



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

UMA PROPOSTA DE MAXIMIZAÇÃO DA REGIÃO DE CAMPO UNIFORME PARA UMA CÂMARA DE REVERBERAÇÃO COMPACTA.

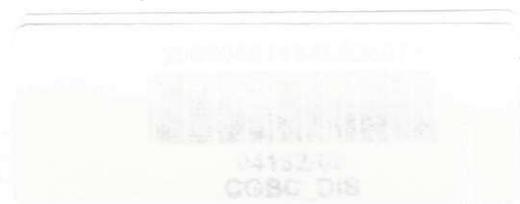
ERIK FARIAS DA SILVA

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Engenharia Elétrica e Informática da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

GLAUCO FONTGALLAND
Orientador

Campina Grande, Paraíba, Brasil
© Erik Farias da Silva, Maio de 2008

DI 11 (243)
15.04.08





FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586p

2008 Silva, Erik Farias.

Projeto e simulação de uma câmara de reverberação eletromagnética compacta utilizando o método FDTD / Erik Farias da Silva. — Campina Grande, 2008.

77f. : il.

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

Referências.

Orientador: Dr. Glauco Fontgalland.

1. Eletromagnetismo . 2. Câmara de Reverberação . I. Título.

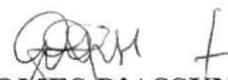
CDU – 537(043)

**UMA PROPOSTA DE MAXIMIZAÇÃO DA REGIÃO DE CAMPO UNIFORME PARA
UMA CÂMARA DE REVERBERAÇÃO**

ERIK FARIAS DA SILVA

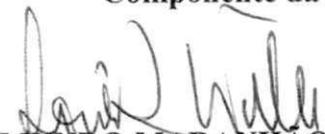
Dissertação Aprovada em 04.07.2008


GLAUCO FONTGALLAND, Dr., UFCG
Orientador


ADAILDO GOMES D'ASSUNÇÃO, Dr., UFRN
Componente da Banca


JOABSON NOGUEIRA DE CARVALHO, Dr., CEFET-PB
Componente da Banca


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


RÔMULO RAIMUNDO MARANHÃO DO VALLE, Mestre, UFCG
Componente da Banca

CAMPINA GRANDE - PB
JULHO - 2008

A minha amada esposa,
companheira e amiga
Késia.

*"Tudo o que um homem
pode imaginar, outros
homens poderão
realizar."*

Julio Verne

Agradecimentos

Primeiramente tenho, de agradecer a Deus que nunca me faltou durante toda a vida, pelo fato de Ele, do nada, ter gerado tudo o que existe.

À minha esposa e melhor amiga Késia que tem sido meu sustento e minha estrela guia nos momentos mais complicados de minha vida e que é meu sol nos momentos mais felizes.

Aos meus pais Humberto e Edna, que possibilitaram a minha chegada até aqui, me suprindo de amor e sustento.

À toda a minha família que esteve, está e estará presente em toda a minha vida.

Ao meu orientador Professor Glauco Fontgalland que muito me ajudou no meu processo de formação.

Ao Colega Galba Falcão que deu todo o suporte necessário no Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados (LEMA).

Aos amigos Ádrian, Jerônimo, Jonas, Olympio e Paulo com os quais eu sempre pude contar nos momentos de dificuldade.

Ao colega Renato Proença Picanço pela colaboração em gentilmente fornecer o software FDTD Studio v2.0.

À CAPES pelo suporte financeiro.

Aos demais amigos com os quais sei que posso contar.

Resumo

O estudo de compatibilidade eletromagnética é uma das etapas indispensáveis de qualquer projeto de equipamento ou dispositivo eletrônico. Há diversas normas que determinam como realizar os testes necessários para se considerar um equipamento ou dispositivo eletrônico eletromagneticamente compatível com o local no qual deve operar. Tais testes têm de ser realizados em um ambiente controlado que simule as condições necessárias aos testes. Um desses ambientes de teste é a câmara de reverberação eletromagnética, cujo projeto, simulação e construção são discutidos em detalhe no decorrer desta dissertação. O intuito do trabalho foi desenvolver esse ambiente de testes de maneira otimizada, compacta e de baixo custo, respeitando os limites impostos pela norma IEC 61000-4-21.

Abstract

The electromagnetic compatibility study is an essential stage in the project of any electronic device or equipment. There are several standards that determine how to realize the necessary tests to consider an electronic equipment or device electromagnetically compatible with the place in which it operates. Those tests need to be realized in a controlled environment that simulates the required conditions to accomplish the tests. One of those test environments is the electromagnetic reverberation chamber, whose project, simulation and construction are in full detail discussed in elapsing of this dissertation. The aim of this work was to develop a environment in order to be optimized, compact and cost effective, respecting the limits imposed by the IEC 61000-4-21 standard.

Sumário:

Resumo	iv
Abstract.....	v
Sumário:	vi
Lista de Figuras:	vii
Lista de Tabelas.....	ix
Siglas	x
Capítulo 1 Introdução	1
Capítulo 2 Câmaras de Reverberação.....	6
2.1. Utilização de Câmaras de Reverberação	7
2.2. Princípios Físicos de Câmaras de Reverberação	10
2.2.1. Equações de Maxwell.....	11
2.2.2. Cavidade Retangular de Ressonância.....	12
2.2.3. Efeitos do Agitador de Modos.....	15
2.2.4. Uniformidade de Campo	16
2.2.5. Fator de Qualidade	17
2.3. Tipos de Câmara de Reverberação	18
Capítulo 3 Projeto da Câmara de Reverberação.....	19
3.1. Projeto de uma Cavidade Retangular de Ressonância	19
3.1.1. Dimensionamento Físico da CR.....	19
3.1.2. Fator de Qualidade Teórico	21
3.1.3. Detalhes do Projeto de Construção.....	21
3.2. Projeto das Antenas	22
3.3. Projeto dos Agitadores de Modos.....	23
3.4. Projeto do Sistema Motor do Agitador.....	25
Capítulo 4 Modelamento Eletromagnético Tridimensional da CR	28
4.1. Método de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo	28
4.2. Ambiente de Simulação.....	32
4.3. Norma IEC 61000-4-21	43
Capítulo 5 Análise dos Resultados de Simulação	45
5.1. Resultados de Simulação	45
5.1.1. Comportamento do Campo na Ausência do Agitador de Modos.....	46
5.1.2. Verificação de conformidade com a Norma IEC 61000-4-21.....	51
5.1.3. Análise da Distribuição de Campo	54
Capítulo 6 Construção e Validação da Câmara de Reverberação	60
6.1. Construção da Câmara de Reverberação	60
6.1.1. Cavidade Retangular de Ressonância.....	60
6.1.2. Sistema Motor	60
6.1.3. Agitadores de Modos.....	61
6.1.4. Montagem.....	61
6.2. Validação Experimental	63
6.2.1. Procedimento Experimental	63
6.2.2. Resultados de Medições	64
Capítulo 7 Conclusões.....	66
Referências Bibliográficas.....	68
Apêndice 1:.....	71
Apêndice 2.....	74
Apêndice 3.....	75

Lista de Figuras:

Figura 1 – (1) GTEM, (2) TEM, (3) LTAB, (4) Câmara semi-aneecóica e (5) Câmara Aneecóica.....	8
Figura 2 - Limite do desvio padrão na frequência da Norma IEC 61000-4-21.....	9
Figura 3 – Componentes de campo dos modos TE e TM em uma CRR.....	13
Figura 4 – Modelo de Câmara de Reverberação com Agitador de Modos [23].....	18
Figura 5 - Número de Modos Suportados na CRR.....	21
Figura 6 - Antena dipolo de meio circulo.....	23
Figura 7 – Agitador de Modos 1.....	24
Figura 8 – Agitador de Modos 2.....	25
Figura 9 – Potência Aplicada em Função do Instante de Disparo do TRIAC [37].	26
Figura 10 – Circuito do Controlador de Velocidade [37].....	27
Figura 11 - Célula de Yee [39].	30
Figura 12 – Componentes de campo em uma célula de Yee [39].	30
Figura 13 - Distribuição dos campos no domínio computacional [21].	31
Figura 14 - Interface do programa FDTD STUDIO V2.0.....	32
Figura 15 - Parâmetros da Malha	33
Figura 16 – (a) - Características da antena dipolo utilizada; (b) – Aba de Fontes.	35
Figura 17 - Antena dipolo e diagramas de irradiação nos planos coordenados.	35
Figura 18 - Janela de importação de arquivo DXF.....	36
Figura 19 - Mapeamento de uma esfera em uma malha de 20X20X20 [21].....	37
Figura 20 - Zona de Campo Uniforme e Pontos de Teste.	37
Figura 21 - Distribuição dos Sensores de Campo no Interior do modelo da CR.	39
Figura 22 – CR com elemento metálico – Refletor.....	40
Figura 23 – Planos de Medição do Módulo do Campo Elétrico.	41
Figura 24 - Posições do Agitador 1.	42
Figura 25 - Posições do Agitador 2.	42
Figura 26 - Cenário simulado, sem agitador de modos e sem refletor.	46
Figura 27 - Campo elétrico (XY) no interior da CR sem agitador e sem refletor (V/m).47	
Figura 28 - Campo elétrico (XZ) no interior da CR sem agitador e sem refletor (V/m). 47	
Figura 29 - Campo elétrico (YZ) no interior da CR sem agitador e sem refletor (V/m). 48	
Figura 30 - Cenário simulado, sem agitador de modos e com refletor.....	49
Figura 31 - Campo elétrico (XY) no interior da CR sem agitador e com refletor (V/m).50	
Figura 32 - Campo elétrico (XZ) no interior da CR sem agitador e com refletor (V/m). 50	
Figura 33 - Campo elétrico (YZ) no interior da CR sem agitador e com refletor (V/m). 51	
Figura 34 – Cenário simulado, AGM1 posição 1 com refletor.	55
Figura 35 - Média do campo elétrico máximo (XY) em uma rotação do agitador de modos 1 na presença do elemento refletor (V/m).....	56
Figura 36 - Média do campo elétrico máximo (XZ) em uma rotação do agitador de modos 1 na presença do elemento refletor (V/m).....	56
Figura 37 - Média do campo elétrico máximo (YZ) em uma rotação do agitador de modos 1 na presença do elemento refletor (V/m).....	57
Figura 38 - Agitador de modos 2 na posição 1.....	58
Figura 39 - Média do campo elétrico máximo (XY) em uma rotação do agitador de modos 2 na ausência do elemento refletor (V/m).....	58
Figura 40 - Média do campo elétrico máximo (XZ) em uma rotação do agitador de modos 2 na ausência do elemento refletor (V/m).....	59
Figura 41 - Média do campo elétrico máximo (YZ) em uma rotação do agitador de modos 2 na ausência do elemento refletor (V/m).....	59

Figura 42 - Conectores tipo N.	62
Figura 43– Modelo da Antena Dipolo de Meia Onda usada como transmissora.	62
Figura 44 – Ambiente de Medição: (1) Gerador Sinais, (2) Analisador de Espectro, (3) Câmara de Reverberação, (4) Agitador de modos, (5) Antenas e (6) Suporte de PVC. .	63

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Volumes da CR e das ZCU ₁ e ₂	38
Tabela 2 - Relação entre o Volume da CR e os volumes das ZCU ₁ e ₂	38
Tabela 3 - Resultados de verificação da conformidade com a norma IEC 61000-4-21. 52	
Tabela 4 – Valores de campo elétrico medidos.	65

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANATEL	Agência Nacional de Telecomunicações
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
BALUN	<i>Balanced to Unbalanced</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
CEM	Compatibilidade Eletromagnética
CISPR	<i>Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques</i>
CR	Câmara de Reverberação
CRR	Cavidade Retangular de Ressonância
EIA	<i>Electronic Industries Alliance</i>
EM	Eletromagnético
EN	<i>European Norm</i>
EST	Equipamento Sob Teste
FDTD	Diferenças Finitas no Domínio do Tempo
GTEM	Gigahertz Transversa Eletromagnética
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEM	Interferência Eletromagnética
LEMA	Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados
MFU	Menor Frequência Utilizável
MIL-STD	<i>Military Standard</i>
MSC	Câmara de Modos Agitados
NBR	Normas Brasileiras
PEC	Condutor Elétrico Perfeito
RF	Rádio Frequência
TEM	Transverso Eletromagnética
TRIAC	<i>Triode for Alternating Current</i>
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
ZCU	Zona de Campo Uniforme

Capítulo 1

Introdução

A crescente demanda por aumento da capacidade de processamento combinada com a também crescente busca pela miniaturização de equipamentos eletrônicos, tem feito os dispositivos operarem cada vez mais próximos dos seus limites físicos (*e.g.* transistores de grafeno com dimensão aproximada de 10 átomos de carbono). Nessas condições há uma estreita faixa de tolerância à falhas.

Quando se imagina que os equipamentos eletrônicos utilizam diversos dispositivos, fabricados por diferentes empresas, surge a idéia de que tais equipamentos são sistemas eletromagneticamente caóticos.

Tais condições de funcionamento têm tornado a compatibilidade eletromagnética (CEM) uma área indispensável ao desenvolvimento de qualquer equipamento eletro-eletrônico. O estudo de CEM deve ser considerado quando se deseja atingir um determinado grau de conformidade no ambiente eletromagnético de funcionamento dos equipamentos [1].

Campos elétricos e magnéticos gerados dentro e fora dos equipamentos podem causar distúrbios, ruídos e falhas em quaisquer equipamentos eletromagneticamente susceptíveis a tais campos. Uma falha que ocorra em um sistema crítico (*e.g.* controles de aeronaves) pode causar acidentes com danos irreparáveis ao ser humano. Do ponto de vista da CEM, o elemento interferente é considerado uma fonte e o susceptível o alvo.

O aumento das frequências utilizadas nos sistemas de comunicações (seja via rádio ou via cabo) e a compactação dos dispositivos (aumento da proximidade física entre diferentes circuitos eletrônicos) elevam o nível de emissão/recepção não intencional de campo eletromagnético (EM).

Há, dessa maneira, um aumento na probabilidade de que partes de um circuito interfiram ou sofram interferência proveniente de outras partes do circuito. Essas interferências eletromagnéticas (IEM) podem ser oriundas do mesmo sistema (intra-sistema) ou de sistemas diferentes (intersistemas).

A globalização viabilizou o acesso mundial a diversos produtos eletro-eletrônicos disponíveis no mercado. Esses produtos são confeccionados em diferentes

lugares, compostos por diferentes componentes, que por sua vez são fabricados por diferentes empresas, podendo ainda possuir dimensões diferentes.

Esse ambiente eletromagnético heterogêneo só pode co-existir de forma harmônica se os equipamentos atenderem ao grupo de normas de funcionamento que possa garantir a compatibilidade entre eles. Cada país adota um padrão, em geral definido por normas técnicas desenvolvidas por organismos internacionais, essas normas apresentam diversos níveis de especificação (hierarquia) [2], [3]:

- **Normas Básicas:** contêm informações dos métodos e definições;
- **Normas Genéricas:** aplicadas a produtos e sistemas em geral;
- **Normas para um grupo de Produtos:** aplicadas a um grupo de equipamentos que apresentam mesmas características;
- **Normas de Produtos:** aplicadas a um tipo particular de equipamento.
- **Normas Colaterais:** especificam os requisitos e testes para uso seguro de um equipamento.

Esse conjunto de normas especifica os equipamentos, os procedimentos e o tipo de instalação a serem adotados num ambiente de medição. Dessa forma, tais normas apresentam o modo como se deve proceder ao realizar os testes e os valores limite aceitáveis para um determinado tipo de equipamento. Para verificar a conformidade de um produto deve-se considerar essas normas e respeitar sua hierarquia.

Um equipamento susceptível a interferências não se enquadrará nas rígidas normas internacionais (*International Electrotechnical Commission (IEC)*, *Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques (CISPR)*), portanto seu uso ou comercialização, em países que adotam tais normas, não serão legalmente permitidos.

Um equipamento que atende aos critérios de conformidade das normas de CEM em vigor pode ser considerado um **equipamento eletromagneticamente compatível** com o ambiente EM do sistema onde o mesmo deve operar. Idealmente um equipamento eletromagneticamente compatível deve satisfazer às seguintes condições [1]:

- Não causar interferência em outros sistemas;
- Não ser susceptível a emissões proveniente de outros sistemas;
- Não causar interferência a si mesmo.

No Brasil as normas adotadas baseiam-se na primeira versão da *IEC* e têm por sigla NBR [2], [3]. Ainda que as normas no Brasil não sejam mandatárias, as resoluções

237/2000 (Aprova o Regulamento para a Certificação de Equipamentos de Telecomunicações quanto aos Aspectos de Compatibilidade Eletromagnética), 238/2000 (Aprova o Regulamento para a Certificação de Equipamentos de Telecomunicações Quanto aos Aspectos de Segurança Elétrica) e 242/2000 (Aprova o Regulamento para Certificação e Homologação de Produtos para Telecomunicações) da ANATEL, bem como a RDC nº 32/07 (Dispõe sobre a certificação compulsória dos equipamentos elétricos sob regime de Vigilância Sanitária e dá outras providências) ANVISA são mandatárias.

Para a realização dos testes de conformidade relativos a CEM, é necessária a utilização de um ambiente de testes controlado que forneça as condições suficientes à realização dos testes. No caso desta dissertação será abordado o ambiente de testes conhecido como Câmara de Reverberação eletromagnética (CR), no qual podem ser realizados diversos tipos de testes de CEM (*e.g.* eficiência de blindagem eletromagnética, emissão e susceptibilidade).

Outro ambiente de teste muito utilizado é a câmara anecóica, porém, o alto custo envolvido desde sua aquisição, operação e manutenção a torna restrita e complexa. A restrição está diretamente relacionada ao custo dos equipamentos envolvidos (potência elevada) e ao material absorvedor utilizado em seu interior (função da frequência e potência). A sua complexidade está também atrelada à necessidade de um sistema de mesa giratória para reproduzir a emissão e recepção de sinais provenientes de todas as direções (*e.g.*: teste de eficiência de blindagem eletromagnética).

O baixo custo, a menor complexidade de operação e o aumento na velocidade de alguns testes, tornam a CR um ambiente atrativo. Contudo, assim como numa câmara anecóica a CR é composta de diversos acessórios menores (conectores, cabos e antenas) utilizados em sua operação. Dessa forma, existe uma complexidade intrínseca ao seu modelamento e construção.

Cada elemento deve obedecer individualmente a normas específicas e coletivamente estar de acordo com as normas de sistema que regem o funcionamento da CR. Dessa maneira, há um número muito grande de Normas [4], [5], envolvidas no projeto de uma CR, dentre as quais citam-se:

- IEC 61000-4-21;
- RTCA/DO-160D;
- EN 61000-4-3: 1997;

- MIL-STD-461E;
- MIL-STD-1344A;
- EIA-364-66A;
- SAE J1113/27;
- GM-9120P;
- CISPR 16-1;
- CISPR 16-2;

Utilizando o ambiente de testes CR, é possível verificar se os limites de susceptibilidade de um equipamento estão de acordo com aqueles impostos pelas normas que existem para certificar a compatibilidade eletromagnética desse equipamento.

O comportamento do campo elétrico no interior de uma CR pode ser simulado utilizando métodos numéricos de análise, dentre eles temos:

- Traçado de Raios [6], [7];
- Modelagem da Linha de Transmissão [8];
- Método dos Momentos [9];
- Método dos Elementos Finitos [10], [11];
- Método dos Elementos Finitos de Contorno no Domínio da Frequência [12];
- Métodos Estatísticos [13], [14], [15], [16];
- Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo [17], [18], [19], [20];

Dentre os acima citados, adotou-se o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (*Finite Differences in Time Domain- FDTD*). As razões para a escolha desse método serão descritas no capítulo 4. A simulação do comportamento do campo eletromagnético no interior da CR foi feita utilizando o programa FDTD Studio v2.0 [21].

Uma câmara foi construída e testada na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) [22]. Os testes foram realizados no Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados (LEMA).

O objetivo desta pesquisa é aperfeiçoar a CR descrita em [22] e disponibilizar um ambiente de teste que:

- Se adapte aos padrões internacionais da norma IEC 61000-4-21;
- Alcance uma otimização do volume útil de teste;
- Apresente um custo acessível.

Como procedimento de otimização do volume útil de teste, foram realizadas simulações do modelo da câmara para dois tipos de elementos agitadores de modo móveis, na presença e na ausência de um elemento fixo perturbador de campo. Para a realização dos testes de otimização da CR, inicialmente foram feitas simulações utilizando o programa FDTD Studio v2.0 que calcula numericamente o comportamento do campo eletromagnético no sistema.

Foram ainda realizadas medições na CR com o intuito de validar as simulações realizadas e verificar a conformidade física entre o campo medido no interior da CR e a norma IEC 61000-4-21. Foi escolhida essa norma por ser esta a mais específica, utilizada e aceita a tratar dos testes de calibração de CR.

O texto desta dissertação está dividido em 7 capítulos, inicia tratando dos aspectos básicos de câmaras de reverberação eletromagnéticas no capítulo 2, trata então dos aspectos de projeto de câmaras no capítulo 3. O capítulo 4 descreve o modelo FDTD e os aspectos da simulação realizada, enquanto o capítulo 5 aborda o procedimento de construção da câmara. Os resultados simulados e medidos são apresentados no capítulo 6. As conclusões e propostas de trabalhos futuros são abordadas no capítulo 7.

Capítulo 2

Câmaras de Reverberação

Basicamente uma Câmara de Reverberação pode ser considerada como uma cavidade de ressonância eletricamente grande, blindada e construída com material condutor. Ela funciona como um amplificador de RF [23] e em seu interior normalmente são posicionados elementos **agitadores de modos** [11]. Idealmente, o campo, tomado em um ponto qualquer do interior dessa cavidade, é composto pela soma de diversas ondas estacionárias geradas pelas múltiplas reflexões que ocorrem devido à característica ressonante da CR.

O projeto de tal estrutura de multimodos ressonante deve ser realizado de tal modo que exista em seu interior uma região na qual o valor médio do campo eletromagnético é uniforme em qualquer polarização. Para tornar o campo médio relativamente uniforme a câmara deve excitar um número suficiente de modos ressonantes que devem ser constantemente deslocados, o que se consegue variando as condições de contorno no interior da cavidade com o auxílio de agitadores de modos [17].

A região no interior da CR, citada acima, corresponde a um volume que será realmente disponibilizado para uso em testes, nele será colocado o Equipamento Sob Teste (EST). Esse volume definido como Volume Útil de Teste (VUT) deve apresentar um campo eletromagnético com as seguintes características [11]:

- Estatisticamente isotrópico;
- Aleatoriamente polarizado;
- Homogêneo.

Em situações reais de uso, quando um equipamento (circuito, dispositivo ou aparelho) encontra-se em uso no seu local de funcionamento, o mesmo deve co-existir em um ambiente eletromagneticamente poluído, com as várias outras fontes de campo EM.

A disposição, distância, níveis de intensidade e polarização dos campos irradiados pelas fontes de campo EM próximas formam o ambiente eletromagnético real bastante complexo. A reprodução de condições de contorno semelhantes às existentes nesse ambiente é necessária para a realização, em laboratório, de testes de emissão e suscetibilidade eletromagnéticas.

O ambiente reproduzido em uma **Câmara Anecóica** não se assemelha à realidade de funcionamento de equipamentos eletrônicos, pois, em geral, tais equipamentos não funcionam em ambientes livres de reflexão de campo EM. A não reprodução do ambiente real de funcionamento aumenta o número de procedimentos necessários à realização de testes. Por exemplo, para testar a susceptibilidade de um EST a um campo elétrico utilizando uma câmara anecóica, deve-se:

- 1) Alterar a polarização do campo incidente (antena emissora) sobre o EST, conseguido com a rotação da antena;
- 2) Incidir um campo elétrico em diversas direções sobre o equipamento, conseguido girando o equipamento em torno do seu eixo.

Além do tempo necessário para realização dessas tarefas nas diversas direções a soma linear dos campos resultantes não reproduz necessariamente o ambiente complexo devido as diferentes polarizações e direções do campo. Deve ser mencionado ainda o custo adicional da utilização de um aparato capaz de realizar rotação do EST no interior da câmara anecóica [24].

