCÍLIO, I.; LOPES, M.; PRADO, R.; SOUZA, M.; GOUVEIA, N. **Desigualdade social e exposição a campos magnéticos na Região Metropolitana de São Paulo.** Revista Saúde Pública, nº 44, PP 703-709, 2010.

HABERMANN, M. **Prevalência de exposição aos campos eletromagnéticos e Justiça Ambiental no município de São Paulo.** Dissertação de Mestrado- Universidade de São Paulo. Faculdade de Medicina, 2008.

HALLIDAY, D. & RESNICK, R. **Física,** 4ª edição, Livros Técnicos e Científicos, p.59-78, 1990.

HONDOU, T.; UEDA, T.; SAKATA, Y.; TANIGAWA, N.; SUZUKI, T.; KOBAYASHI, T., IKEDA, K. **Passive Exposure to Mobile Phones: Enhancement of Intensity by Reflection**, Journal of the Physical Society of Japan, vol. 75, nº 8, August 2006.

HONDOU, T. **Rising Level of Public Exposure to Mobile Phones: Accumulation through Additivity and Reflectivity**, Journal of the Physical Society of Japan, vol. 71, nº 2, pp. 432-435, February 2002.

HOEPPE, F.; GINESTE, P.; DEMOULIN, B. **Numerical Modelling for Mode-Stirred Reverberation Chambers**, Proceedings of IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2001.

HUANG, Y.; ZHANG, J. T.; LIU, P. **A Novel Method to Examine the Effectiveness of a Stirrer**, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 556-561, August 2005.

KAISER, K. L. **Electromagnetic Compatibility Handbook**. CRC Press, New York, USA, 2005.

LI LI; YU, W.; MITTRA, R. **Computation of SAR levels in SAM's Head Model Located inside an Automobile via the Parallel FDTD Algorithm**, IEEE International Conference on Applications of Electromagnetism and Student Innovation Competition Awards (AEM2C), pp. 24-28, August 2010.

MONEBHURRUN, V. **Fast Global Characterization of 2G and 3G Mobile Phones using a Reverberation Chamber**, IEEE The Second European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pp. 1-7, November 2007.

PAUL, C. R. **Introduction to Electromagnetic Compatibility**, John Wiley & Sons, Inc, New York 1992, p. 1-213.

PAUL, C. and NASAR, S. **Introduction to Electromagnetic Fields**, John Wiley & Sons, Inc, New York 1987, p. 502-506.

PIRES, E. da S. **Análise, Projeto e Concepção de um Elemento Irradiador Quase-isotrópico em 3D**. Dissertação de Mestrado- Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, 2006.

RAMO, S.; WHINNERY, J. R.; DUZER, T. V. **Campos e Ondas em Eletrônica das Comunicações**. Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1981.

RIBEIRO, J. A. J. **Engenharia de Microondas: fundamentos e aplicações**. 1ª edição, Érica, São Paulo, 2008.

RODRIGUEZ, C. E. F. **Efeitos biológicos das radiações de rádio frequências de telefonia celular- simulação FDTD**. Dissertação de Mestrado- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia, 2001.

RUDDLE, A.; LOW, L.; ZHANG, H.; RIGELSFORD, J.; LANGLEY, R. **Computed SAR and Field Exposure Threat Assessment for Vehicle Occupants**, IEEE The Fourth European Conference on Antennas and Propagation (EUCAP), pp. 1-5, April 2010.

RUDDLE, A. R. **Computed SAR Levels in Vehicle Occupants Due to On-Board Transmissions at 900 MHz**, IEEE Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC), pp. 137-140, November 2009.

\_\_\_\_\_. **Computed SAR Distributions for the Occupants of a Car with a 400 MHz Transmitter on the Rear Seat**, IEEE International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC), pp. 37-40, September 2007.

SALLES, A. A. de. **Simulações da SAR na cabeça e antenas planares para telefones móveis**. Revista Brasileira de Engenharia Biomédica, Vol. 19, Nº 2, pp. 77-90, 2003.

SANTOS, C. H. G.; AFONSO, M. M.; RESENDE, U. C. **Simulation of Automotive Vehicles EMC Experiment Considering Nearness to an Anechoic Wall**, SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC), pp. 751-755, November 2009.

SHADIKU, M. N. **Elementos de Eletromagnetismo**. 3ª edição, Bookman, Porto Alegre, 2004.

SILVA, E. F. da. **Uma Proposta de Maximização da Região de Campo Uniforme para Câmara de Reverberação Compacta**. Dissertação de Mestrado- Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica, 2008.

TANAKA, M. **A Study on the Electric Field Distribution in na Automobile Body for an Antenna System Mounted Inside the Body**, IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 37, nº 2, May 1988.

YU, S. P. & BUNTING, A. F. **Statistical Investigation of Frequency-Stirred Reverberation Chambers**, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Vol.1, pp. 155- 159, 2003.