Em uma CR o mesmo teste, acima citado, é realizado de maneira mais eficiente, uma vez que a CR simula algumas das características reais do ambiente no qual se deseja testar a susceptibilidade do equipamento. Um EST colocado no interior de uma CR fica imerso em um ambiente no qual existe campo EM incidente proveniente de todas as direções e com uma polarização linear arbitrária.

Devido às características da CR, não há a necessidade de giro do EST uma vez que com a mesma fonte de campo é possível testar todas as possibilidades de polarização linear e direção de incidência do campo. Isso possibilita um teste mais completo e muito mais veloz, tornando desnecessário o uso de estruturas que alterem a posição do EST.

Outra grande vantagem do uso da CR é a possibilidade de gerar altos níveis de intensidade de campo sem a necessidade do uso de amplificadores de ganho elevado [25], os quais aumentariam o custo de fabricação de uma CR.

2.1. Utilização de Câmaras de Reverberação

Existem diversos outros ambientes de teste nos quais pode-se verificar a eficiência de blindagem e susceptibilidade EM [25], a citar:

- Local de Teste em Área Aberta (LTAB);

- Câmara Anecóica;
- Câmara Semi-Anecóica;
- Célula Transversa Eletromagnética (TEM);
- Célula Gigahertz Transversa Eletromagnética (GTEM);
- Revestimento Sala Blindada;
- Sala Parcialmente Forrada por Tela;
- Placas Paralelas;
- Gaiola de Faraday;
- Câmara Híbrida.

Dentre todos os ambientes acima citados, a CR é o que apresenta a melhor relação custo benefício na realização de testes de susceptibilidade e blindagem eletromagnéticas, sendo esse o motivo de sua escolha. Na Figura 1 são apresentados, a título de ilustração, alguns desses ambientes de teste.

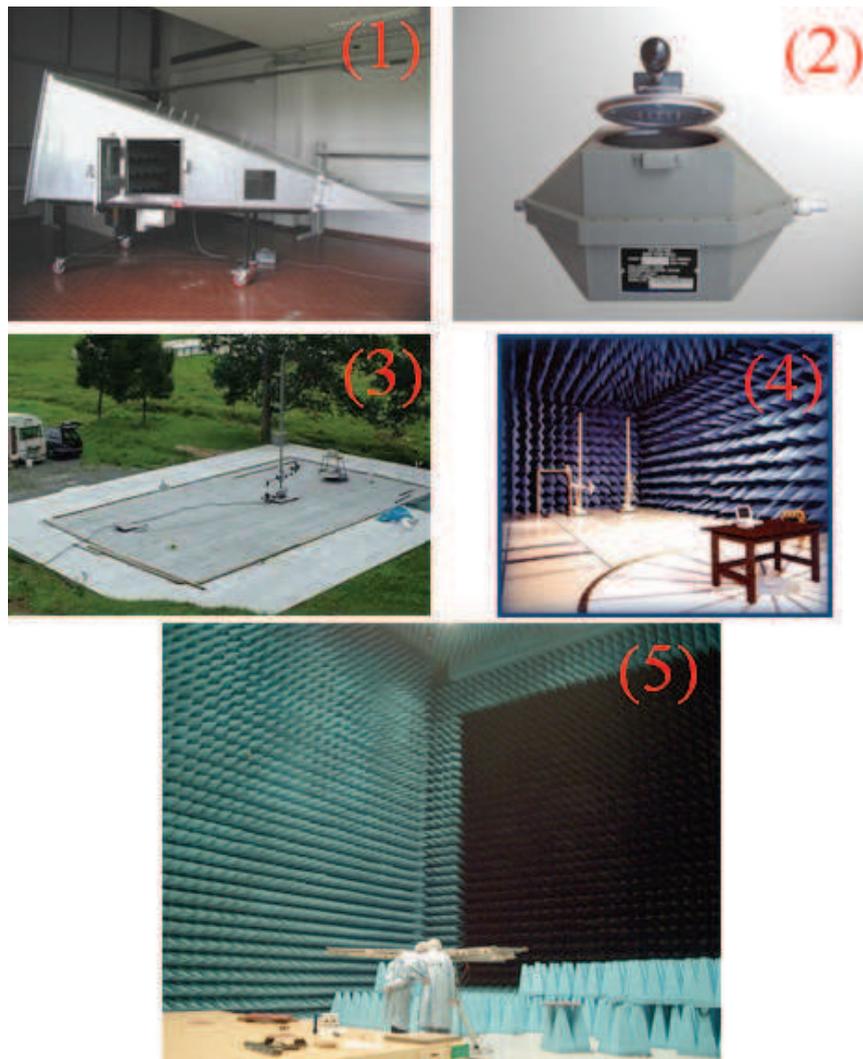


Figura 1 – (1) GTEM, (2) TEM, (3) LTAB, (4) Câmara semi-aneecóica e (5) Câmara Anecóica.

Uma das etapas de projeto de uma CR, como qualquer outra ferramenta utilizada para realizar medições, é a calibração. O intuito desse processo é verificar a conformidade da câmara com a norma técnica adotada. Uma vez que no Brasil não há uma norma específica que verse sobre compatibilidade eletromagnética ou sobre câmaras de reverberação, nesta dissertação foi adotada a norma IEC 61000-4-21 [4], que trata dos aspectos de calibração de CR.

A norma estabelece os limites do valor do desvio padrão do campo elétrico para os quais pode-se considerar que o campo é uniforme. De acordo com esses valores define-se a zona de campo uniforme (ZCU) que é a região ou volume no interior da CR que obedece aos limites estabelecidos pela norma, que são apresentados na Figura 2.

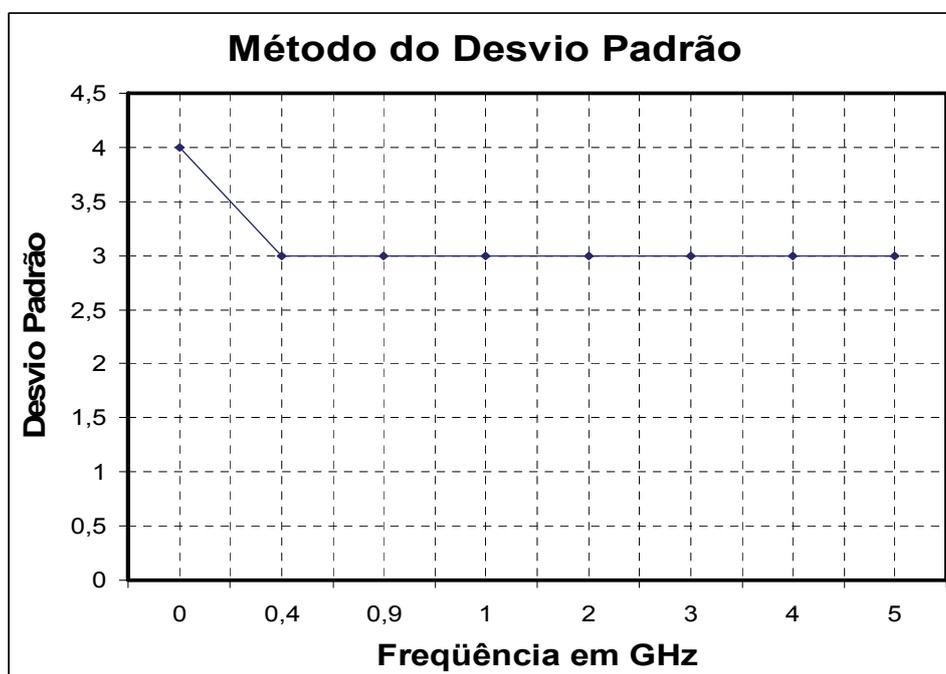


Figura 2 - Limite do desvio padrão na frequência da Norma IEC 61000-4-21.

O objetivo deste trabalho é verificar o comportamento de equipamentos eletrônicos que operem a partir de 800 MHz, desta forma não será observada toda a faixa do espectro abrangida na Figura 2. Foram então realizadas simulações e medição do comportamento do campo elétrico no interior da ZCU para essa faixa de frequências.

De acordo com a teoria de cavidades ressoantes, a partir da menor frequência utilizável (no caso 800 MHz), determina-se o menor número de modos excitados na cavidade. Não há um limite superior de frequência utilizável a ser considerado no projeto de uma CR, desta forma, considera-se apenas a sua menor frequência utilizável.

Tal frequência foi escolhida por abranger a faixa de operação de aparelhos celulares e microcomputadores, os quais são fontes de interferência eletromagnética de uso corriqueiro. Para evitar que tais interferências afetem o funcionamento dos equipamentos, devem ser realizados os testes de susceptibilidade eletromagnética onde será verificado o nível de sinal interferente suportado pelo EST, bem como a eficiência de sua proteção contra interferências.

A CR apresenta algumas características que a torna mais atrativa que os demais ambientes de teste. Uma delas é o menor custo para fabricação em comparação à maioria dos ambientes anteriormente citados. Na fabricação de uma CR não é necessária uma grande precisão na montagem da estrutura, no alinhamento das placas, na centralização do agitador e nas dimensões de suas faces laterais. Ao contrário, nos demais ambientes de teste essas partes exigem um elevado grau de precisão, além da aquisição de absorvedores para os ambientes que os utilizam. O custo total do material de consumo utilizado na CR construída durante este trabalho foi inferior a R\$ 400,00.

Uma outra vantagem da CR é a maior velocidade na realização dos testes de eficiência de blindagem em comparação aos outros ambientes, como descrito na introdução deste capítulo.

Há ainda outro fator vantajoso e característico da CR que é o fato de a intensidade de campo no interior da mesma ser relativamente mais alta que nos outros ambientes, no caso de se utilizar a mesma potência de entrada. Dessa forma a CR possibilita a utilização de geradores de menor potência, com um custo de fabricação menor que os geradores de potência mais elevada, para atingir os níveis exigidos pela norma [25].

2.2. Princípios Físicos de Câmaras de Reverberação

O princípio de funcionamento de uma CR é o mesmo de uma cavidade de ressonância retangular. Uma cavidade é um volume limitado por uma superfície condutora, no interior do qual pode ser excitado um campo eletromagnético [26].

No caso de uma CR, é introduzido ainda na cavidade um agitador ou um sintonizador de modos. Esse elemento agitador eleva a aleatoriedade das ressonâncias (que ocorrem no interior da cavidade), de tal modo que o campo EM em um determinado volume no interior da cavidade possa ser considerado Zona de Campo Uniforme, (definido aqui como ZCU).

Para uma melhor compreensão do funcionamento de uma CR alguns conceitos serão sucintamente apresentados nas próximas seções deste capítulo.

2.2.1. Equações de Maxwell

O conhecimento das equações de Maxwell é de importância fundamental para um engenheiro eletricista que deseje trabalhar com compatibilidade eletromagnética, eletromagnetismo aplicado ou comunicações. A superficialidade no conhecimento dos fenômenos eletromagnéticos pode levar a uma insegurança do resultado ou a um diagnóstico incorreto por parte do engenheiro.

As equações de Maxwell descrevem de maneira completa o comportamento macroscópico do campo elétrico (\vec{E}) e da densidade de fluxo magnético (\vec{B}), que são campos vetoriais espaço-temporais. A esses campos relacionamos uma variável posição, em coordenadas cartesianas x, y, z , por exemplo, e a uma variável tempo t .

É importante introduzir ainda dois vetores auxiliares ou pseudo-vetores: a densidade de fluxo elétrico (\vec{D}) e a intensidade de campo magnético (\vec{H}). Esses são relacionados com \vec{E} e \vec{B} através da polarização elétrica e magnética dos meios. Considerando esse meio como sendo o espaço livre, obtêm-se as equações (1) e (2).

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} \quad (1)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (2)$$

Uma das leis básicas do eletromagnetismo é a lei de Faraday, a qual afirma que um campo magnético variável no tempo gera uma circulação do campo elétrico com o tempo. A equação (3) descreve o caso em que os campos elétrico e magnético são harmônicos no tempo, no espaço livre.

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu_0 \vec{H} \quad (3)$$

Outra lei importante é a lei de Gauss, a qual afirma que o fluxo total \vec{D} entrando ou saindo de um volume V , é igual à carga líquida contida nesse volume. Considerando que ρ é a densidade de carga volumétrica em coulomb por metro cúbico, pode-se então escrever a equação (4).

$$\nabla \cdot \epsilon_0 \vec{E} = \rho \quad (4)$$

Conforme o Teorema de Helmholtz um vetor é completamente descrito quando se define seu rotacional e seu divergente [26]. É importante que se relacione o rotacional e o divergente do campo magnético às suas fontes. A fonte que cria a circulação, ou rotacional, do campo \vec{H} é a corrente, essa é composta pela densidade de corrente de condução ($\vec{J} = \sigma \vec{E}$), a densidade de corrente de deslocamento ($j\omega\epsilon_0 \vec{E}$) e a corrente de convecção (aqui desprezada). Pode-se assim obter a terceira equação (5).

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + j\omega\epsilon_0 \vec{E} \quad (5)$$

A última equação de Maxwell pode ser encontrada ao se considerar o fato de que a carga magnética (único pólo), dual da carga elétrica, não existe na natureza. As linhas de fluxo de \vec{B} são sempre linhas fechadas, pois não há cargas nas quais elas terminem ou comecem. Assim, o fluxo líquido de \vec{B} através de qualquer superfície fechada é sempre nulo, como apresentado na equação (6).

$$\nabla \cdot \mu_0 \vec{H} = 0 \quad (6)$$

As equações (3) a (6) formam o conjunto básico para qualquer desenvolvimento a ser realizado em eletromagnetismo e serão utilizadas para possibilitar a explicação do comportamento do campo eletromagnético no interior de uma cavidade de ressonância.

2.2.2. Cavidade Retangular de Ressonância

Uma Cavidade Retangular de Ressonância (CRR) pode ser considerada como uma seção de um guia de ondas retangular terminada em um curto circuito. Dessa maneira a solução dos campos em seu interior pode ser obtida partindo diretamente das soluções correspondentes obtidas para os guias de ondas [26].

Aplicando as equações de Maxwell a uma cavidade retangular de paredes metálicas, respeitando as condições de contorno correspondentes a cada parede, pode-se separar as equações de campo em modos TE_{mnp} e TM_{mnp} , tal qual ilustrado na Figura 3 [29].

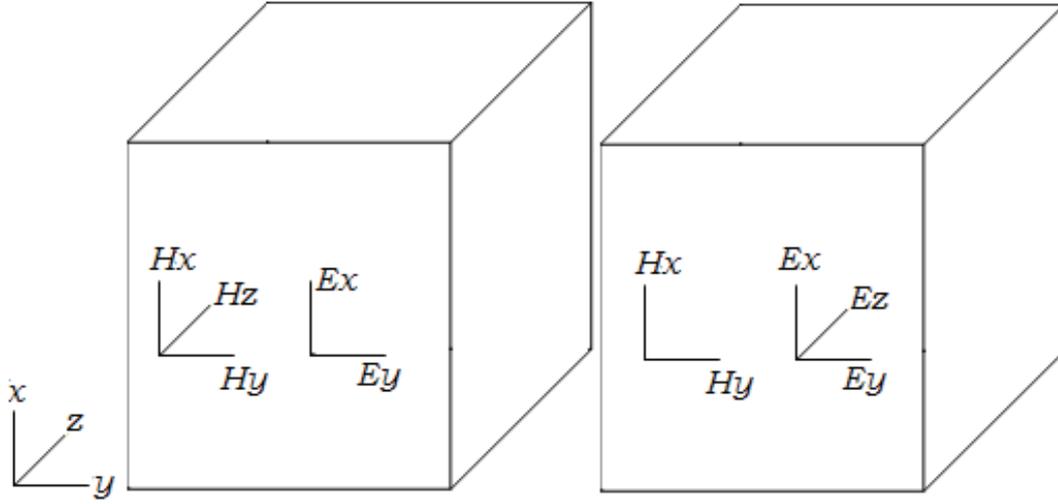


Figura 3 – Componentes de campo dos modos TE e TM em uma CRR.

Os modos TE_{mnp} são dados por [26]:

$$E_x = \left(\frac{j\omega\mu_0}{h^2} \right) \left(\frac{n\pi}{b} \right) H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a} \right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b} \right) \sin\left(\frac{p\pi z}{d} \right) \quad (7)$$

$$E_y = -\left(\frac{j\omega\mu_0}{h^2} \right) \left(\frac{m\pi}{a} \right) H_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b} \right) \sin\left(\frac{p\pi z}{d} \right) \quad (8)$$

$$E_z = 0 \quad (9)$$

$$H_x = -\left(\frac{1}{h^2} \right) \left(\frac{m\pi}{a} \right) \left(\frac{p\pi}{d} \right) H_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b} \right) \cos\left(\frac{p\pi z}{d} \right) \quad (10)$$

$$H_y = -\left(\frac{1}{h^2} \right) \left(\frac{n\pi}{b} \right) \left(\frac{p\pi}{d} \right) H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a} \right) \sin\left(\frac{n\pi y}{b} \right) \cos\left(\frac{p\pi z}{d} \right) \quad (11)$$

$$H_z = H_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a} \right) \cos\left(\frac{n\pi y}{b} \right) \sin\left(\frac{p\pi z}{d} \right) \quad (12)$$

$$h^2 = \left(\frac{m\pi}{a} \right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d} \right)^2 \quad (13)$$

Os modos TM_{mnp} são dados por [26]:

$$E_x = -\left(\frac{1}{h^2}\right)\left(\frac{m\pi}{a}\right)\left(\frac{p\pi}{d}\right)E_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\sin\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (14)$$

$$E_y = -\left(\frac{1}{h^2}\right)\left(\frac{n\pi}{b}\right)\left(\frac{p\pi}{d}\right)E_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\sin\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (15)$$

$$E_z = E_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (16)$$

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

$$H_y = -\left(\frac{j\omega\epsilon_0}{h^2}\right)\left(\frac{m\pi}{a}\right)E_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (18)$$

$$H_z = 0 \quad (19)$$

$$h^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2 \quad (20)$$

Onde “ a ” é a altura, “ b ” é o comprimento, “ d ” é a largura da cavidade, “ m ” é o modo de ressonância no eixo x , “ n ” é o modo em y e “ p ” é o modo em z . Matematicamente um modo de ressonância é uma solução particular da equação de onda [26], fisicamente o número de modos suportados pode ser considerado o número de possíveis caminhos de propagação da onda eletromagnética no interior da cavidade [27]. As frequências de ressonância da cavidade [28] podem ser encontradas utilizando a equação (21):

$$f_{\text{ressonância}} = 3\frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (21)$$

Na equação (21), c é a velocidade da luz no vácuo. Para o caso em que $a < d < b$, a menor frequência de ressonância encontrada faz referência ao modo TE_{011} [26].

Um outro fator muito importante é o número de modos suportados pela CRR, quando se trata de construir uma de câmara de reverberação. Para funcionar como uma câmara de reverberação, uma CRR deve suportar no mínimo 60 modos ressonantes na menor frequência utilizável, sendo o número de modos ressonantes [23] calculado utilizando a equação (22).

$$N_s(f) = \frac{8\pi}{3}abd\left(\frac{f}{c_0}\right)^3 - (a+b+d)\frac{f}{c_0} + \frac{1}{2} \quad (22)$$

2.2.3. Efeitos do Agitador de Modos

Um agitador de modos é uma lâmina metálica que perturba continuamente o campo no interior de uma CRR [29]. Cada modo do campo EM existente no interior de uma CRR é uma solução para a equação de ondas EM, cuja forma tridimensional é apresentada na equação (23). O agitador altera a geometria interna da CRR, alterando assim as suas condições de contorno [11], gerando uma alteração nos modos ressonantes característicos da CRR.

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (23)$$

Quando se utiliza um agitador de modos móvel, a cada variação de sua posição ocorre uma modificação das condições de contorno. Dessa forma, sempre que o agitador girar continuamente, ou de forma discreta com um número suficiente de passos, as condições de contorno e conseqüentemente os modos ressonantes são também alterados. Isto reduz a formação de ondas estacionárias (indesejáveis) elevando a uniformidade do campo seja no interior da CR [11].

O campo que se estabelece em uma CRR sem a presença de um agitador pode ser comparado a um fio tracionado entre duas paredes opostas. A fonte do campo pode ser comparada a uma excitação realizada no meio deste fio. Quando isto ocorre o elástico vibra criando uma onda estacionária. Supondo que o fio tenha uma de suas pontas presa a um ventilador (análogo ao agitador), a oscilação não mais ocorrerá de forma estacionária, pois uma das extremidades do fio está em movimento [29].

Um agitador de modos tem sua eficiência diretamente relacionada à sua capacidade de alterar os modos originais da CRR. Assim sendo é importante considerar o tamanho, número, formato e posição dos agitadores no interior da câmara. Com relação ao tamanho do agitador, as referências bibliográficas consultadas sugerem que quanto maior for a dimensão deste elemento, comparado à dimensão da câmara, maior será a uniformidade do campo [17].

Os formatos de agitador classicamente escolhidos são o de uma pá metálica ou de uma cruz, sendo o formato de cruz mais eficiente que o de pá metálica [30]. Com relação ao seu posicionamento, as referências sugerem que o agitador seja colocado a no mínimo meio comprimento de onda de qualquer parede da câmara [18].

Foram simulados e construídos dois agitadores de modos para a CR, os quais foram comparados entre para determinar qual deles apresentava maior eficiência e quais

são as características que elevaram tal eficiência, deste modo foi possível propor um modelo de agitador que aumentasse a uniformidade do campo no interior da CR.

2.2.4. Uniformidade de Campo

O parâmetro mais importante no projeto de uma CR é certamente a uniformidade estatística do campo no seu interior. Como citado anteriormente, o campo deve ser uniforme em qualquer polarização. Matematicamente pode-se comprovar que a potência média do campo EM no interior de uma CR é uniforme e independente da polarização [31], [33].

No caso ideal, pode-se considerar que o sinal total medido pela antena receptora (R_x) é totalmente independente do diagrama desta antena. Isso pode ser explicado assumindo que várias ondas planas incidem na antena, desta forma, a potência recebida pode ser calculada utilizando a equação (24) [31], [33]:

$$P_r = W_i A_{em} = \frac{|E|^2}{2\eta} \frac{\lambda}{4\pi} g(\theta, \phi) \quad (24)$$

Na equação (24), a potência recebida (P_r) é igual à densidade de potência (W_i) multiplicada pela máxima área efetiva da antena receptora (A_{em}). Onde $|E|$ é o módulo da intensidade de campo elétrico, η é a impedância intrínseca do meio, $g(\theta, \phi)$ é a diretividade da antena, λ é o comprimento de onda da frequência em uso. A potência será então uma função do ângulo de incidência e do módulo do campo elétrico incidente.

Devido à natureza aleatória do campo no interior da CR, é mais prudente que o comportamento desse campo seja analisado de forma estatística. Dessa maneira, deve-se considerar a média da potência recebida, que é calculada considerando a função densidade de probabilidade do campo ($p(E, \theta, \phi)$) com intensidade $|E|$ atingindo a antena receptora com direção de chegada (θ, ϕ) , tal qual na equação (25):

$$\overline{P_r} = \frac{\lambda}{8\pi\eta} \int_v |E|^2 g(\theta, \phi) p(E, \theta, \phi) d(E, \theta, \phi) \quad (25)$$

Considerando que a amplitude do campo seja independente dos ângulos θ e ϕ , encontra-se:

$$\overline{P_r} = \frac{\lambda}{8\pi\eta} \int |E|^2 p(E) dE \int g(\theta, \phi) p(\theta, \phi) d(\theta, \phi) \quad (26)$$

De acordo com [31], ao se considerar que $p(\theta, \phi)$ é a função densidade de probabilidade de uma distribuição uniforme, com duas variáveis aleatórias (θ, ϕ) , encontra-se seu valor como sendo $1/4\pi$. Sabendo que o ganho diretivo para uma antena perfeitamente casada é $g(\theta, \phi) = 4\pi$, a segunda integral tem como solução a unidade.

Desse modo pode-se confirmar que para qualquer direção de (θ, ϕ) , a potência média recebida na antena será a mesma e terá por valor [32], [31]:

$$\overline{P_r} = \frac{\lambda}{8\pi\eta} \int |E(r)|^2 p(E(r)) dr = \frac{\lambda}{8\pi\eta} \langle |E|^2 \rangle \quad (27)$$

A Equação (27) é válida para qualquer ganho de diretividade da antena receptora [31]. Conclui-se que a potência média do campo é uniforme em qualquer polarização.

2.2.5. Fator de Qualidade

Um parâmetro que deve ser considerado no estudo de câmaras de reverberação é o seu fator de qualidade (Q) que descreve a capacidade que a CR tem de armazenar energia. Essa capacidade está relacionada com as perdas de energia no interior da CR. Assim sendo, um alto valor de Q indica que a CR tem uma alta eficiência em armazenar energia, o que é desejável no projeto. As perdas nas paredes da CR, bem como a presença das antenas e do equipamento sob teste (EST), são fontes de diminuição do Q . Considerando a CR vazia, pode-se encontrar o valor aproximado para Q , equação (28).

$$Q = \frac{3}{2} \frac{V}{S\delta} \quad (28)$$

Na equação (28), tem-se por V o volume da CR, por S o somatório das superfícies das paredes internas da CR e por δ a profundidade de penetração pelicular no material constituinte das paredes, cujo valor pode ser calculado pela equação (29):

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}} \quad (29)$$

Na equação (29), σ é a condutividade do material e μ a permeabilidade magnética do mesmo. Na prática o valor de Q da CRR [34] pode ser encontrado pela relação entre a potência transmitida (P_T) e recebida (P_R) apresentada na equação (30).

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\lambda^3} \frac{P_T}{P_R} \quad (30)$$

2.3. Tipos de Câmara de Reverberação

Uma relação de compromisso aceitável entre a separação dos modos e o fator de qualidade é alcançada utilizando CR retangulares. Visando conseguir uma boa uniformidade de campo, diversas propostas de construção de CR foram apresentadas dentre as quais [35]:

- Câmara com modos sintonizados;
- Câmara retangular com paredes possuindo ângulos irregulares;
- Câmara com paredes irregulares;
- Câmara com pás giratórias;
- Câmara onde as paredes sofrem vibração;
- Câmara com irregularidades e vibração nas paredes.

Um exemplo de CR com pás giratórias pode ser observado na Figura 4. Este é o modelo mais aceito e utilizado nas referências bibliográficas consultadas [30]. As CR que seguem esse modelo são conhecidas como câmaras de modos agitados (MSC) (*mode stirred chamber*). Nesse método utilizam-se uma, ou mais, lâminas metálicas girando continuamente, isso altera as condições de contorno no interior da câmara como foi anteriormente explicado.

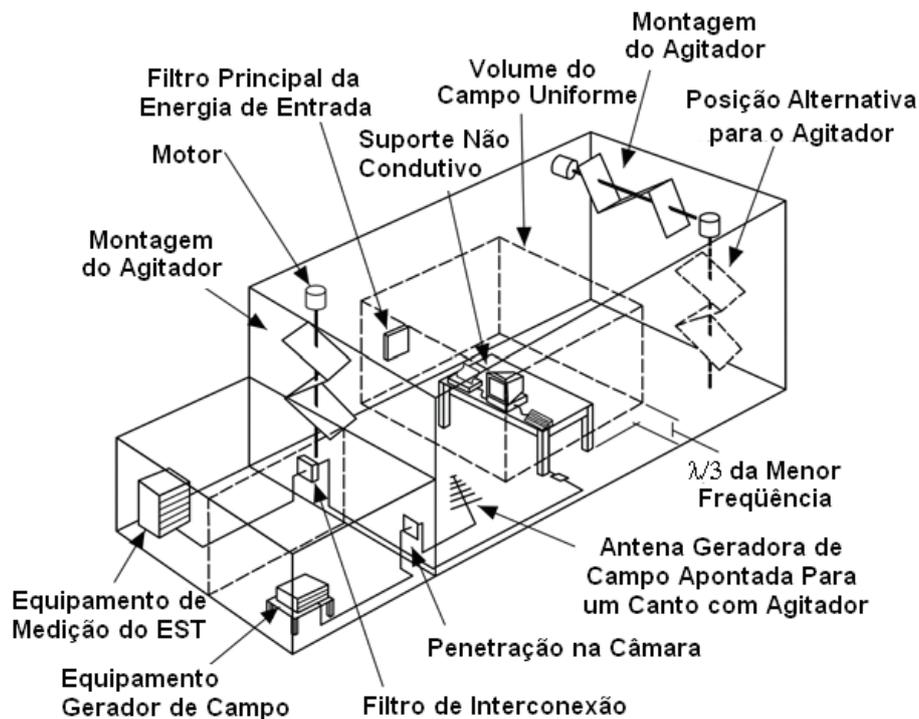


Figura 4 – Modelo de Câmara de Reverberação com Agitador de Modos [23].

Capítulo 3

Projeto da Câmara de Reverberação

Uma primeira motivação na concepção da CR foi a de construir uma estrutura modular, permitindo assim uma expansão nas três direções. Para esse trabalho a CR possui a dimensão mínima da estrutura modular projetada, servindo, portanto, como referência para projetos futuros de câmara de reverberação maiores.

O projeto da Câmara de Reverberação (CR) pode ser dividido em quatro etapas:

- Projeto de uma Cavidade Retangular de Ressonância (CRR);
- Projeto das Antenas;
- Projeto do Agitador de Modos;
- Projeto do Sistema Motor do Agitador.

3.1. Projeto de uma Cavidade Retangular de Ressonância

O primeiro passo no projeto de uma CR é a escolha da Menor Frequência Utilizável (MFU) que determinará as dimensões da CRR. Foi escolhida a frequência de 800 MHz como ponto de partida para o projeto.

3.1.1. Dimensionamento Físico da CR

De acordo com [28], a Zona de Campo Uniforme (ZCU) deve ser considerada a partir de uma distância mínima de $\lambda/3$ de qualquer parede metálica ou agitador de modos. No projeto foi escolhida uma ZCU de dimensões 55x60x65 cm³ (altura x largura x comprimento). Tais dimensões foram escolhidas por permitirem a realização de testes em equipamentos eletrônicos de dimensões semelhantes às de um gabinete de microcomputador.

Como citado anteriormente, a forma do agitador de modos influencia na uniformidade do campo. Nesse projeto será utilizado apenas um agitador. Considerando que a espessura desse elemento é desprezível e que ele está colocado a 5 cm da parede metálica localizada no eixo do comprimento da CR, as dimensões da ZCU serão alteradas para 55x60x60 cm³.

Havendo decidido as dimensões da ZCU e sabendo que a sua fronteira deve respeitar a distância mínima de $\lambda/3$ das paredes metálicas e do agitador de modos

metálico, pode-se calcular as dimensões mínimas necessárias à CR para suportar tal ZCU da seguinte forma (31):

$$\begin{aligned}
 \text{Altura} = a &= 2\frac{\lambda}{3} + ZCU_{\text{altura}} = 80\text{cm} \\
 \text{Largura} = b &= 2\frac{\lambda}{3} + ZCU_{\text{largura}} = 85\text{cm} \\
 \text{Comprimento} = d &= 2\frac{\lambda}{3} + ZCU_{\text{comprimento}} + D_{\text{Agitador}} = 90\text{cm}
 \end{aligned} \tag{31}$$

Uma vez definidas as dimensões físicas da câmara, deve-se verificar por meio da equação (21) se a menor frequência de ressonância da CRR é menor ou igual a 800 MHz e se o número de modos é maior que 60 utilizando a equação (22). As equações (32) e (33) são as soluções de (21) e (22) para as dimensões apresentadas em (33).

Para encontrar a menor frequência de ressonância da CRR, deve-se considerar o modo TE₀₁₁ (Ver seção 2.2.2). Caso os valores não sejam coerentes, as dimensões da câmara devem ser novamente calculadas. Assim:

$$f_r = 3\frac{3 \cdot 10^8}{2} \sqrt{\left(\frac{0}{0,80}\right)^2 + \left(\frac{1}{0,90}\right)^2 + \left(\frac{1}{0,85}\right)^2} = 728,2\text{MHz} \tag{32}$$

$$N_s = \frac{8\pi}{3} 0,8 \cdot 0,9 \cdot 0,85 \left(\frac{800 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8}\right)^3 - (0,8 + 0,9 + 0,85) \frac{800 \cdot 10^6}{3 \cdot 10^8} + \frac{1}{2} = 91 \text{modos} \tag{33}$$

Como o número de modos é maior que 60 e a menor frequência de ressonância da CRR é inferior a 800 MHz, a CR tem dimensões aceitáveis, apresentando nesse caso uma margem de segurança, pois a MFU real (728,2 MHz) é aproximadamente 9 % menor que a MFU inicialmente desejada (800 MHz).

Os diagramas detalhados para a construção da CR são apresentados no apêndice I desta dissertação. A Figura 5 representa o gráfico da relação entre o número de modos suportados na CRR e a frequência utilizada. Em destaque pode-se observar o limite de menor frequência utilizável que garante os 60 modos desejados.

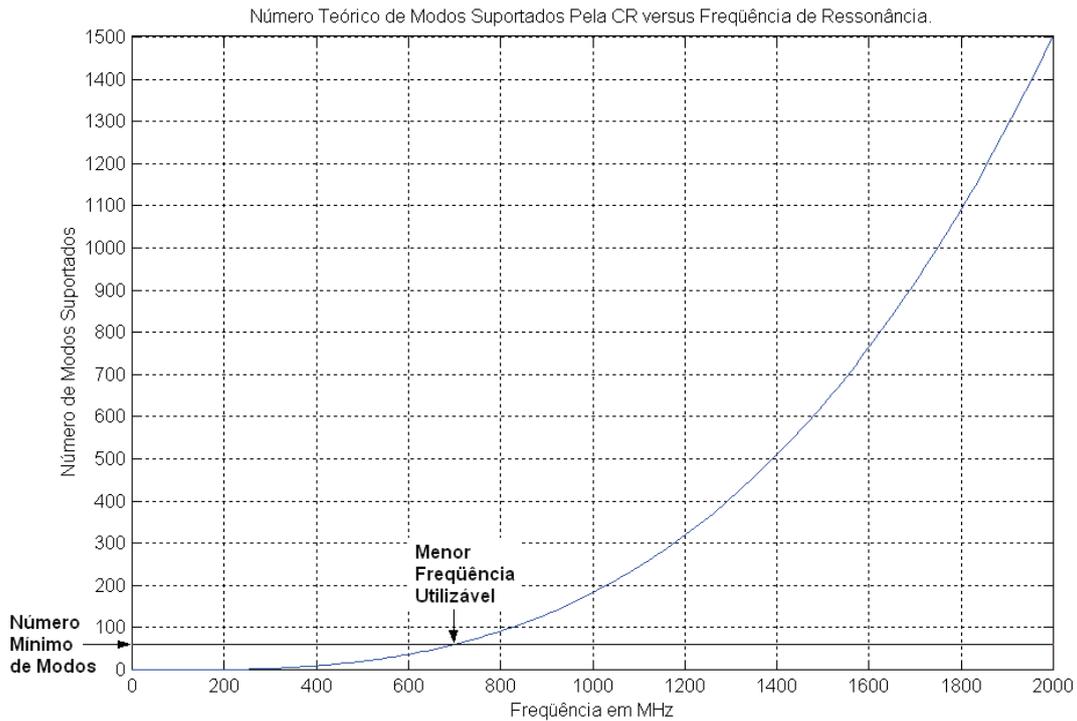


Figura 5 - Número de Modos Suportados na CRR.

3.1.2. Fator de Qualidade Teórico

Outro fator a se considerar no projeto de uma CR é o material a ser utilizado em sua construção. Parte das perdas, que diminuem o fator de qualidade da CR, está relacionada com o tipo de material utilizado na sua construção.

No projeto optou-se por utilizar alumínio devido à disponibilidade desse material e à sua maleabilidade. Há ainda o fato de que o alumínio é uma liga metálica de baixas perdas, tendo $\sigma = 37,7 \cdot 10^6$ S/m e $\mu = 1,26 \mu\text{N/A}^2$. O fator de qualidade teórico da CRR apresentado na equação (34) foi calculado utilizando a equação (28):

$$Q \cong 31024 \quad (34)$$

3.1.3. Detalhes do Projeto de Construção

A câmara foi construída de maneira modular, de tal modo que o projetista tenha a opção de realizar sua expansão através da construção de outras paredes iguais às existentes no projeto. Em seguida fazer a composição das mesmas aumentando assim a dimensão da CR. É possível entender como expandir a câmara observando os desenhos das paredes da mesma que se encontram no apêndice 1. É importante salientar que esta expansão altera a MFU da CR, dessa forma seus parâmetros devem ser novamente calculados.

Ainda com relação ao projeto da cavidade, deve-se decidir como se dará o acesso a seu interior, já que no momento do experimento a ZCU da CR deve encontrar-se isolada do meio externo. Uma possibilidade é a colocação de uma porta específica para a cavidade, contudo, há neste caso um aumento da complexidade de construção pela necessidade de um sistema de dobradiças e fechos que se adaptem às necessidades de projeto, há ainda uma diminuição na característica modular da câmara.

Optou-se por utilizar, como acesso ao interior da CR, a remoção de uma das paredes da mesma. De tal maneira que a parede superior da câmara, com característica modular, é facilmente removida para que seu interior seja acessado.

Um fator importante no projeto é o posicionamento dos conectores que irão ligar os elementos no interior da câmara ao exterior, pois o posicionamento desses conectores determina qual a posição dos fios que alimentam o EST no interior da CR. Por características mecânicas e buscando evitar a possibilidade de que os fios de alimentação do EST e da antena transmissora alterem demasiadamente o ambiente eletromagnético da CR, optou-se por posicionar os conectores no canto inferior de uma das paredes de medida $80 \times 90 \text{ cm}^2$.

3.2. Projeto das Antenas

Foi utilizada no projeto uma antena dipolo de meio comprimento de onda como transmissora, devido à sua simplicidade de construção. Para a recepção é importante que a antena funcione como um sensor de campo isotrópico, para conseguir isso se utilizou uma antena dipolo curvado desenvolvida no próprio LEMA [36]. As antenas foram projetadas de tal modo que ambas possuíssem a mesma frequência de ressonância de 800 MHz.

Para que a antena dipolo curvado, cujo diagrama de irradiação pode ser observado na Figura 6-d, ressoe na frequência de 800 MHz, esta deve possuir um raio $r = 2,55 \text{ cm}$ e uma base $L = 0,7 \text{ cm}$, tal qual ilustrado na Figura 6-c. O BALUN utilizado para adaptação e casamento da linha desbalanceada para a linha balanceada foi o transformador de $\lambda/4$.

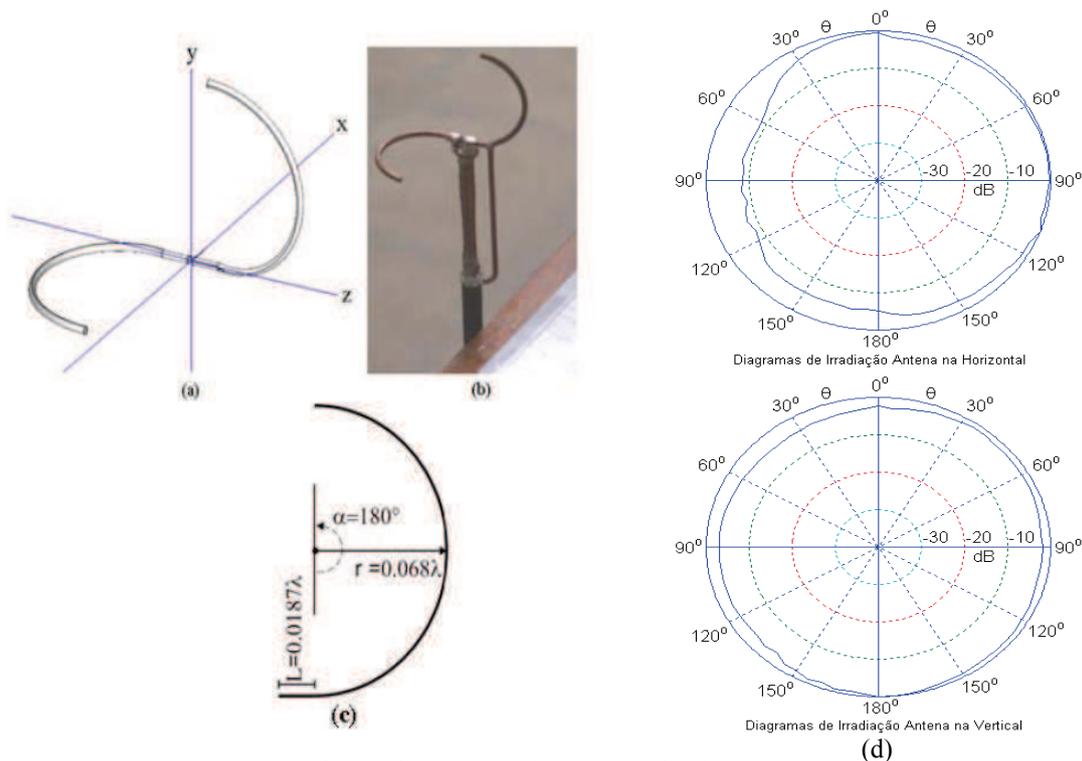


Figura 6 - Antena dipolo de meio círculo.

3.3. Projeto dos Agitadores de Modos

Optou-se por utilizar apenas um agitador de modos no interior da CR no intuito de verificar se este elemento sozinho é suficiente para elevar o nível de uniformidade de campo dentro dos patamares previstos na norma.

Um parâmetro de vital importância é o formato do agitador de modos que determinará como esse elemento altera as condições de contorno no interior da CR. Foram utilizados agitadores de modos no formato de cruz [30], dado que esse formato é mais eficiente que o formato de pá retangular.

Após a escolha do formato do agitador deve-se escolher seu tamanho. De acordo com [17] um agitador que possua dimensões (de comprimento) entre 50 % e 75 % das dimensões da parede da CR à qual está fixado afetar a distribuição do campo de tal maneira que elevará a uniformidade deste.

Estando o agitador na parede que mede $80 \times 85 \text{ cm}^2$, decidiu-se construí-lo com uma área de aproximadamente $60 \times 63 \text{ cm}^2$, de tal forma que o mesmo possuísse dimensões entre 50 e 75% da parede. A área ocupada pelo agitador de modos equivale a aproximadamente 55,5% da área da parede no qual foi fixado.

De acordo com testes de medição realizados em [18], um agitador deve ter dimensões entre 1 e 3 comprimentos de onda. Sendo um dos objetivos deste trabalho de

dissertação construir uma CR compacta, dadas as dimensões da cavidade, a confecção de um agitador de modos maior ou igual a 2λ seria impraticável (o comprimento de onda para a MFU (800 MHz) é $\lambda=37,5\text{cm}$).

Respeitando o pré-requisito de projeto de manter a CR compacta, decidiu-se que o agitador teria dimensão maior que λ ($1,84\lambda$), nos seus eixos centrais, contudo a largura de cada braço foi projetada medindo aproximadamente $0,6\lambda$. Dessa forma, o primeiro agitador de modos (agitador 1) foi projetado conforme apresentado na Figura 7.

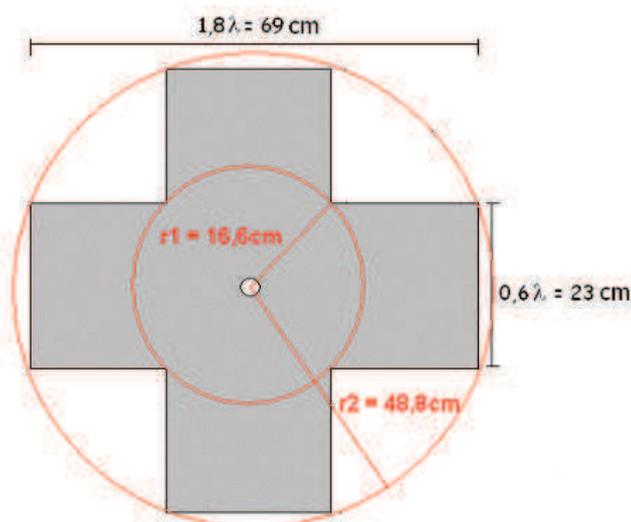


Figura 7 – Agitador de Modos 1.

Os dois círculos concêntricos em destaque na Figura 7 fazem referência às duas condições de contorno distintas existentes quando da rotação do mesmo. O menor círculo indica a região do agitador na qual as condições de contorno não se alteram no tempo. Isso ocorre devido ao fato de a rotação do agitador não alterar a sua geometria na região do círculo menor.

Dessa maneira, é provável que na região de raio r_1 ocorra a formação de ondas estacionárias, o que pode levar o campo a não ter a uniformidade desejada nessa região. Já no círculo de raio r_2 as condições de contorno são alteradas e provavelmente a uniformidade do campo nessa região é alcançada.

Visando minimizar o efeito de ondas estacionárias provocado pela região r_1 , foi proposto nesse trabalho outro agitador de modos (agitador 2) onde essa região é reduzida, destaque da Figura 8. Nesse caso tem-se a diminuição da região r_1 , contudo, há também uma diminuição da área útil do agitador de modos. É importante lembrar que nesse caso há uma relação de compromisso entre a dimensão e o formato do agitador de modos.

Um fator que pode reduzir a uniformidade do campo é a simetria do agitador de modos, devido a limitações práticas optou-se no projeto pelo uso de agitadores simétricos.

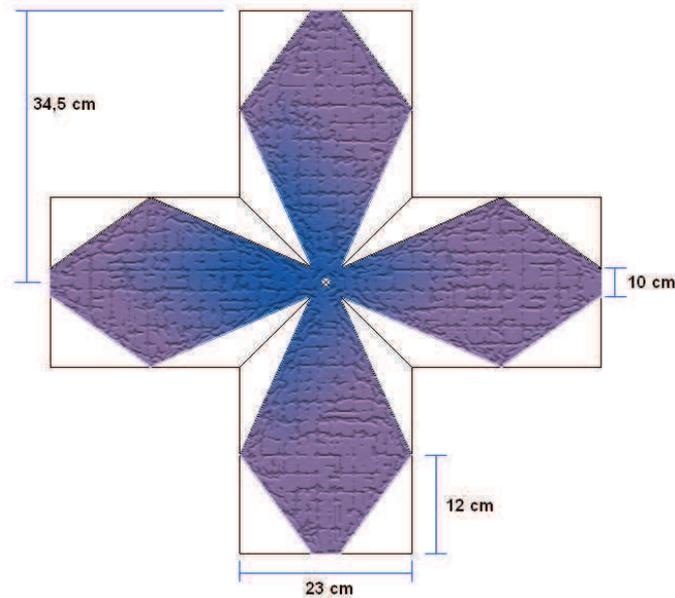


Figura 8 – Agitador de Modos 2.

3.4. Projeto do Sistema Motor do Agitador

No sistema de movimentação do agitador é necessário um controle de velocidade pelo usuário da câmara. Inicialmente analisou-se a idéia de utilizar um motor de passo, dado que o mesmo tem velocidade e posição facilmente controláveis. Contudo, o fato de esses motores possuírem um eixo de raio muito reduzido, por limitações práticas de construção, impossibilitou seu uso.

Uma segunda opção, a adotada no projeto, foi o uso de um motor de indução. Ele apresentou-se adequado às necessidades de projeto do sistema, devido à sua robustez mecânica e à sua grande disponibilidade no mercado, podendo ser encontrado em ventiladores, por exemplo.

O motor de indução não tem velocidade controlável de maneira direta, nem possui controle de posição. Apesar disso, o motor de indução pode ter sua velocidade controlada pela diminuição do torque em seu eixo devido ao controle da tensão de alimentação do mesmo. Logo, o uso de um controlador de tensão pode indiretamente alterar a velocidade do motor.

Um controlador de tensão pode facilmente ser projetado ou encontrado no mercado, portanto essa foi a solução adotada. O sistema de controle é feito utilizando um Dimmer [37].

O circuito projetado controla o ângulo de condução de um TRIAC disparando-o em diversos pontos do sinal senoidal da rede, permitindo que potências diferentes sejam aplicadas ao motor. Se o disparo ocorre no início do ciclo, todo o ciclo será conduzido ao motor, de modo que este terá potência máxima.

Contudo, alterando a posição de um potenciômetro, pode-se alterar a posição de disparo para que este ocorra mais próximo do final do ciclo, assim menos potência será fornecida ao motor, o que fará com que o mesmo tenha uma redução em sua velocidade. O funcionamento do sistema é ilustrado na Figura 9 e o seu diagrama elétrico é apresentado na Figura 10 [37].

O circuito tem aplicação limitada já que a sua operação gera harmônicos na rede devido ao chaveamento abrupto da tensão. Outro problema é que a velocidade no eixo do motor de indução depende do torque a ele aplicado, isso pode fazer com que a velocidade não se mantenha constante durante o uso da CR. A velocidade de rotação do agitador de modos é 120 rpm.

Há ainda outra desvantagem, o superaquecimento do motor que para fornecer o torque necessário à rotação do agitador de modos (de peso maior que o de uma hélice de ventilador), necessita de uma corrente mais elevada, esse aumento de corrente pode derreter os fios do motor danificando-o. Dessa forma a utilização da CR com o agitador de modos em rotação deve ser feita por um tempo não superior a 5 minutos consecutivos.

Existem outros tipos de controladores de tensão para a velocidade do motor. O ideal é um circuito que controle a tensão pelo número de ciclos permitidos, interrompendo a tensão no momento de passagem pelo zero, o que diminui o número de harmônicos. Outra opção é a troca do motor de indução por um motor síncrono utilizando redutor de velocidade mecânico.

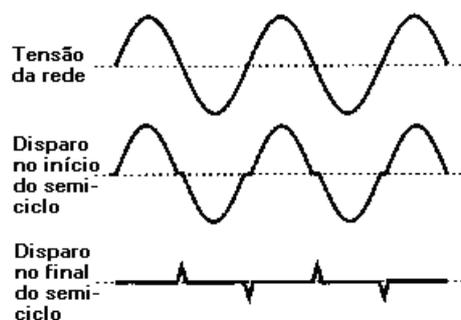


Figura 9 – Potência Aplicada em Função do Instante de Disparo do TRIAC [37].

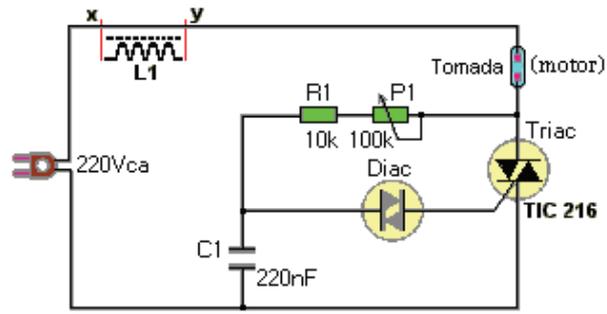


Figura 10 – Circuito do Controlador de Velocidade [37].

Capítulo 4

Modelamento Eletromagnético Tridimensional da CR

Existem diversas complicações inerentes ao projeto de uma câmara de reverberação (CR) eletromagnética, uma delas é o fato de não existir uma fórmula ou um procedimento para realizá-lo. O que se disponibiliza nas normas, como por exemplo, na IEC 61000-4-21, são os parâmetros necessários para que uma Cavidade Ressonante Retangular (CRR) possa ser considerada uma CR. As normas não fornecem informações de como deve ser construída uma câmara, ou seja, não descreve os procedimentos para obter os resultados esperados.

Nesse contexto, resta ao projetista o estudo de trabalhos científicos que tenham tratado de diferentes tipos de CR, bem como seus conhecimentos de eletromagnetismo. Estudando cada parte da CR em separado, pode-se escolher quais características são mais interessantes e quais são dispensáveis ao projeto. Dessa forma, é possível criar um procedimento próprio de projeto onde o efeito da alteração de determinada característica possa ser estimado e controlado.

O uso de ferramentas computacionais que possibilitem simular o comportamento do campo eletromagnético (EM) no interior da câmara, antes de iniciar a sua construção, é uma etapa necessária de projeto. Essa necessidade deve-se ao fato de existir uma grande probabilidade de que determinado projeto não apresente os resultados esperados nos os primeiros testes.

Utilizando uma ferramenta de simulação é possível prever o comportamento de determinado parâmetro sem a necessidade de construí-lo, dessa forma o projetista só passará à fase de construção do sistema após a confirmação computacional de qual estrutura conduz aos resultados esperados.

4.1. Método de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo

O método de Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD) é um método numérico para solucionar as equações de Maxwell diretamente no tempo e no espaço [18]. Através do FDTD, que é uma solução de onda completa dos campos eletromagnéticos (resolve as equações de onda completa de Maxwell sem utilizar qualquer aproximação quase-estática [38]), é possível encontrar o vetor campo elétrico em qualquer ponto do volume simulado em um determinado instante de tempo.

Um dos motivos de se escolher o FDTD para simular o campo elétrico no interior da CR é a capacidade que esse método tem de representar o comportamento do campo no domínio do tempo, permitindo assim uma fácil visualização do mesmo quando da presença ou ausência do agitador de modos. A propagação do campo pode ser analisada em um dado período de tempo, contudo, com o aumento de tempo simulado, aumenta a necessidade de recurso computacional. Isso é extremamente importante para que o projetista possa, por análise visual, compreender como o agitador de modos (formato, posição, tamanho) altera o comportamento do campo.

Outra vantagem do uso do FDTD é a simplicidade com que o projetista pode variar alguma característica do modelo, simplesmente alterando o material da célula. As alterações podem ser feitas através de ambientes gráficos de CAD, nos quais há uma grande liberdade para se desenhar qualquer estrutura, por mais complexa que essa seja. Assim, a versatilidade do método FDTD é um atrativo já que nenhuma reformulação matemática será necessária quando da alteração do modelo.

Uma desvantagem é o fato de que mesmo desejando-se simular o comportamento do campo em algumas células e em um determinado instante de tempo do modelo, faz-se necessário simular o comportamento do campo em todas as células da malha até o instante de tempo desejado. Essa característica faz com que seja necessário utilizar o mesmo recurso computacional, até em situações nas quais se deseje algo mais simples.

O volume da simulação é discretizado em células (de dimensão Δx , Δy , Δz), que são o menor elemento existente para a simulação (Figura 11). Tais células são conhecidas como células de Yee (assim denominadas em homenagem a Kane Yee [38]).

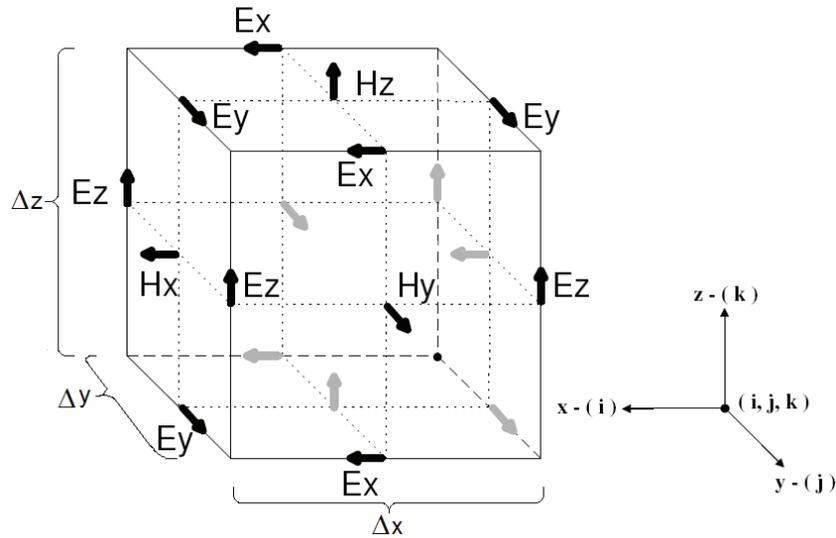


Figura 11 - Célula de Yee [39].

No método, cada componente de campo elétrico é circundada por quatro componentes de campo magnético e cada componente de campo magnético é circundada por quatro componentes de campo elétrico. O cálculo das componentes de campo elétrico e magnético é realizado de maneira alternada a cada $\frac{1}{2}$ passo de tempo.

O ambiente discretizado pode ser considerado uma matriz tridimensional de células de Yee, como em uma matriz não há índices fracionários, a seqüência de cálculo tem de ser realizada considerando índices inteiros. A notação utilizada para o cálculo dos componentes de campo pode ser observada na Figura 12, onde i , j e k são componentes de posição na célula.

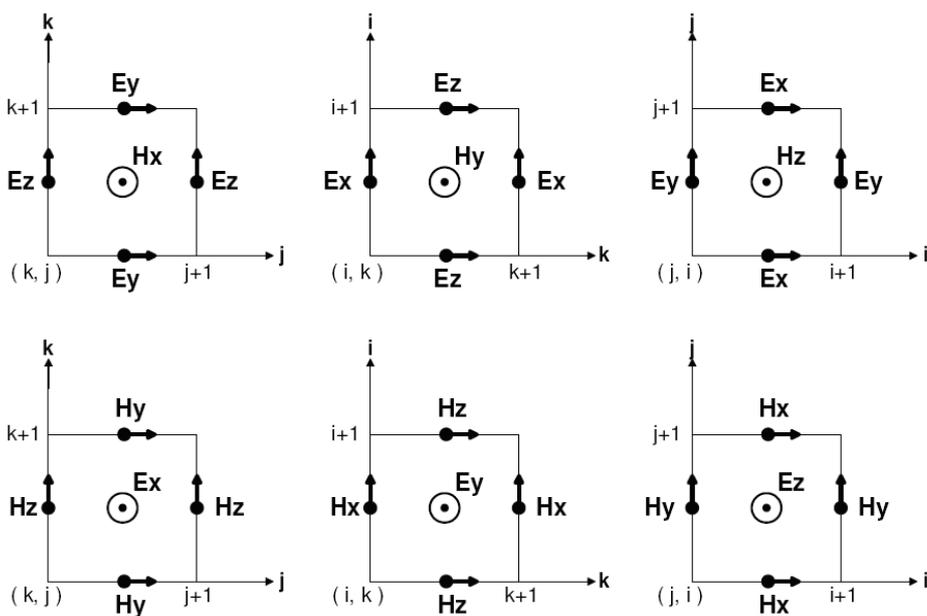


Figura 12 – Componentes de campo em uma célula de Yee [39].

As células são dispostas em uma malha tridimensional que compõe o domínio computacional da simulação tal qual ilustrado na Figura 13. Uma malha mais refinada possui um número maior de células, dessa forma, pode-se dizer que o número de células está relacionado com a resolução do campo. O número de células também será um fator determinante para a quantidade de recurso computacional necessária para simular o sistema.

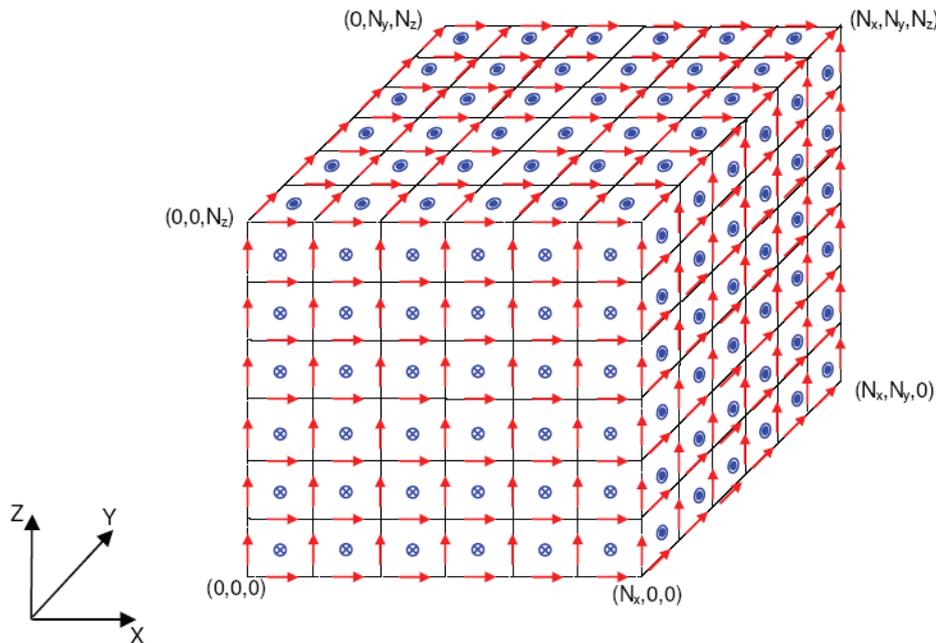


Figura 13 - Distribuição dos campos no domínio computacional [21].

Com o FDTD pode-se realizar uma simulação no espaço e no tempo simultaneamente. É importante entender como é realizado esse processo. A idéia do algoritmo é simples:

- Calculam-se os vetores campo Elétrico e Magnético em todas as células da malha, considerando as condições iniciais nulas.
- Incrementa-se o passo de tempo (Δt);
- Utilizando os resultados do passo de tempo anterior como condições iniciais calculam-se os novos valores dos vetores campo Elétrico e Magnético;
- Incrementa-se um novo passo de tempo (Δt);

O procedimento se repete até que o tempo simulado seja igual a $T=Nx\Delta t$, onde N é o número de passos de tempo que é um valor inteiro. O valor mínimo para Δt que garante a estabilidade deve obedecer ao critério de Courant [21], equação (35). Fisicamente é importante lembrar que o tempo (Δt) deve ser suficiente para permitir que

o campo elétrico viaje através da maior dimensão da célula, ou seja, o campo deve ser no mínimo capaz de percorrer a distância da diagonal principal (no caso de dimensões diferentes de Δx , Δy e Δz) de uma célula no intervalo Δt .

$$\Delta t \leq \frac{1}{c \sqrt{\frac{1}{\Delta X^2} + \frac{1}{\Delta Y^2} + \frac{1}{\Delta Z^2}}} \quad (35)$$

4.2. Ambiente de Simulação

Para realizar as simulações do modelo foi utilizado o programa FDTD Studio V2.0, desenvolvido por Renato Proença Picanço durante seu mestrado [21]. O programa consiste em um ambiente gráfico bastante versátil e simples de utilizar, com algumas fontes e sensores pré-definidos que simplificam bastante a análise dos resultados. A interface do programa pode ser observada na Figura 14.

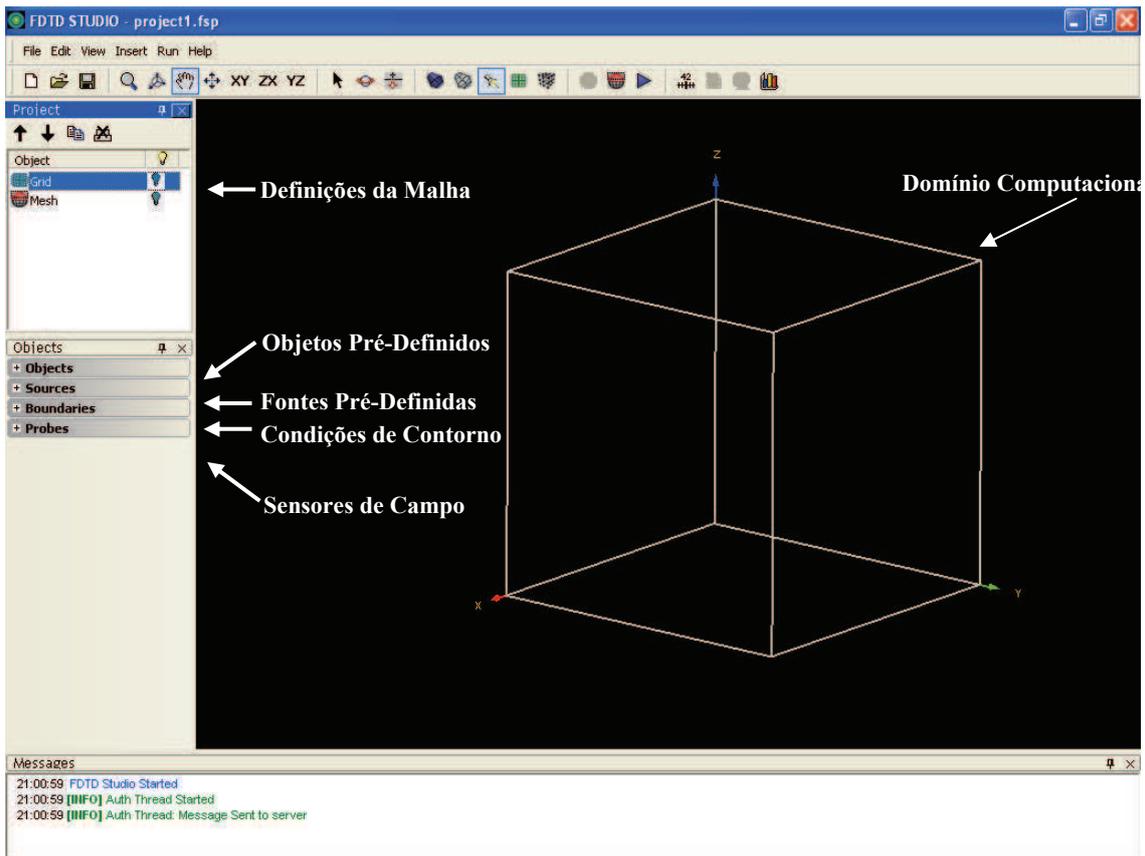


Figura 14 - Interface do programa FDTD STUDIO V2.0.

As características do domínio computacional são definidas utilizando o *mouse* através de um duplo-clique na aba **grid** o que ativará a janela em destaque na Figura 15. Nessa aba pode ser definido o número de células do domínio em cada um dos eixos coordenados (*Cells X*, *Cells Y*, *Cells Z*). Definem-se também nessa aba as dimensões físicas do domínio computacional (X_{min} , Y_{min} , Z_{min} e X_{max} , Y_{max} , Z_{max}).

No campo *Time steps* escolhe-se o número de passos de tempo que se deseja simular. O valor da variável passo de tempo é definido no campo *delta T*. Para simplificar o uso do programa, a variável passo de tempo é escolhida automaticamente no caso de o projetista inserir um valor que não seja aceito (não obedeça ao critério de Courant).

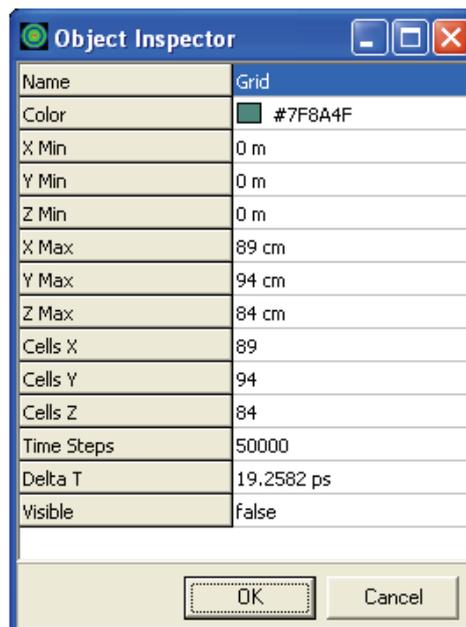


Figura 15 - Parâmetros da Malha

Para o modelo em questão, definiu-se um domínio computacional de dimensões 89x94x84 cm, que é um pouco maior que as dimensões da câmara. O número de células foi escolhido para que cada célula formasse um cubo de aresta igual a 1 cm. O número de elementos da simulação foi $89 \times 94 \times 84 = 702.744$ elementos.

É importante lembrar que o número de elementos de simulação determina a resolução do sistema, quanto maior a resolução, mais próximo o sistema estará da realidade. Contudo, um aumento no número de elementos acarretará em um aumento dos recursos computacionais necessários para realizar tal simulação. Para o mesmo equipamento (computador), o aumento no número de células aumentará o tempo real de simulação.

O número de passos de tempo (N) foi 30000 e o passo de tempo (Δt) de 19,2582 ps definido pelo programa de acordo com o critério de Courant. A escolha de um número tão grande de passos de tempo foi para garantir que houvesse a possibilidade de formação de ondas estacionárias no interior da câmara.

O tempo total para uma simulação foi de $T = 0,578 \mu s$ ($T=N\Delta t$). Considera-se que as ondas eletromagnéticas no interior da câmara viajam à velocidade da luz no vácuo e que a maior distância possível no interior da câmara é a sua diagonal principal.

Pode-se então verificar através de (36) que a onda EM seria capaz de percorrer a diagonal, ser refletida no ponto mais extremo da câmara e retornar à fonte, por aproximadamente 59 vezes. Pode-se considerar que nesse caso a onda teria tempo suficiente para entrar em regime estacionário.

$$\begin{aligned} \Delta S &= c_0 T = 173,4 \text{ m} \\ \text{Diag} &= \sqrt{0,8^2 + 0,85^2 + 0,9^2} = 1,474 \text{ m} \\ \frac{\Delta S}{2 * \text{Diag}} &= \frac{173,4}{2 * 1,474} = 58,823 \end{aligned} \quad (36)$$

As paredes da câmara foram modeladas utilizando um elemento pré-definido do programa, as placas de condutor elétrico perfeito (*perfect electric conductor - PEC*). Esse elemento pode ser encontrado na aba objetos. Foram definidas seis dessas placas, com dimensões iguais às das paredes da câmara (85x90x80 cm).

Para garantir que não há fuga de campo, o domínio computacional foi intencionalmente definido maior do que as dimensões da CR e sensores foram posicionados fora do volume definido pelas placas, onde verificou-se que não havia campo no exterior da região delimitada pelas paredes da CR.

Uma outra aba importante do programa é a de fontes (Figura 16) onde são encontrados os geradores de onda pré-definidos. Dentre essas fontes está a antena dipolo, cujo diagrama de irradiação pode ser observado na Figura 17. O dipolo foi o elemento irradiador de campo utilizado na câmara, esta antena foi alimentada com uma fonte senoidal de frequência 800 MHz.



a



b

Figura 16 – (a) - Características da antena dipolo utilizada; (b) – Aba de Fontes.

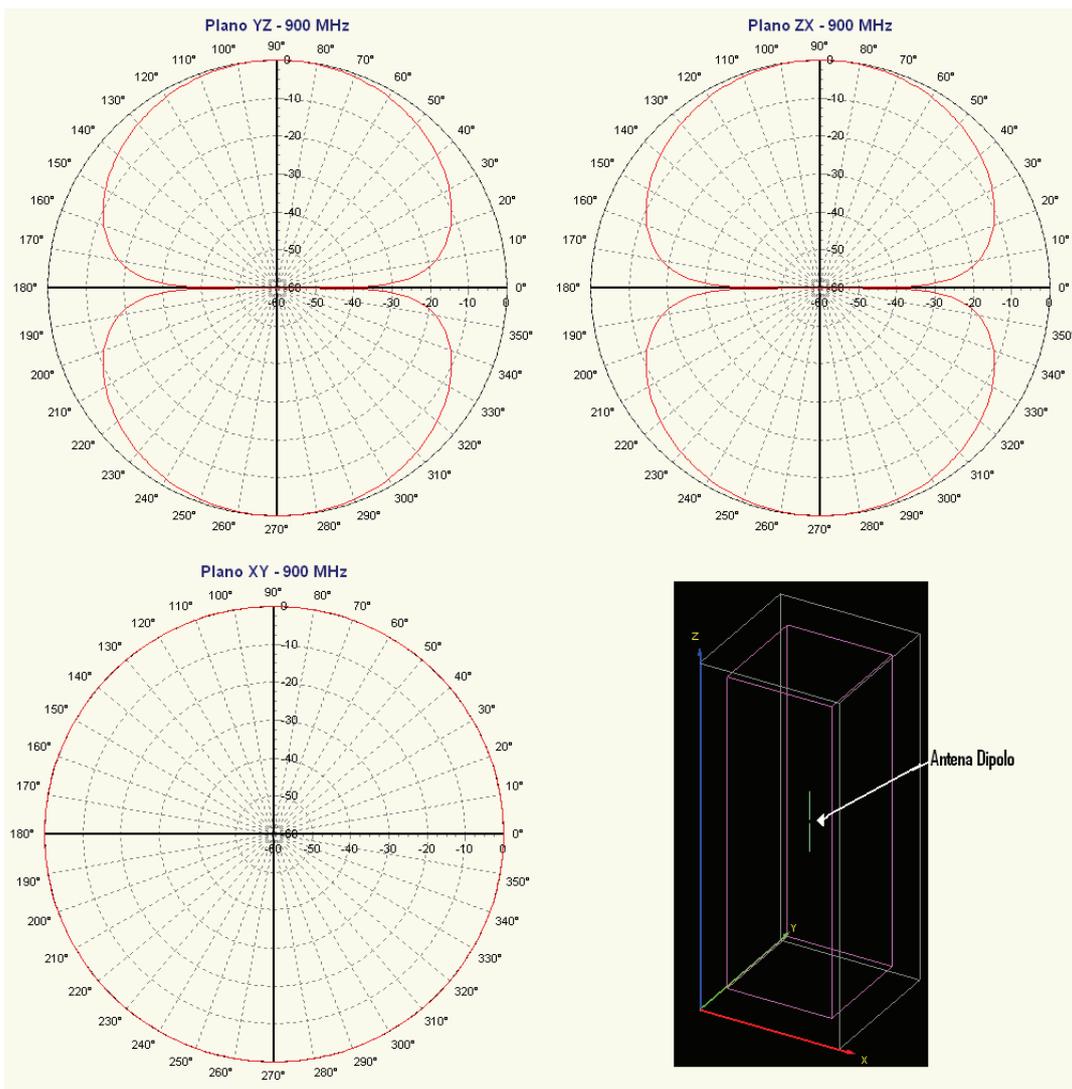


Figura 17 - Antena dipolo e diagramas de irradiação nos planos coordenados.

A capacidade que o programa FDTD Studio v2.0 tem de utilizar elementos gráficos externos, gerados em CAD (*Computer Aided Design*), aumenta a sua versatilidade. A extensão de arquivos aceita para importação é DXF, uma extensão comumente utilizada por aplicativos de CAD.

Essa facilidade permite que modelos complexos sejam gerados em programas apropriados para a sua criação, obedecendo às escalas e às dimensões desejadas. Para inserir um objeto dessa natureza deve-se, no menu objeto, clicar na aba *DXF Object*. Em seguida a janela representada na Figura 18 se abrirá e nela deve-se inserir o caminho do objeto.

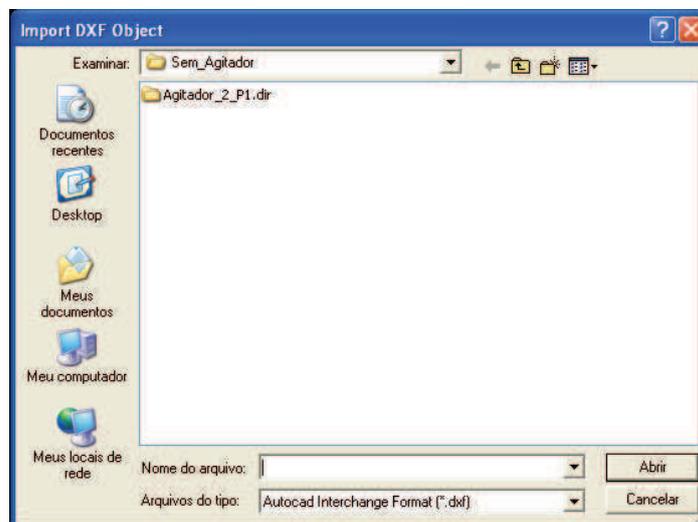


Figura 18 - Janela de importação de arquivo DXF.

É importante lembrar que a menor dimensão de qualquer objeto (exceto o raio da antena) será a de uma célula. Dessa forma é normal que haja alguma perda de resolução quando for feito o *mesh* do objeto. O programa interpreta cada objeto como um modelo discretizado em células para efetuar a simulação.

Um exemplo pode ser observado na Figura 19. Nesse caso uma esfera foi discretizada em uma malha de 20x20x20 elementos. Portanto, deve-se estabelecer uma relação de compromisso entre o recurso computacional disponível e o número de elementos mínimo que possa representar com um grau de fidelidade aceitável o objeto a ser simulado.

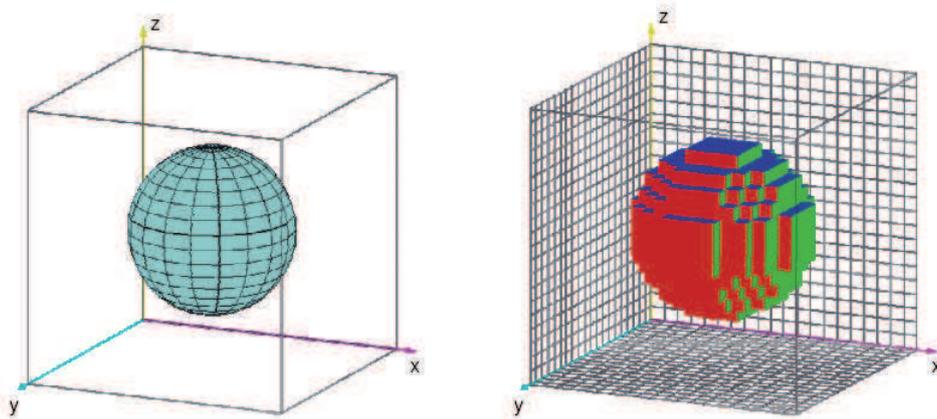


Figura 19 - Mapeamento de uma esfera em uma malha de 20X20X20 [21].

Os agitadores de modos utilizados na câmara foram gerados em um programa de modelamento 3d (**Studio Max R6**) capaz de exportar arquivos com a extensão DXF. O modelo do agitador foi inserido no FDTD STUDIO V2.0 onde foi feita a consideração de que o agitador de modos é constituído de material condutor elétrico perfeito (PEC).

De acordo com a norma IEC 61000-4-21 [40], [25], [23], para caracterizar a uniformidade do campo elétrico no interior da câmara, o campo deve ser medido nos oito vértices que definem a zona de campo uniforme (ZCU). Cada ponto deve estar localizado a uma distância mínima de $\lambda_{MFU}/3$ [28] (onde λ_{MFU} é o comprimento de onda da menor frequência utilizada) de qualquer parede metálica ou do agitador de modos Figura 20.

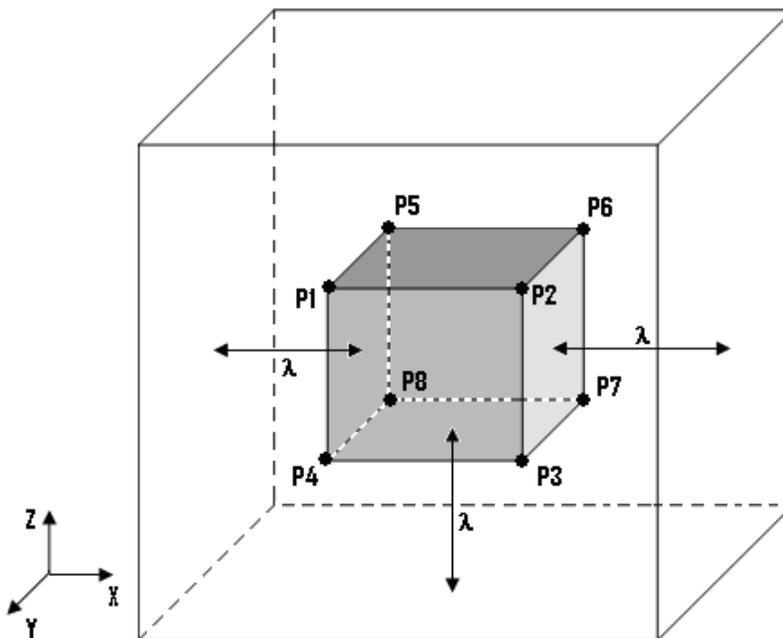


Figura 20 - Zona de Campo Uniforme e Pontos de Teste.

Um dos objetivos desta dissertação é otimizar o volume útil no interior da CR, isso consiste em encontrar cenários que elevem o grau de uniformidade da CR, aumentando a margem entre o desvio padrão medido e o estabelecido na norma. Foram simuladas duas ZCU localizadas às distâncias $\lambda_{800\text{MHz}}$ e $\lambda_{800\text{MHz}}/2$ de qualquer parede ou do agitador de modos.

Tomar uma distância de $\lambda_{800\text{MHz}}$ de qualquer parede ou do agitador diminui a ZCU o que não é uma característica desejada, contudo, essa diminuição de tamanho aumenta a uniformidade do campo pela redução da probabilidade do estabelecimento de ondas estacionárias em seu interior.

Tomando a frequência de 800 MHz, tem-se $\lambda_{800\text{MHz}} = 37,5$ cm e $\lambda_{800\text{MHz}}/2 = 18,75$ cm, dessa forma os pontos devem estar respectivamente a 37 e 19 células de distância de qualquer parede metálica e do agitador de modos. As ZCU testadas medem $ZCU_1 = 11 \times 5 \times 6$ cm³ (λ) e $ZCU_2 = 47 \times 42 \times 41$ cm³ ($\lambda/2$), dentro dessa zona serão colocados os equipamentos sob teste (EST). No simulador os pontos ficaram distribuídos da forma apresentada na Figura 21.

Comparando os volumes das ZCU verificadas com o da cavidade retangular de ressonância (CRR) da câmara, encontram-se os valores apresentados nas tabelas 1 e 2.

Volumes em cm ³	
CRR	$85 \times 90 \times 80 = 612000$ cm ³
ZCU ₁	$11 \times 4 \times 6 = 264$ cm ³
ZCU ₂	$63 \times 56 \times 58 = 204624$ cm ³

Tabela 1 - Volumes da CR e das ZCU₁ e 2.

Relação entre o Volume da CRR / Volume da ZCU	
ZCU ₁	231800%
ZCU ₂	300%

Tabela 2 - Relação entre o Volume da CR e os volumes das ZCU₁ e 2.

O campo elétrico foi medido em 27 pontos para cada ZCU definida, como foi dito, a norma sugere que sejam utilizados apenas 8 pontos. Contudo, o aumento do número de pontos permite uma melhor compreensão do comportamento do campo no interior da ZCU por reduzir a probabilidade de que alguma onda estacionária se estabeleça e não seja medida.

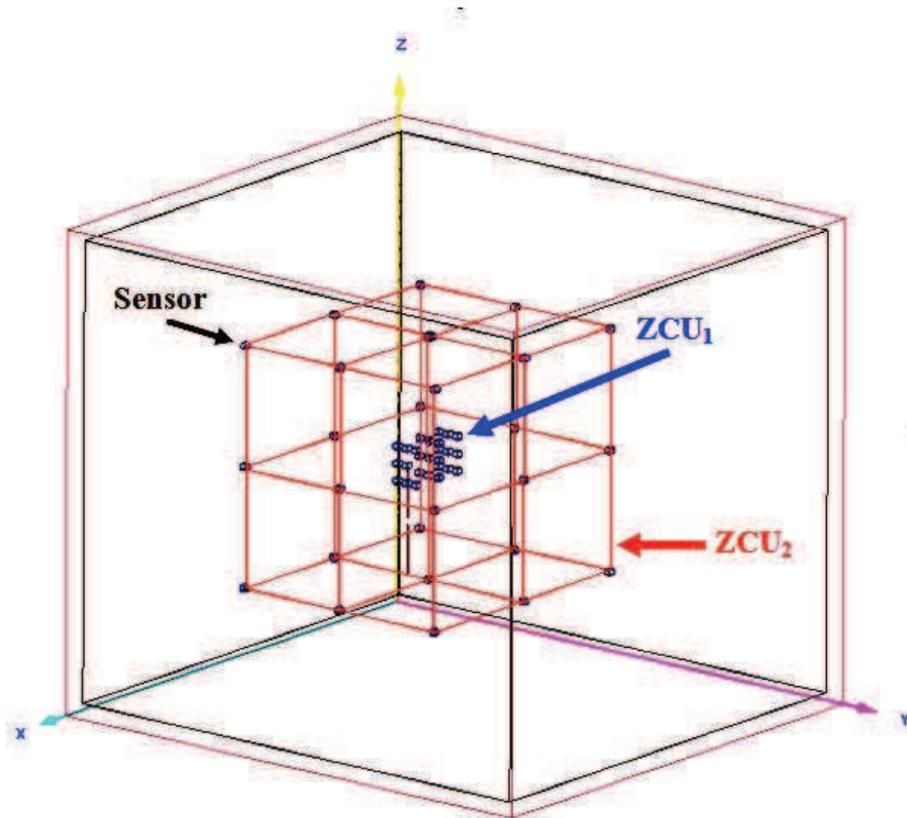


Figura 21 - Distribuição dos Sensores de Campo no Interior do modelo da CR.

Um parâmetro importante na avaliação da uniformidade do campo no interior da ZCU é verificar o quanto a incidência direta do sinal transmitido pela fonte isotrópica em determinados pontos de medição das ZCU afeta a uniformidade do campo.

Para essa avaliação foram realizadas simulações considerando a presença de um elemento metálico espalhador de campo (aqui denominado refletor) em frente à antena transmissora (Figura 22). A presença do refletor impede a incidência direta do campo nos pontos de medição, reduzindo assim a incidência de picos de intensidade de campo, o que eleva o grau de uniformidade da cavidade. Foi feita então a verificação da uniformidade do campo nas ZCU₁ e ZCU₂.

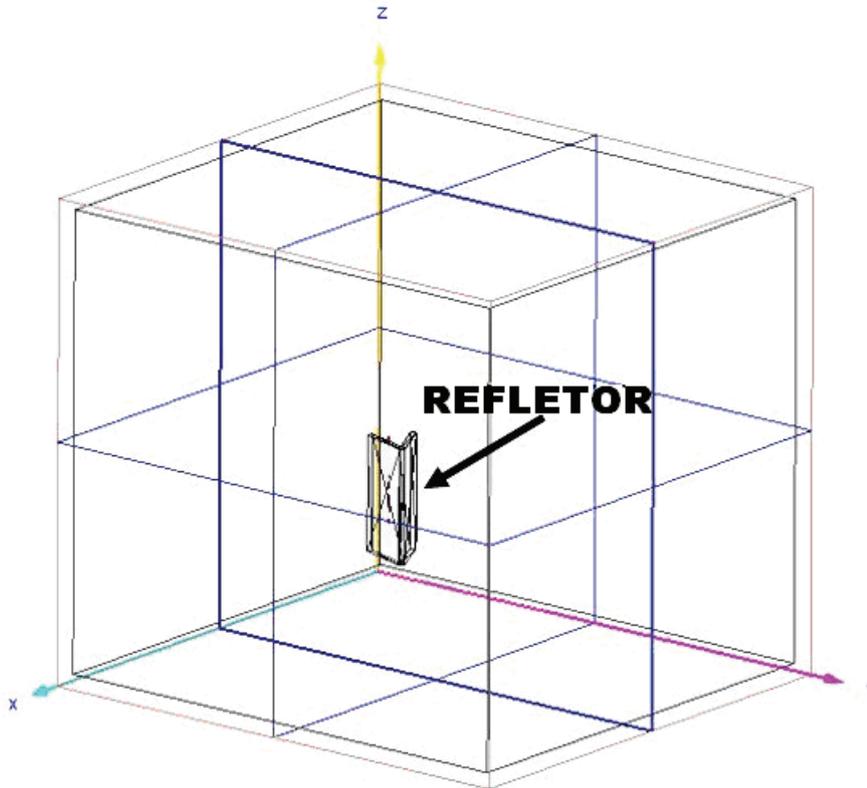


Figura 22 – CR com elemento metálico – Refletor.

Para observar de maneira mais detalhada o comportamento do campo elétrico no interior da CR foram definidos três planos de medição para o módulo do campo elétrico (XY, XZ e YZ). Os planos foram posicionados espacialmente de forma que eles se interceptam no centro geométrico da CR (Figura 23). É possível visualizar a variação do campo em uma animação gerada pelo programa. Utilizando para isso o comando *field animation control* presente na barra de ferramentas localizadas na parte superior da janela principal do programa.

Há ainda uma outra vantagem de se utilizar esses planos de medição, utilizando-os é possível calcular o valor médio do campo em cada um dos planos e assim verificar como um agitador de modos altera essa distribuição de campo.

Em uma CR de modos agitados deve-se rotacionar o agitador de modos, o que altera as condições de contorno do interior da CR. Essa alteração contínua das condições de contorno evita a formação de ondas estacionárias, as quais diminuem a uniformidade do campo.

Não é possível realizar uma simulação considerando que a rotação do elemento agitador de modos seja contínua como ocorre no experimento físico. Em simulações computacionais não há a definição de contínuo, tudo é realizado de maneira discreta. O

problema ao se discretizar qualquer sistema é que ele deixa de ser tratado como exato e passa a ser tratado como uma aproximação. Dessa forma há uma relação de compromisso entre o real (contínuo) e o computacional (discreto).

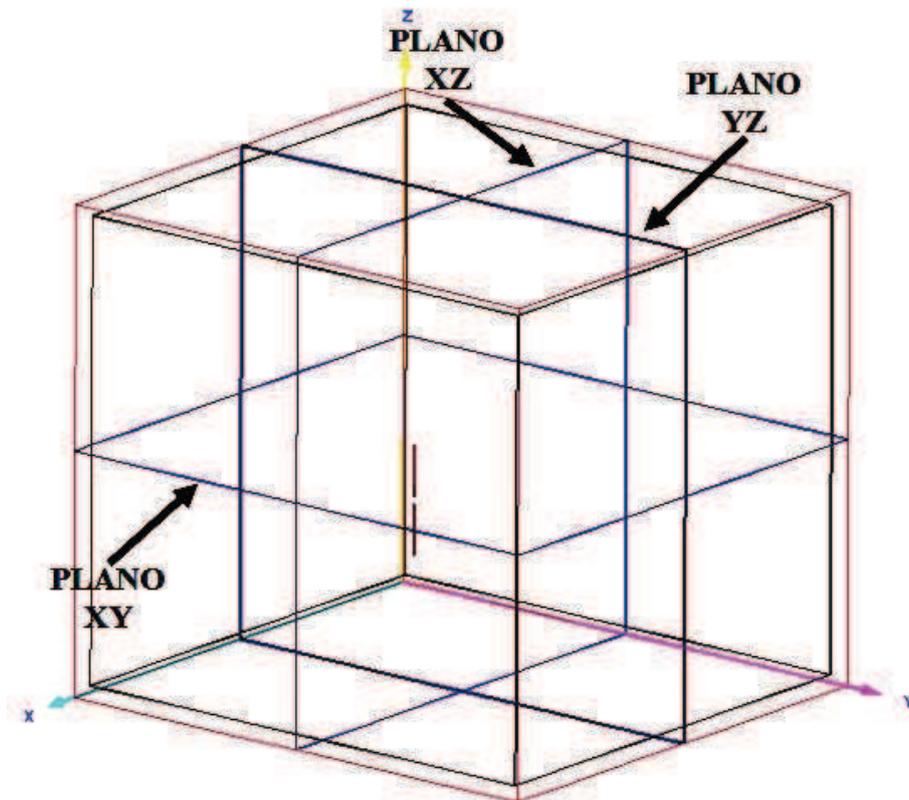


Figura 23 – Planos de Medição do Módulo do Campo Elétrico.

A solução encontrada para simular a rotação do agitador de modos foi discretizar a sua rotação. Considerou-se que o agitador assume, de maneira estática, as posições relativas a cada passo de rotação simulado. Dessa forma, o comportamento do campo é calculado para o agitador parado em cada posição de cada um dos passos de rotação. O comportamento do campo no caso real (rotação contínua) é obtido através da análise do campo em cada passo de rotação.

Os agitadores de modos em forma de cruz apresentam simetria vertical e horizontal, portanto, há uma representação espacial que se repete a cada 90° de rotação. Utilizando essa simetria para reduzir o esforço computacional, a simulação foi realizada para uma rotação máxima de 90° , definiu-se que uma rotação de 90° seria realizada em quatro passos, assim o passo de rotação de $22,5^\circ$ ($90^\circ/4$). As Figura 24 e Figura 25 representam as posições dos agitadores um e dois para cada um dos passos de rotação simulados.

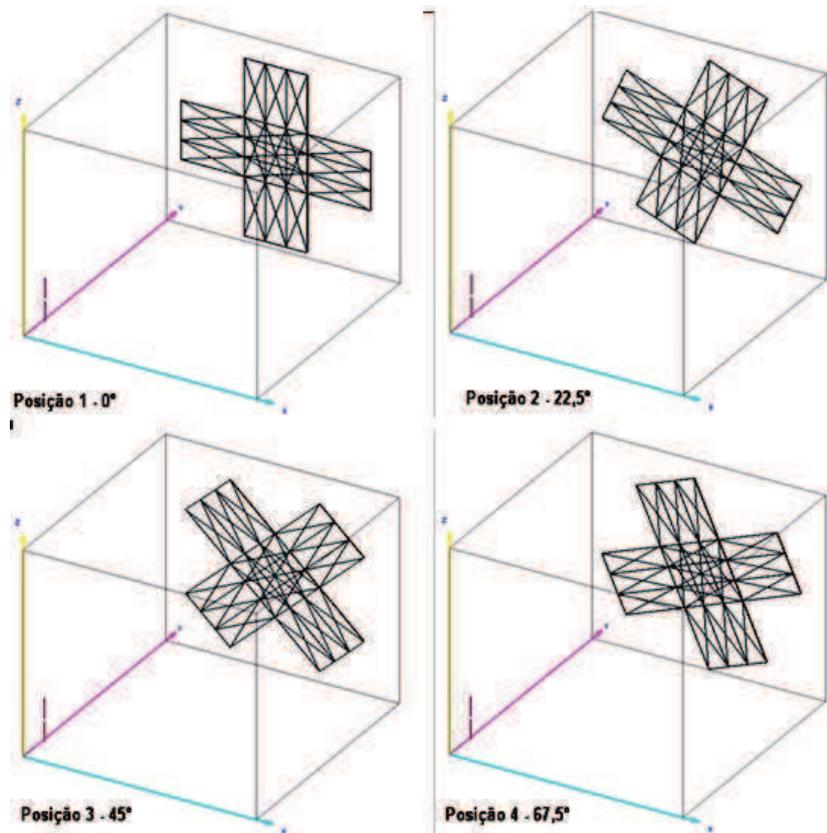


Figura 24 - Posições do Agitador 1.

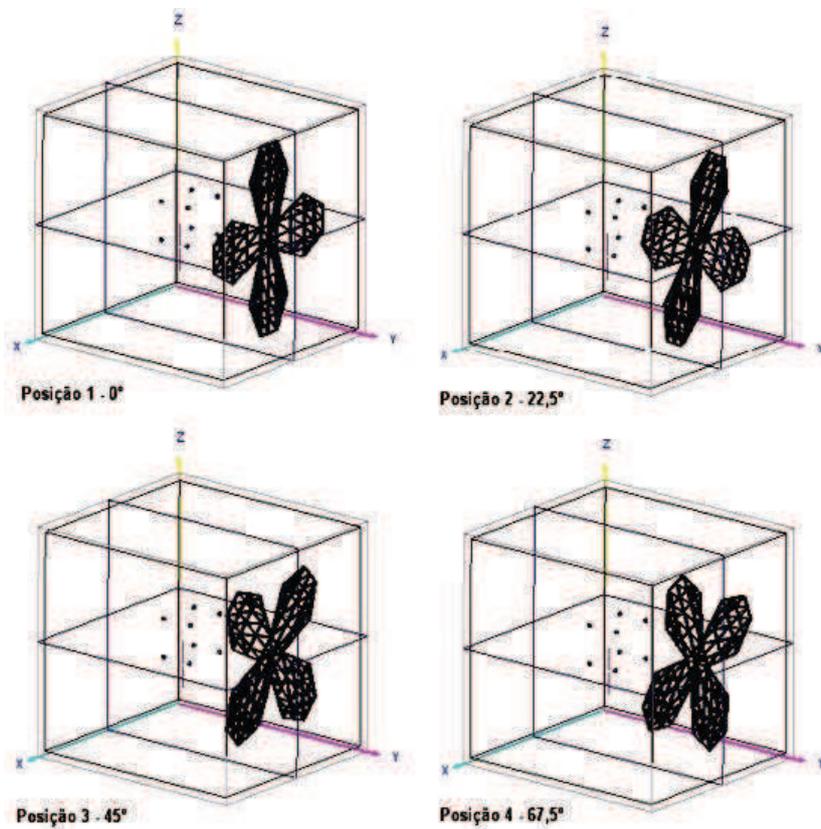


Figura 25 - Posições do Agitador 2.

Cada simulação foi realizada para o agitador de modos parado e posicionado em um dos quatro passos de rotação definidos. A cada incremento no ângulo do agitador foi realizada uma nova simulação independente.

Simular o agitador de modos em movimento durante um ciclo completo de rotação iria requerer um esforço computacional extremamente grande, dado que considerando a velocidade de rotação do agitador igual a 120 rpm, o mesmo completaria um ciclo em 0,5 s. Esse tempo é muito grande para ser simulado com os recursos disponíveis. Contudo, não é necessário simular a rotação do agitador de modos de forma contínua [19] para conhecer o campo no interior da câmara. A rotação do agitador de modos real deve ser contínua para que a CR possa ser classificada como sendo de modos agitados.

A rotação do agitador de modos pode ser realizada de maneira discreta [11], [5]. Sabe-se que tempo de parada ($T = 0,578 \mu\text{s}$) é muito inferior ao tempo de rotação do agitador ($T_R = 0,5 \text{ s}$). Considerou-se então que durante o tempo de simulação T o agitador de modos estava parado, pois em um intervalo de tempo desses, o agitador teria variado sua posição em apenas $4,12 \cdot 10^{-4}^\circ$.

Esses dados de cada posição do agitador foram interpretados para fornecer uma amostra do comportamento real do campo elétrico no interior da câmara durante um ciclo de rotação do agitador de modos. Para cada posição do agitador foram verificados os valores máximos alcançados pelo módulo do campo elétrico em cada um dos pontos de medição. De posse desses valores pôde-se estimar a uniformidade do campo no interior da ZCU e como verificar a conformidade com a norma adotada.

4.3. Norma IEC 61000-4-21

De acordo com a norma IEC 61000-4-21, deve-se medir o valor máximo do campo elétrico em um ciclo de rotação do agitador para cada um dos pontos de medição Figura 20. O ciclo da simulação foi composto de quatro posições do agitador, dessa forma os valores máximos do campo elétrico tomados são os valores necessários para verificar a norma. Com base nos dados obtidos, deve-se calcular o valor médio dos valores máximos de campo [40] obtidos para cada posição de medição.

A norma IEC 61000-4-21 utiliza esses valores máximos de campo elétrico para calcular o desvio padrão da amostra (módulo do campo elétrico). Deve-se considerar x como sendo o valor médio dos valores máximos do campo elétrico nas N posições de medição (no caso $N = 27$) utilizando a equação (37):

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (x - \bar{x})^2} \quad (37)$$

Calculado o valor do desvio padrão dos valores máximos do campo elétrico, deve-se calcular o desvio padrão global [40], equação (37), em dB. A CR estará conforme com a norma IEC 61000-4-21 se para a frequência de 800 MHz o valor do desvio padrão global encontrado for inferior a 3dB. Uma vez atendida essa exigência pode-se considerar que o campo elétrico no interior da ZCU é uniforme.

$$\sigma_{(dB)} = 20 \log \left(\frac{\sigma + \langle |E^{MAX}| \rangle}{\langle |E^{MAX}| \rangle} \right) \quad (38)$$

Capítulo 5

Análise dos Resultados de Simulação

Os resultados da simulação realizada utilizando o software FDTD Studio v2.0, bem como a validação experimental de tais resultados serão apresentados e analisados neste capítulo. Para verificar a coerência dos resultados obtidos nas simulações, escolheu-se um dos modelos, simulados no FDTD Studio v2.0, o qual foi reproduzido na prática. Os resultados de tal medição foram comparados e verificou-se a margem de erro entre ele e os dados computacionais.

5.1. Resultados de Simulação

A partir das simulações realizadas (descritas do Capítulo 4) foram obtidos os valores do módulo do campo elétrico nos pontos definidos na Figura 21 para cada passo de tempo computado. Os resultados da simulação foram gravados pelo FDTD Studio v2.0 em arquivos de texto de extensão DAT.

Em cada uma das simulações de uniformidade de campo (pontos de medição da ZCU, Figura 21) foram gerados 27 arquivos DAT. Para cada simulação de comportamento de campo elétrico (planos de medição, Figura 23) foram gerados 600 arquivos.

Os arquivos de resultado das simulações foram tratados utilizando o software Matlab®. Os códigos básicos utilizados para realizar o tratamento dos dados e gerar os gráficos presentes nesse capítulo são apresentados no Apêndice III desta dissertação. Cada um dos arquivos foi aberto no Matlab® e seus dados foram convertidos em matrizes que foram utilizadas para realizar os cálculos necessários.

Para possibilitar a compreensão da influência dos elementos agitadores de modos na distribuição espacial do campo no interior da CR, inicialmente foram simulados dois cenários. Esses cenários são descritos na seção a seguir, em ambos foi verificada a distribuição do campo elétrico nos planos de medição em destaque na Figura 23 sem a presença do agitador de modos.

5.1.1. Comportamento do Campo na Ausência do Agitador de Modos

5.1.1.1. Sem Elemento Espalhador Metálico

No primeiro cenário simulado (Figura 26) verificou-se a distribuição do campo elétrico no interior da CR na ausência do elemento refletor. Tal simulação servirá como uma referência do comportamento do campo no interior da CR, pois não há elementos perturbadores de campo. Os resultados da simulação para cada um dos planos podem ser observados nas Figura 27 a Figura 29.

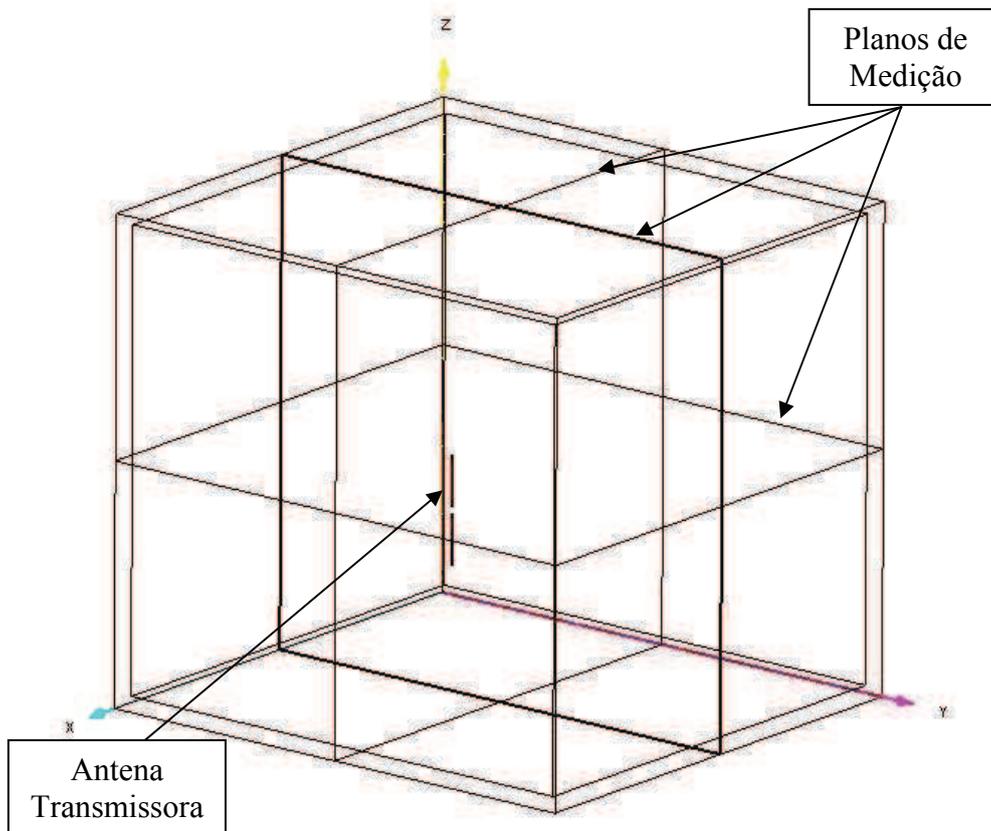


Figura 26 - Cenário simulado, sem agitador de modos e sem refletor.

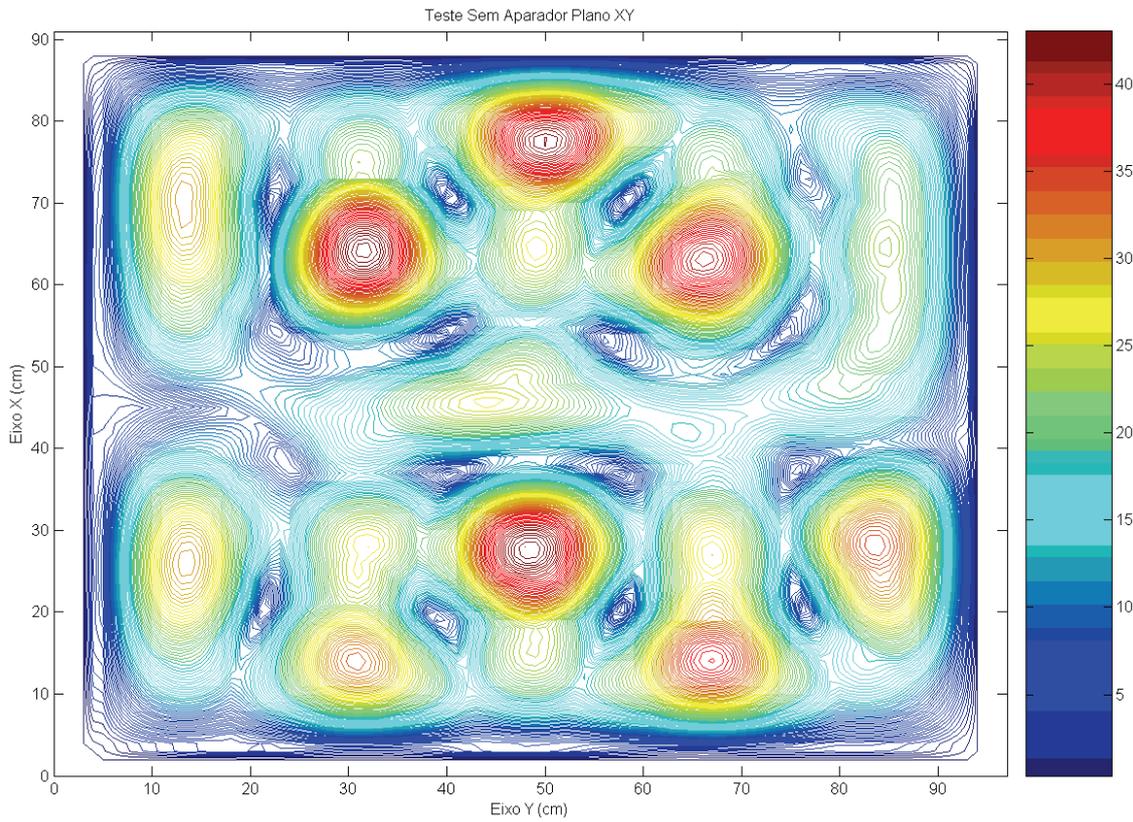


Figura 27 - Campo elétrico (XY) no interior da CR sem agitador e sem refletor (V/m).

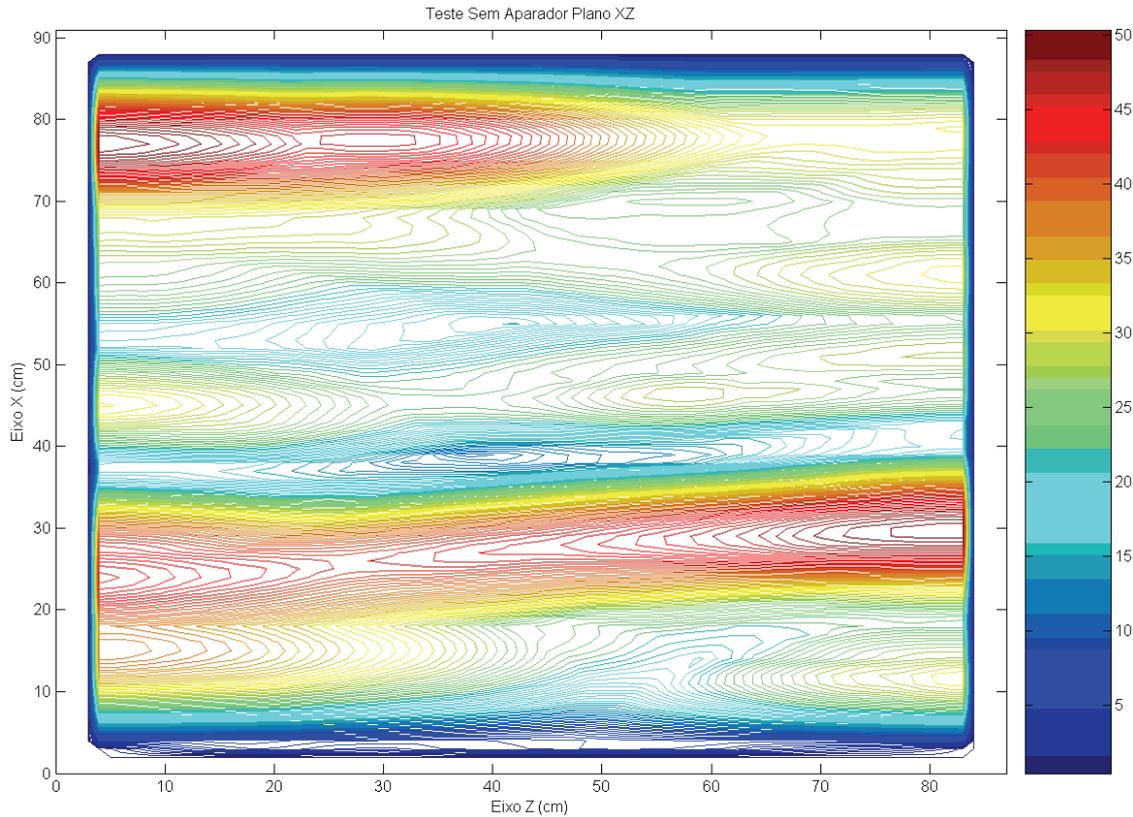


Figura 28 - Campo elétrico (XZ) no interior da CR sem agitador e sem refletor (V/m).

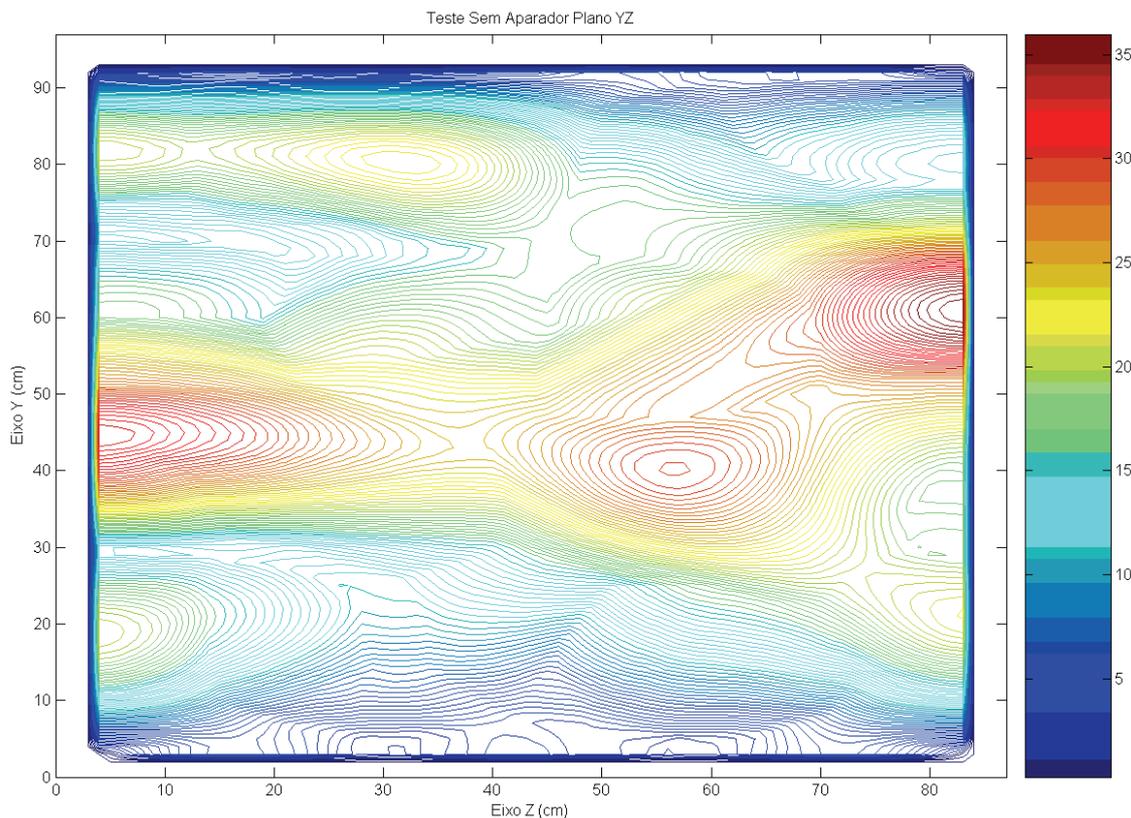


Figura 29 - Campo elétrico (YZ) no interior da CR sem agitador e sem refletor (V/m).

Analisando a Figura 27, pode-se notar que há uma forte tendência à formação de modos estacionários no interior da CR. Observando as Figura 27 a Figura 29 pode-se constatar uma variação de 50 V/m na intensidade do campo elétrico. Essa variação implica em diminuição de uniformidade no campo e o que se busca em uma CR é um elevado grau de uniformidade do campo.

No caso simulado não foram consideradas as perdas do material, dessa forma, observou-se claramente a característica de amplificação da intensidade de campo elétrico da CR. Esse aumento da intensidade de campo simulada ocorre pela contínua alimentação da CR pela antena transmissora, que é excitada com uma tensão senoidal de 1 V. Na prática o coeficiente de perdas é baixo (mas existe) e por essa razão o campo no interior da CR não cresce indefinidamente, o que seria fisicamente impossível.

Ainda observando as Figura 27 a Figura 29, pode-se verificar que não existem regiões em que ocorra pouca variação do campo. Essas regiões em que o campo varia pouco são propícias a se tornarem ZCU, pois nelas há uma maior probabilidade de se conseguir alcançar a uniformidade de campo desejada. Deseja-se nesta dissertação encontrar a geometria do agitador de modos que maximize as dimensões da ZCU.

5.1.1.2. Com Elemento Espalhador Metálico

No segundo cenário simulado (Figura 30) foi inserido um elemento espalhador metálico (refletor) de dimensão aproximadamente igual à da antena. A intenção de sua inserção foi aumentar a aleatoriedade do campo elétrico e impedir que ocorra incidência direta de radiação nos pontos de teste. Os resultados da simulação para cada um dos planos podem ser observados nas Figura 31 a Figura 33.

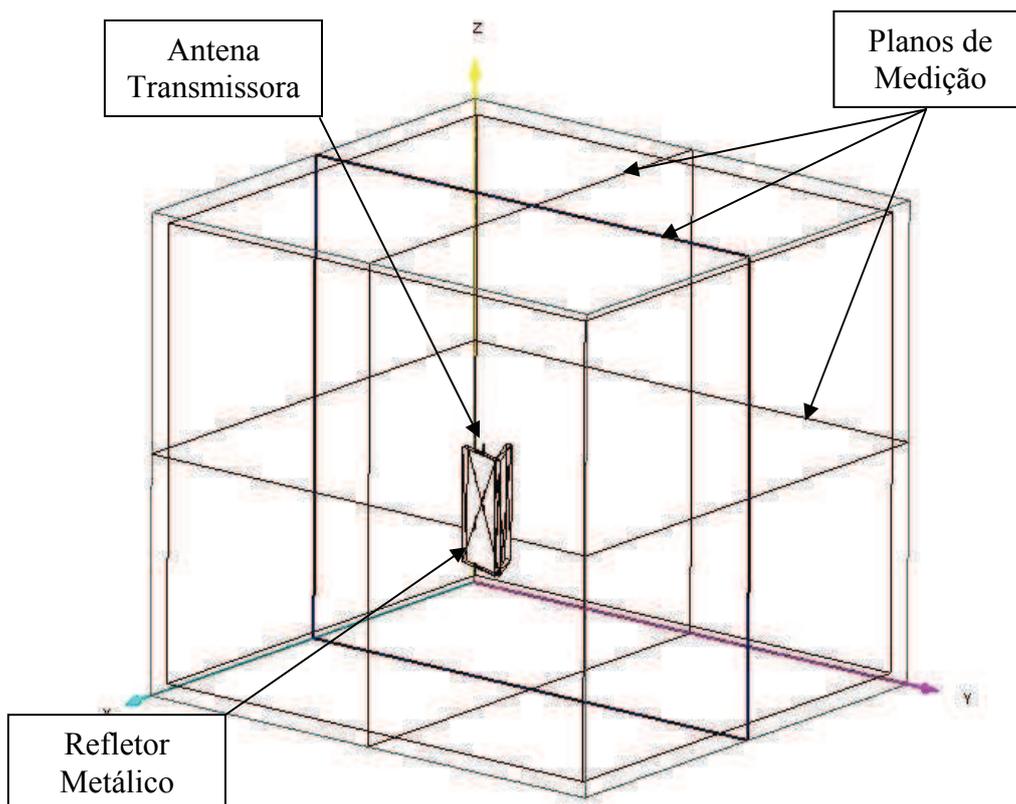


Figura 30 - Cenário simulado, sem agitador de modos e com refletor.

Após a análise da distribuição do campo, verificou-se qual das ZCU apresentava o maior grau de conformidade com a norma IEC 61000-4-21, ou seja, para qual dos cenários testados o campo apresentou maior uniformidade. Para isso foi calculado o desvio padrão global, tal qual apresentado na equação (38), dos valores máximos da intensidade de campo elétrico, para todas as posições do agitador de modos, em cada uma das 27 posições dos sensores de campo.

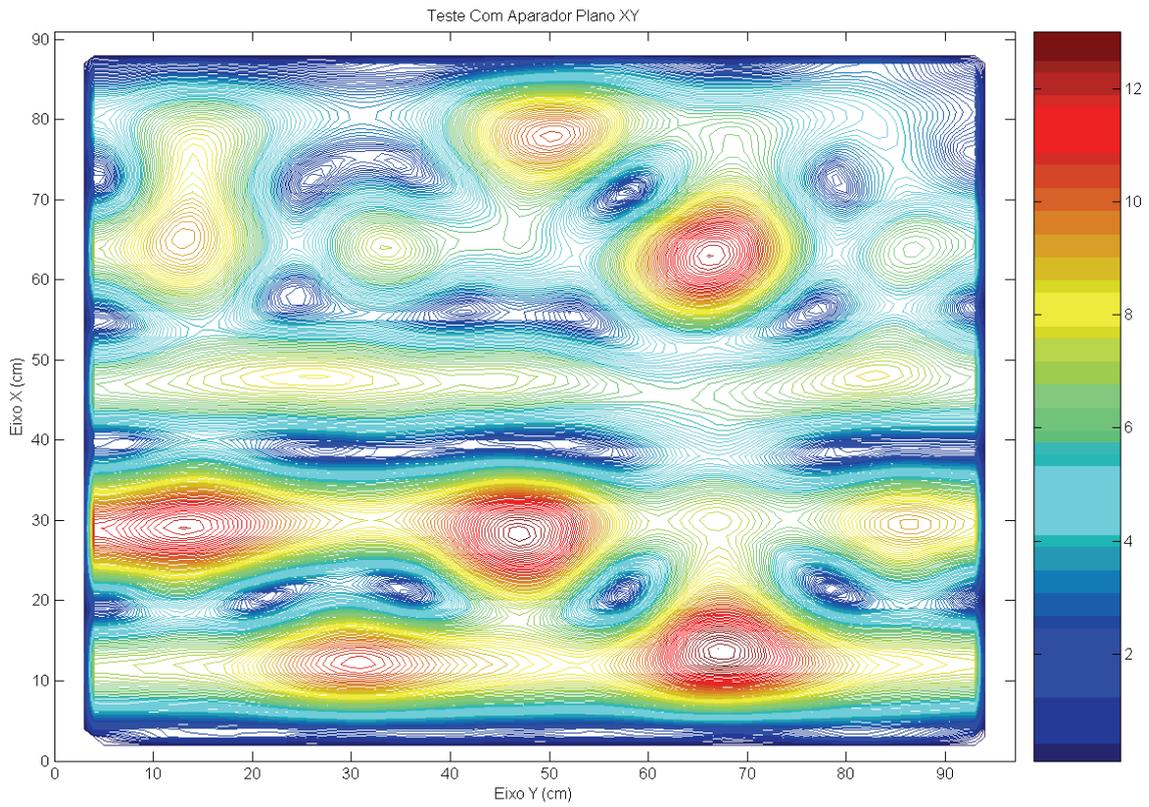


Figura 31 - Campo elétrico (XY) no interior da CR sem agitador e com refletor (V/m).

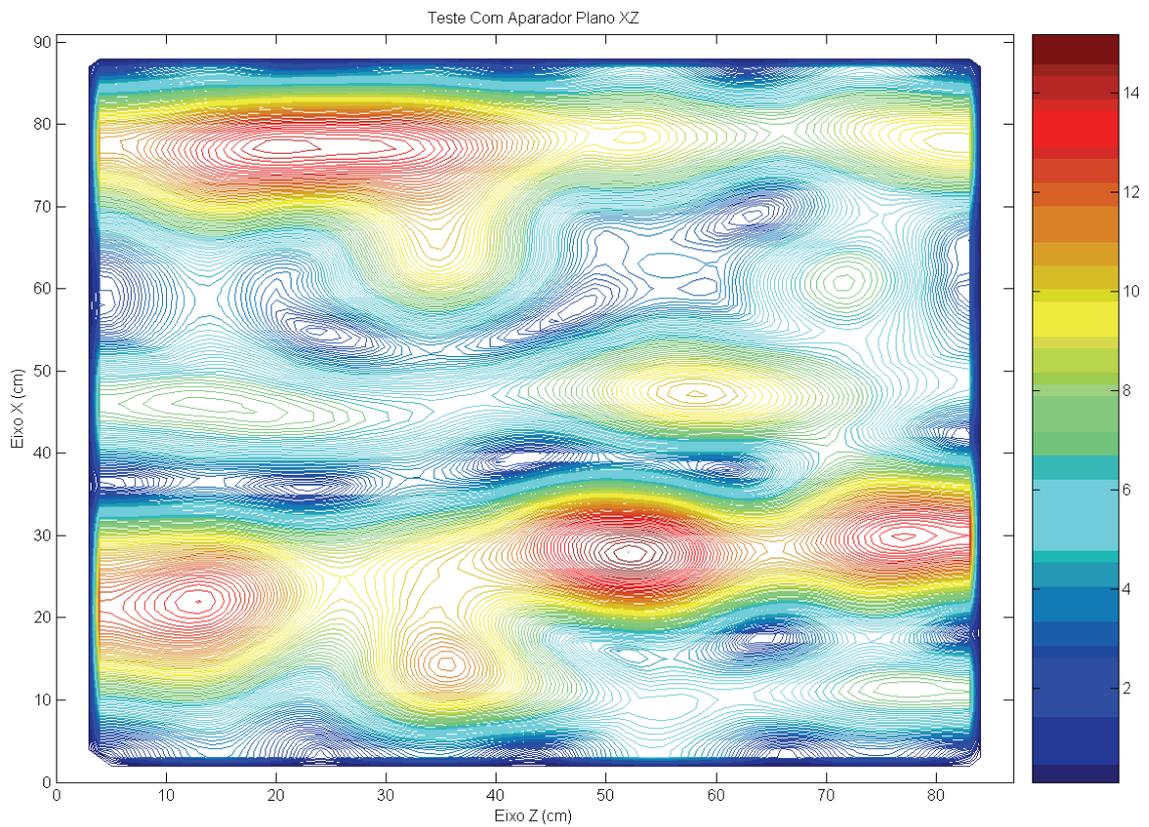


Figura 32 - Campo elétrico (XZ) no interior da CR sem agitador e com refletor (V/m).

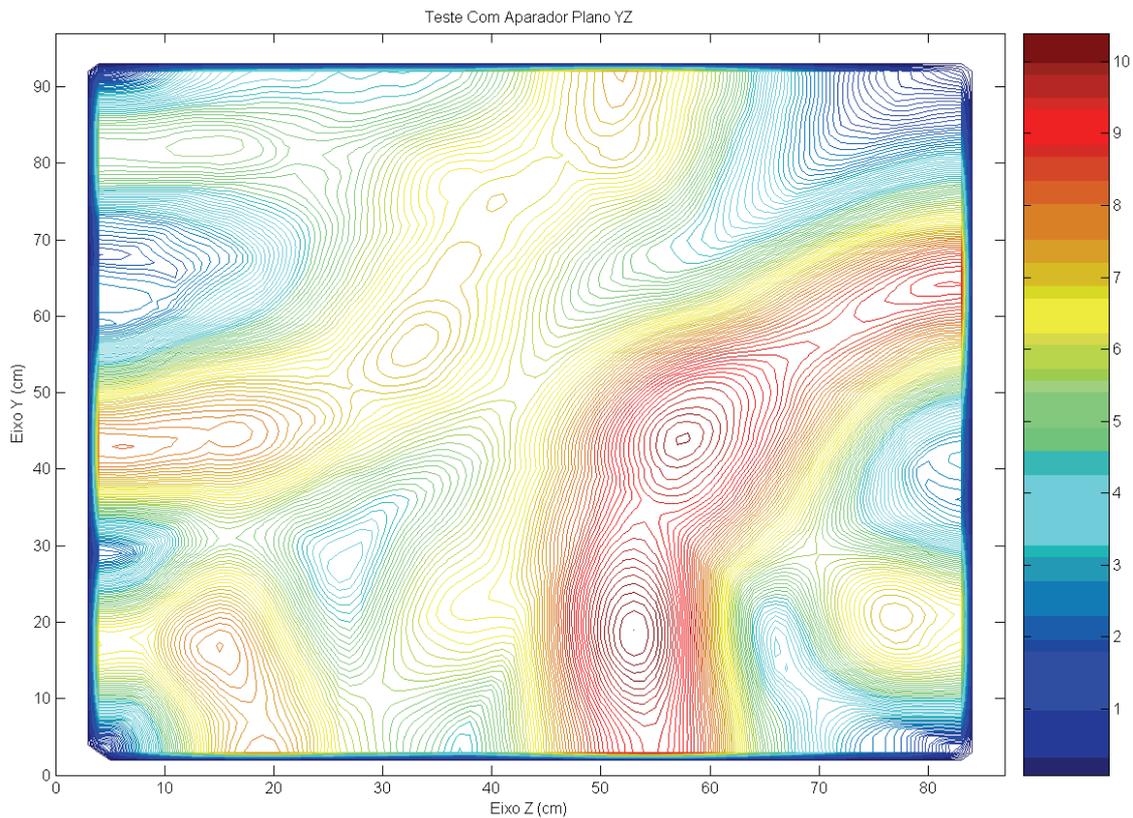


Figura 33 - Campo elétrico (YZ) no interior da CR sem agitador e com refletor (V/m).

Comparando os resultados das Figura 31 a Figura 33 com aqueles das Figura 27 a Figura 29, nota-se uma redução na variação do campo elétrico. Nesse caso, a maior variação no campo elétrico foi da ordem de 15 V/m. Tal redução é atribuída à presença do elemento refletor metálico que foi a única variação nas condições de contorno da CR.

Observando as figuras pode-se também verificar várias regiões em que a intensidade de campo elétrico varia de maneira mais suave que no caso sem refletor, sendo essas regiões mais propícias a se tornarem ZCU.

5.1.2. Verificação de conformidade com a Norma IEC 61000-4-21

Seguindo as recomendações da norma IEC 61000-4-21, as duas ZCU simuladas foram definidas em uma região central da CR, respeitando os limites de distância citados no capítulo 4 (Figura 21). Foram assim definidos quatro cenários de medição para cada ZCU simulada, são os casos com e sem elemento refletor, para os agitadores de modos (AGM) AGM1 e AGM2.

Para cada um dos cenários foi realizada uma simulação, considerando o AGM em uma posição fixa. A posição do AGM então foi alterada e uma nova simulação foi

feita, procedimento esse que se repetiu até que todas as posições discretas do agitador de modos tivessem sido simuladas.

De posse dos resultados de simulação de cada posição do AGM, os arquivos gerados foram tratados no Matlab® para obter em cada um dos 27 pontos de medição o valor máximo do campo elétrico para cada posição da rotação discreta do AGM.

Após a obtenção desses valores pôde-se calcular no Matlab® a média dos valores máximos do campo elétrico. Essa média é importante, pois a diferença entre o valor máximo em um dos pontos de medição e o valor médio dos valores máximos simulados será diretamente proporcional à uniformidade do campo.

Na tabela 3 são apresentados os resultados do desvio padrão global para cada um dos cenários simulados, ou seja, os resultados para as duas ZCU na presença (Figura 30 e na ausência (Figura 26) do elemento refletor. Dessa forma, foram realizados ao todo 8 testes de conformidade e verificou-se a eficiência dos AGM na presença e na ausência do elemento refletor.

Valor do Desvio Padrão Global			
Agitador 1	Sem Refletor	ZCU ₁	1.7289 dB
		ZCU ₂	2.7814 dB
	Com Refletor	ZCU ₁	1.5992 dB
		ZCU ₂	1.7273 dB
Agitador 2	Sem Refletor	ZCU ₁	2.1088 dB
		ZCU ₂	2.1709 dB
	Com Refletor	ZCU ₁	2.0832 dB
		ZCU ₂	2.6539 dB

Tabela 3 - Resultados de verificação da conformidade com a norma IEC 61000-4-21.

De acordo com a norma, um valor de desvio padrão de 3dB garante a uniformidade necessária para considerar a CR conforme. É possível constatar pela tabela 3 que todos os resultados simulados estão em conformidade com a norma.

Observando-se o comportamento do desvio padrão para a ZCU₁ na ausência do refletor, nota-se que quando se utilizou o AGM1 o desvio padrão global teve resultado 18,01% menor que o caso em que o AGM2 foi utilizado. Na presença do refletor, o desvio padrão global foi 23,3% menor quando se utilizou o AGM1.

Buscou-se alcançar os menores valores possíveis de desvio padrão que possibilitem a maior ZCU possível. Considerando essas exigências, foram destacados na tabela 3 dois cenários. O volume da ZCU₂ é aproximadamente 772 vezes maior que o da ZCU₁, estando todos os casos analisados em conformidade com a norma, priorizar-se-á o uso da ZCU₂ como volume de teste.

Analisando os resultados da ZCU₂ verificou-se que os menores valores de desvio padrão global foram obtidos para o cenário com o AGM1 **na presença do elemento refletor** (34,91 % menor que o mesmo cenário com o AGM2) e para o cenário com o AGM2 **agitador 2 na ausência do elemento refletor** (21,95 % menor que o mesmo cenário com o AGM1).

Como citado no decorrer da dissertação, uma CR é um ambiente eletromagneticamente caótico. Dessa maneira, existem diversos fatores que podem ter levado aos resultados obtidos na simulação. Para tentar isolar a contribuição dos agitadores de modos e do elemento refletor, em cada cenário simulado fez-se apenas uma alteração por vez na geometria do sistema.

Apesar das tentativas de isolar as contribuições de cada elemento, outras interações entre geometrias ocorrem alterando o nível de eficiência do conjunto (AGM, refletor) na redução do desvio padrão global.

Pode-se considerar que a geometria do AGM1 combinada à do refletor metálico, resultou uma alteração das condições de contorno que otimizou a uniformidade do campo nas ZCU testadas.

A interação entre as geometrias do AGM2 e o refletor metálico não resultaram em uma otimização do sistema. Para o AGM2 os menores valores de desvio padrão global (quanto menor esse valor mais eficiente a otimização do sistema) foram obtidos na ausência do refletor (tabela 3).

Comparando os resultados obtidos para os dois AGM na ausência do refletor (verificando somente a contribuição dos AGM), observa-se que o AGM2 alcançou um grau maior de uniformidade de campo do que o AGM1. Pode-se dizer que a geometria do **AGM2 é mais eficiente que a do AGM1**, ou seja, aquele alterou as condições de contorno no interior da CR de maneira mais sensível que este.

O elemento refletor pode ser considerado um perturbador estático de campo, um outro nome que se dá a um elemento desses é sintonizador de modos (tópico 2.2.3). Elementos sintonizadores são bastante utilizados em CR de modos sintonizados, contudo não é comum a sua utilização em CR de modos agitados (caso da CR utilizada).

A combinação das duas técnicas pode melhorar a uniformidade do campo, aumentando o volume útil no interior da CR, conseqüentemente permitindo uma redução nas dimensões físicas da mesma. Dessa forma pode-se testar dispositivos com frequências mais baixas que aquelas possíveis quando da utilização de uma única técnica.

Como os resultados obtidos para o desvio padrão global estão abaixo do limiar de uniformidade imposto pela norma, pode-se tentar aumentar as dimensões da ZCU₂ para tornar a relação de volume (V_{CR} / V_{ZCU}) mais próxima da unidade. Um aumento nas dimensões da ZCU é uma diminuição na distância entre os pontos de medição e as paredes metálicas, por exemplo, a ZCU₁ tem seus pontos de vértice distantes de $\lambda_{800 \text{ MHz}}$ enquanto os da ZCU₂ estão a $\lambda_{800 \text{ MHz}}/2$ de qualquer elemento metálico.

5.1.3. Análise da Distribuição de Campo

Para melhor compreensão do comportamento do campo, nos dois cenários que apresentaram o maior nível de otimização do sistema em relação ao valor do desvio padrão global (**AGM1 na presença do elemento refletor e AGM2 na ausência do elemento refletor**), foram realizadas simulações utilizando os planos de medição apresentados na Figura 26. Com o comportamento do campo nos planos de medição é possível verificar onde no interior da ZCU ocorreram os valores máximos e mínimos do campo elétrico.

A análise do comportamento do campo elétrico é importante por que quanto maior for a variação do campo no interior da ZCU, maior será a diferença entre o valor máximo do campo e a média dos valores máximos do campo. Segundo a equação 37, quanto maior essa diferença, maior será o valor do desvio padrão global e conseqüentemente menor será o grau de uniformidade da CR.

5.1.3.1. Agitador 1 com Elemento Refletor

Considerando o cenário de testes da Figura 34 (**AGM1 na presença do elemento refletor**), foi simulado, para cada posição do AGM, o comportamento do campo elétrico nos planos de medição anteriormente citados. Dos resultados obtidos foram selecionados os valores máximos de campo elétrico para cada uma das posições dos AGM em cada um dos planos de medição.

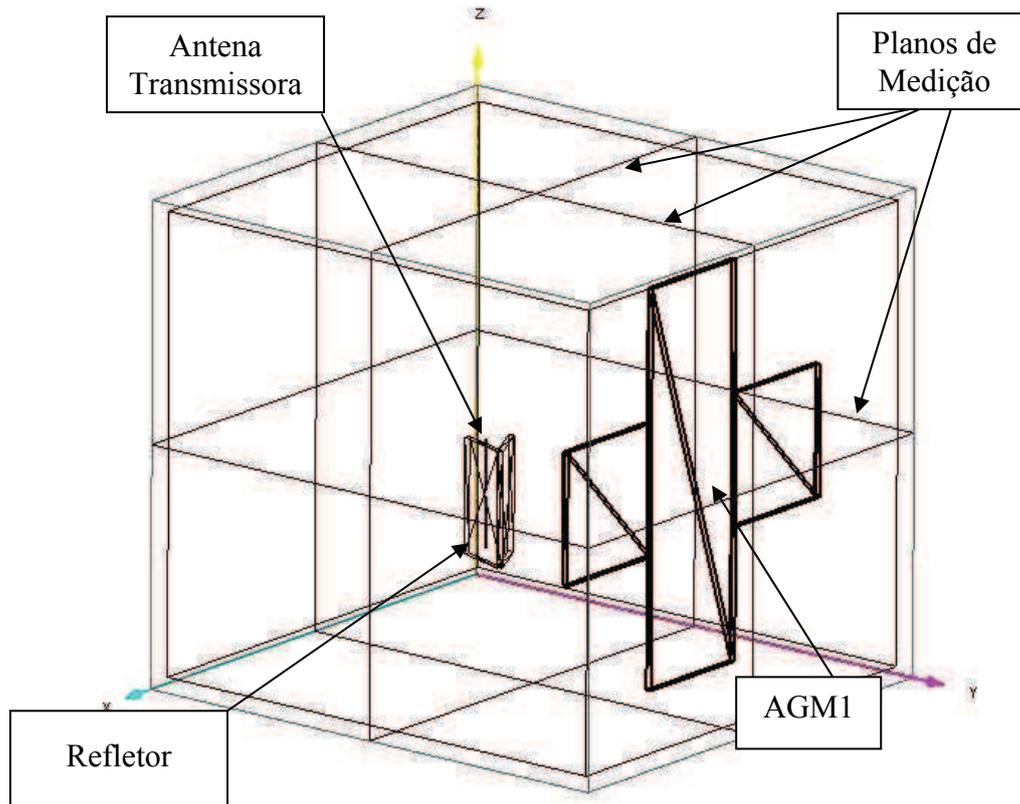


Figura 34 – Cenário simulado, AGM1 posição 1 com refletor.

Nas Figura 35 a Figura 37 pode-se observar a média dos valores máximos de campo elétrico em uma rotação do AGM1 na presença do elemento refletor, em cada um dos planos definidos.

Quando se compara os resultados das Figura 35 a Figura 37 com aqueles apresentados nas Figura 31 a Figura 33, ou seja, isolando a contribuição do AGM, é possível verificar que houve uma redução na variação da intensidade de campo (na presença do elemento AGM). A máxima variação de intensidade de campo obtida durante a rotação do AGM foi de aproximadamente 3 V/m.

Pode-se ainda observar que há diversas regiões no interior do volume da CR em que o campo elétrico pouco varia. Na região da ZCU₂ (retângulo pontilhado em destaque nas Figura 35 a Figura 37) o campo elétrico apresentou variação máxima inferior a 1,5 V/m. Analisando os gráficos, nota-se que a variação da intensidade de campo no interior da ZCU poderia ser reduzida deslocando para a mesma, para a direita na Figura 38, ou reduzindo o seu tamanho para evitar a presença de qualquer pico de intensidade de campo em seu interior.

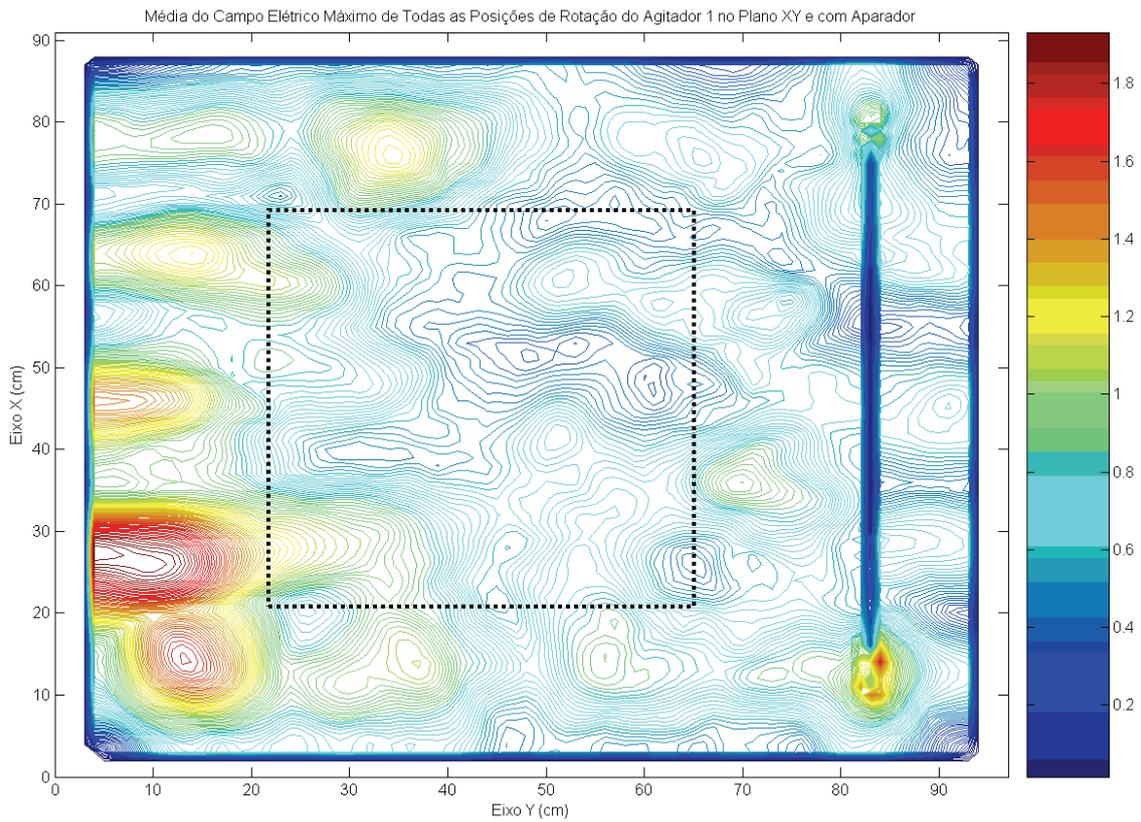


Figura 35 - Média do campo elétrico máximo (XY) em uma rotação do agitador de modos 1 na presença do elemento refletor (V/m).

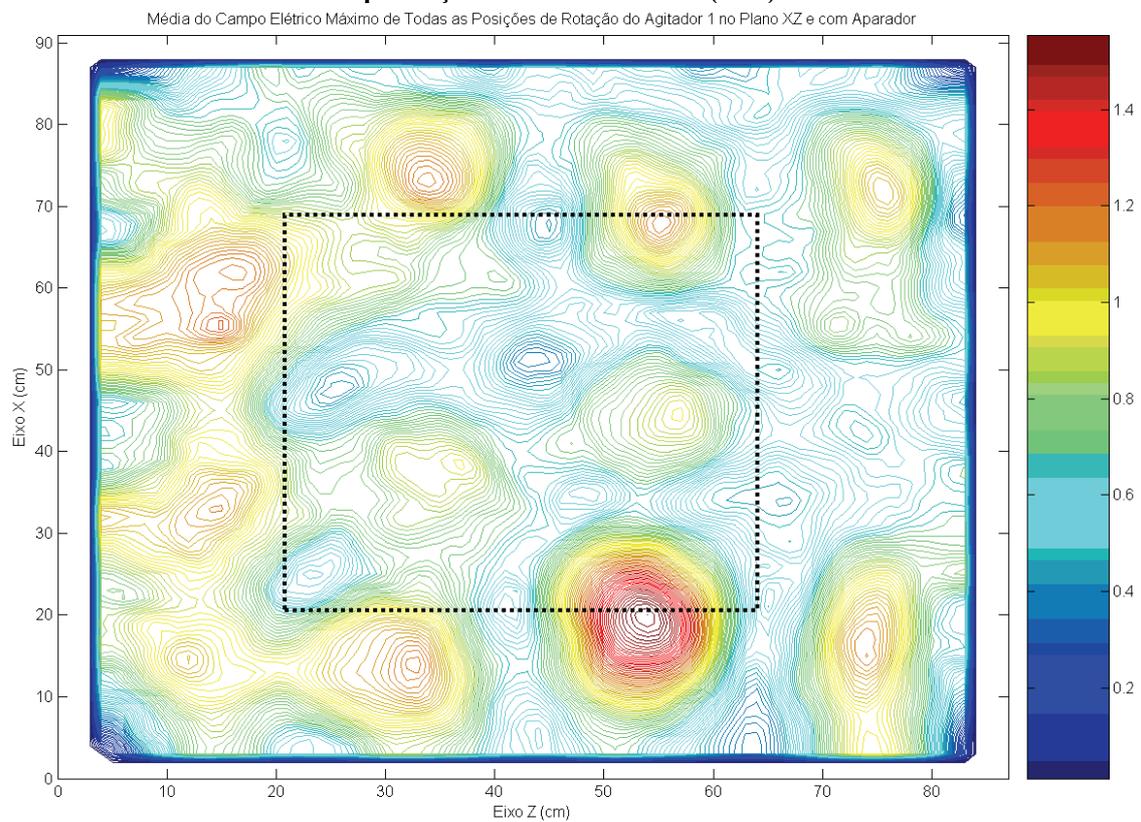


Figura 36 - Média do campo elétrico máximo (XZ) em uma rotação do agitador de modos 1 na presença do elemento refletor (V/m).

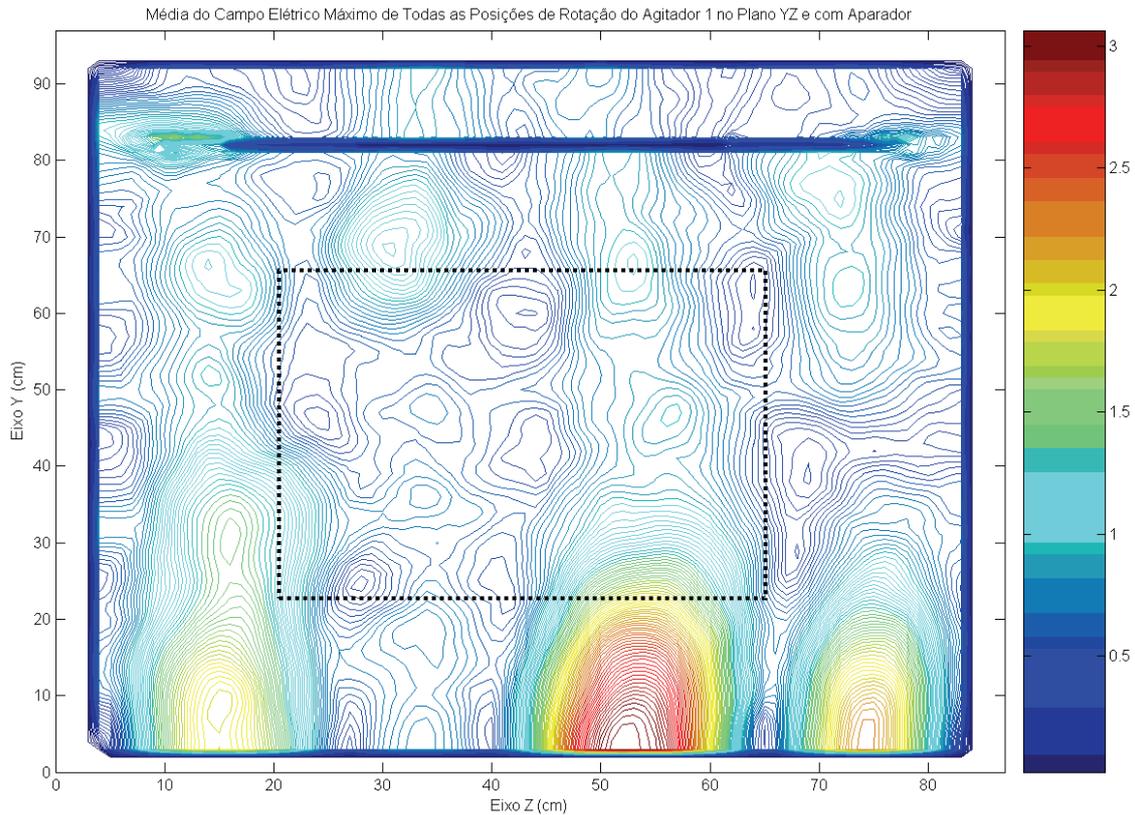


Figura 37 - Média do campo elétrico máximo (YZ) em uma rotação do agitador de modos 1 na presença do elemento refletor (V/m).

5.1.3.2. Agitador 2 sem Elemento Refletor

A Figura 38 ilustra o segundo cenário testado (**AGM2 na ausência do elemento refletor**), o procedimento de simulação é análogo àquele apresentado anteriormente. Os resultados dos planos de medição podem ser observados nas Figura 39 a Figura 41.

Comparando os resultados das Figura 39 a Figura 41 com aqueles apresentados nas Figura 27 a Figura 29, ou seja, isolando a contribuição do AGM, é possível verificar que houve uma redução na variação da intensidade de campo (na presença do elemento AGM). A máxima variação de intensidade de campo obtida durante a rotação do AGM foi de aproximadamente 22 V/m. Na região da ZCU₂ (em destaque nas Figura 39 a Figura 41) a intensidade de campo elétrico apresentou variação máxima inferior a 18 V/m.

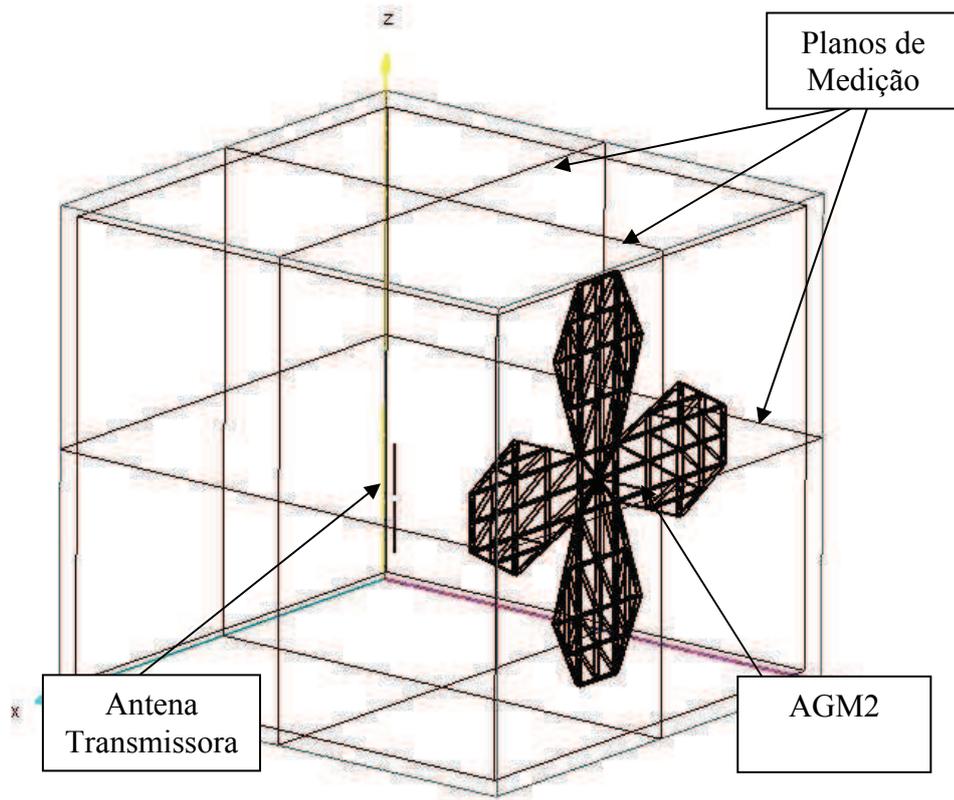


Figura 38 - Agitador de modos 2 na posição 1.

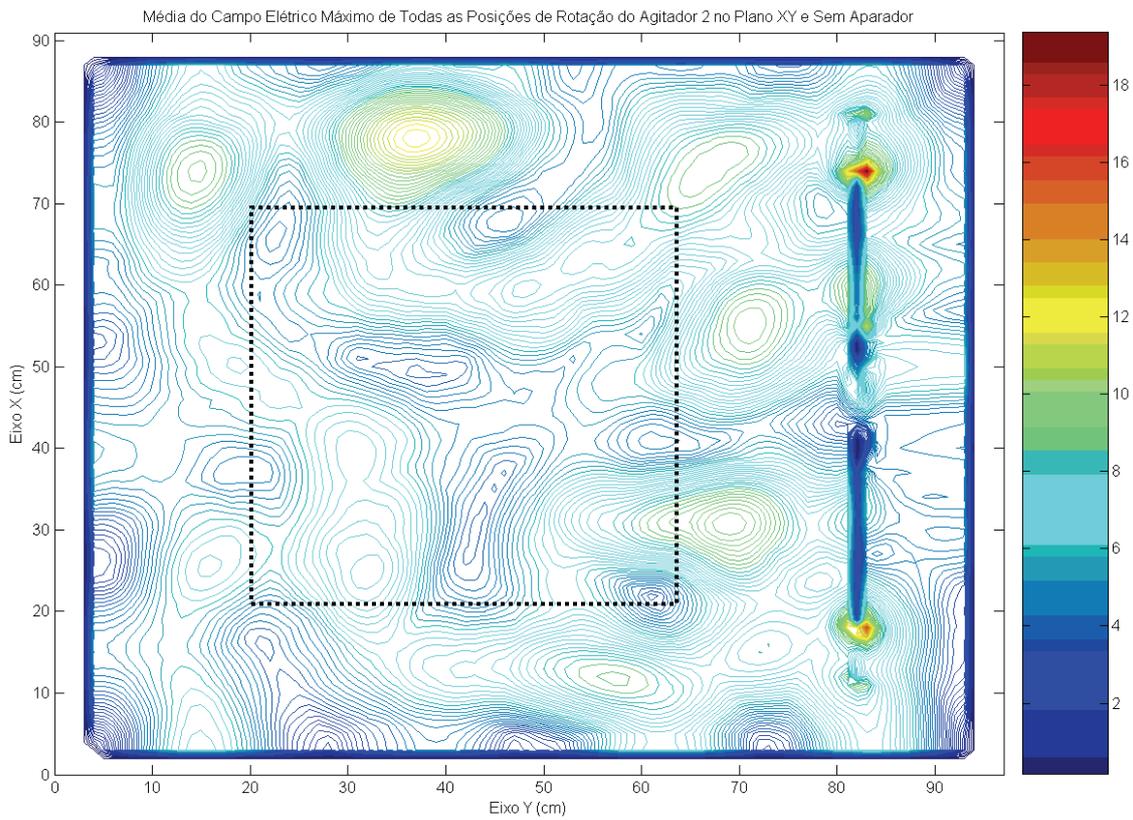


Figura 39 - Média do campo elétrico máximo (XY) em uma rotação do agitador de modos 2 na ausência do elemento refletor (V/m).

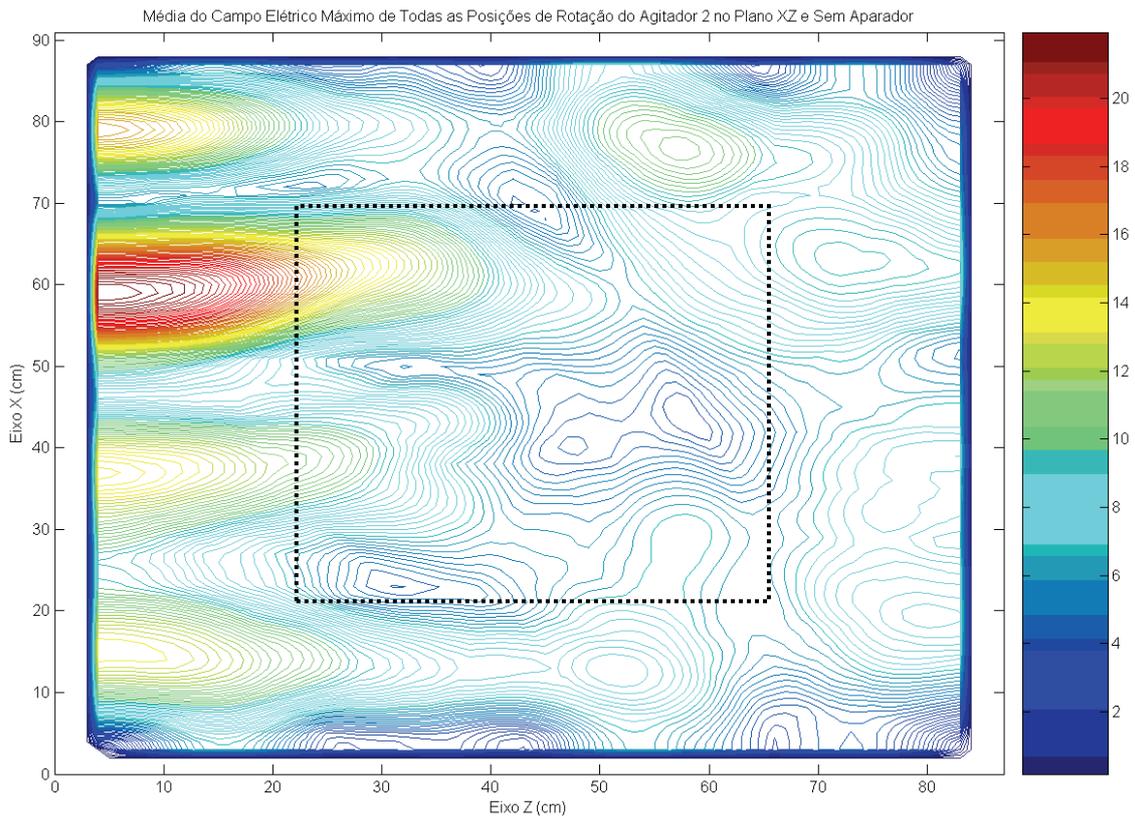


Figura 40 - Média do campo elétrico máximo (XZ) em uma rotação do agitador de modos 2 na ausência do elemento refletor (V/m).

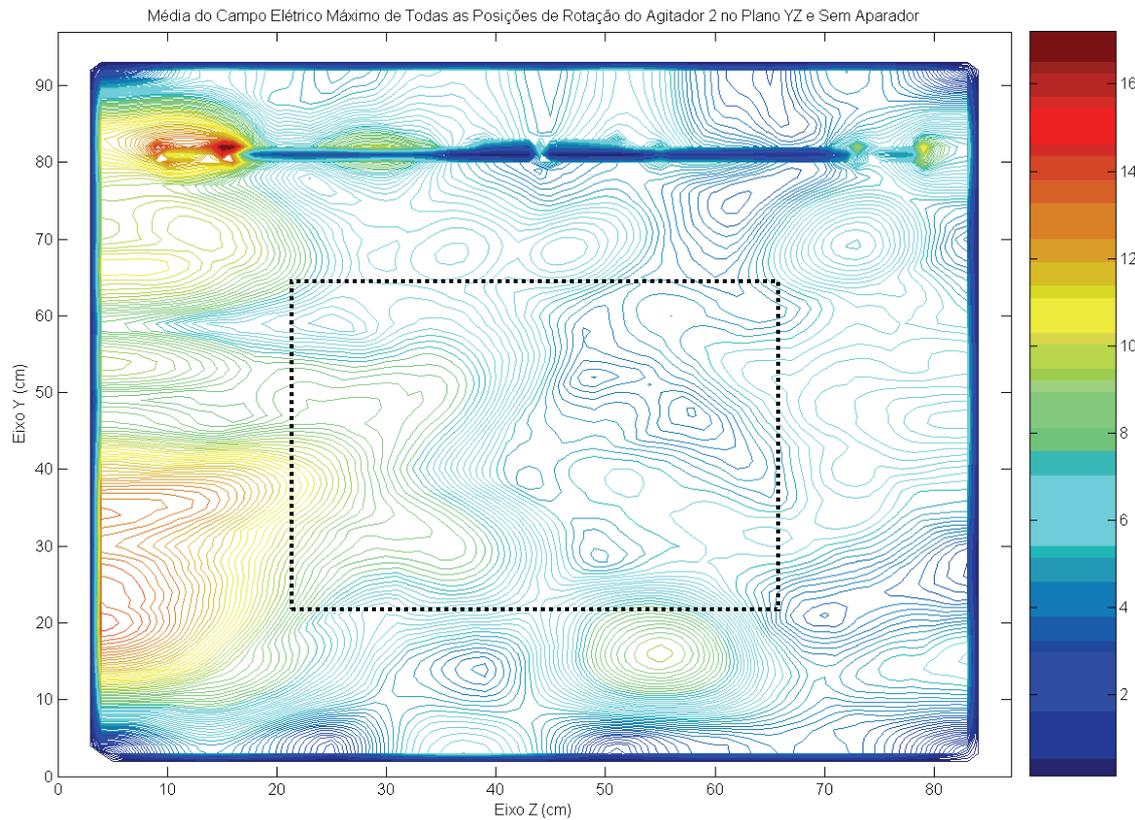


Figura 41 - Média do campo elétrico máximo (YZ) em uma rotação do agitador de modos 2 na ausência do elemento refletor (V/m).

Capítulo 6

Construção e Validação da Câmara de Reverberação

A etapa inicial da construção da Câmara de Reverberação (CR) foi efetuada na oficina de mecânica localizada no bloco CI da UFCG. A oficina possui os equipamentos necessários, à construção da câmara.

6.1. Construção da Câmara de Reverberação

O processo de construção da CR é detalhado nesta seção, tal tarefa foi realizada seguindo os passos de projeto descritos no capítulo 3.

6.1.1. Cavidade Retangular de Ressonância

Foi feita a aquisição do material (listado no anexo 2) para construir a CR. As paredes da mesma foram feitas utilizando três chapas de alumínio número 18 cada uma medindo $2 \times 1 \text{ m}^2$. Esse tipo de chapa foi escolhido devido ao fato de a sua rigidez mecânica ser suficiente para sustentar a câmara sem que a mesma sofresse deformação ou abaulamento.

6.1.2. Sistema Motor

A maior dificuldade encontrada foi escolher um motor que se adequasse às necessidades de construção. O primeiro motor adquirido foi um motor de passo, contudo, seu eixo muito fino impossibilitava a fixação do agitador de modos, desta maneira, esse elemento foi descartado.

O motor utilizado foi o de um ventilador, ou seja um motor de indução, com potência 55 W. Esse motor possuía dimensões compatíveis às necessidades de construção. Contudo não possuía controle de velocidade.

A solução encontrada foi a utilização de um Dimmer, utilizado para o controle da intensidade luminosa de lâmpadas incandescentes, este é um circuito de fácil aquisição no mercado e permitia a conexão do motor diretamente na rede elétrica de 220 V. O circuito possibilita a variação da velocidade do motor de zero rpm até a sua velocidade máxima (aproximadamente 150 rpm quando com carga).

Sendo o rotor do motor de indução magneticamente acoplado às suas bobinas, as interferências conduzidas da rede não penetram no interior da câmara, desta maneira as interferências geradas pelo controlador de velocidade não são perceptíveis no interior da CR. A blindagem da CR também impede que interferências externas por emissões irradiadas possam penetrar no seu interior.

6.1.3. Agitadores de Modos

Finalizada esta etapa, passou-se à construção dos agitadores de modos. Um fator importante na sua construção é a rigidez do material a ser utilizado. Para suprir esta necessidade, uma chapa de alumínio número 16 medindo $2 \times 1 \text{ m}^2$ foi adquirida. Essa chapa tem uma rigidez mecânica superior à chapa número 18 e assim sendo pesa mais. A placa foi cortada no formato dos agitadores.

6.1.4. Montagem

Neste ponto, a CR estava praticamente terminada, faltando apenas alguns detalhes para sua finalização. Para evitar descargas nas junções das paredes da câmara, espalhamento e fuga de campo EM, foram colocadas nestas junções telas metálicas preenchendo quaisquer espaços vazios que por ventura houvesse nas arestas da CR.

A conexão com os cabos de alimentação do EST e da antena irradiadora com o meio externo foi feita por meio de fendas circulares em uma das paredes da CR. Para evitar que parafusos desnecessários fossem colocados no interior da câmara, estes conectores foram fixados na parede por meio um sistema de roscas.

Um fato importante na construção da CR é a quase inexistência de quaisquer elementos que possam distorcer o campo (como parafusos, rebites, etc) no interior da câmara. Os únicos parafusos presentes no interior da mesma são de fixação do motor à parede estando, contudo, localizados atrás do agitador de modos.

Ao final desta etapa, a câmara foi fechada com parafusos e levada ao LEMA, para a realização dos testes de uniformidade de campo. Para facilitar a abertura e fechamento da CR, foram utilizadas presilhas ao invés de parafusos na sua parede superior.

Para fazer a comunicação entre o interior da CR e o seu exterior, foram usados dois conectores tipo N fêmea, conectados a um cabo RG 213 de impedância

característica $50 \Omega/m$. O conector pode ser observado na Figura 42a. Na outra ponta do cabo foi utilizado um conector Tipo N macho o qual pode ser observado na Figura 42b.

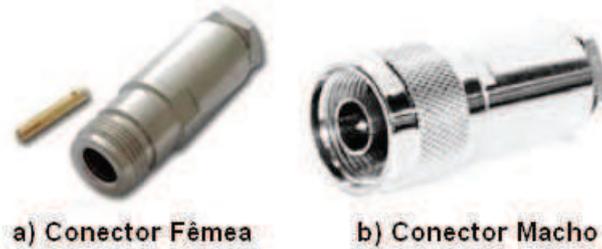


Figura 42 - Conectores tipo N.

Na Figura 43 apresenta-se o modelo adotado na construção da antena dipolo utilizada, o cabo utilizado foi o RG 213 de impedância característica igual a 50Ω , o conector utilizado no cabo da antena foi um conector Tipo N macho o qual pode ser observado na Figura 42b. No interior da CR as antenas necessitavam ser posicionadas, sendo a antena dipolo, usada como transmissora, fixa e a antena dipolo curvado, usada como receptora, variável.

Foi necessário construir um suporte eletromagneticamente transparente para a antena receptora. Esse suporte foi feito de maneira tal que não afetasse a medição, ou seja, o suporte não deveria alterar o campo medido e deveria permitir o deslocamento da antena sensor para os diversos pontos de medição de calibração. O suporte foi construído utilizando canos de PVC, em sua extremidade fixada a antena receptora.

O suporte da antena receptora foi fixado no chão da CR utilizando abraçadeiras de nylon que também são eletricamente transparentes e encontram-se fora da região ZCU. A necessidade de fixar o suporte no chão da CR vem do fato de o cabo RG-213 apresentar alta rigidez mecânica, o que dificulta a movimentação da antena sensor no interior da CR.

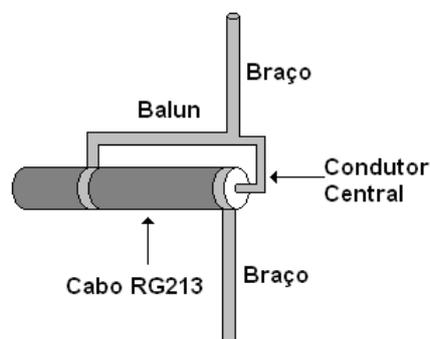


Figura 43– Modelo da Antena Dipolo de Meia Onda usada como transmissora.

Na Figura 44 são apresentadas algumas fotos da CR finalizada. Nessa Figura podem-se também observar os cabos utilizados para a medição e o equipamento utilizado para fazer a transmissão e aferição da intensidade do campo no interior da CR.

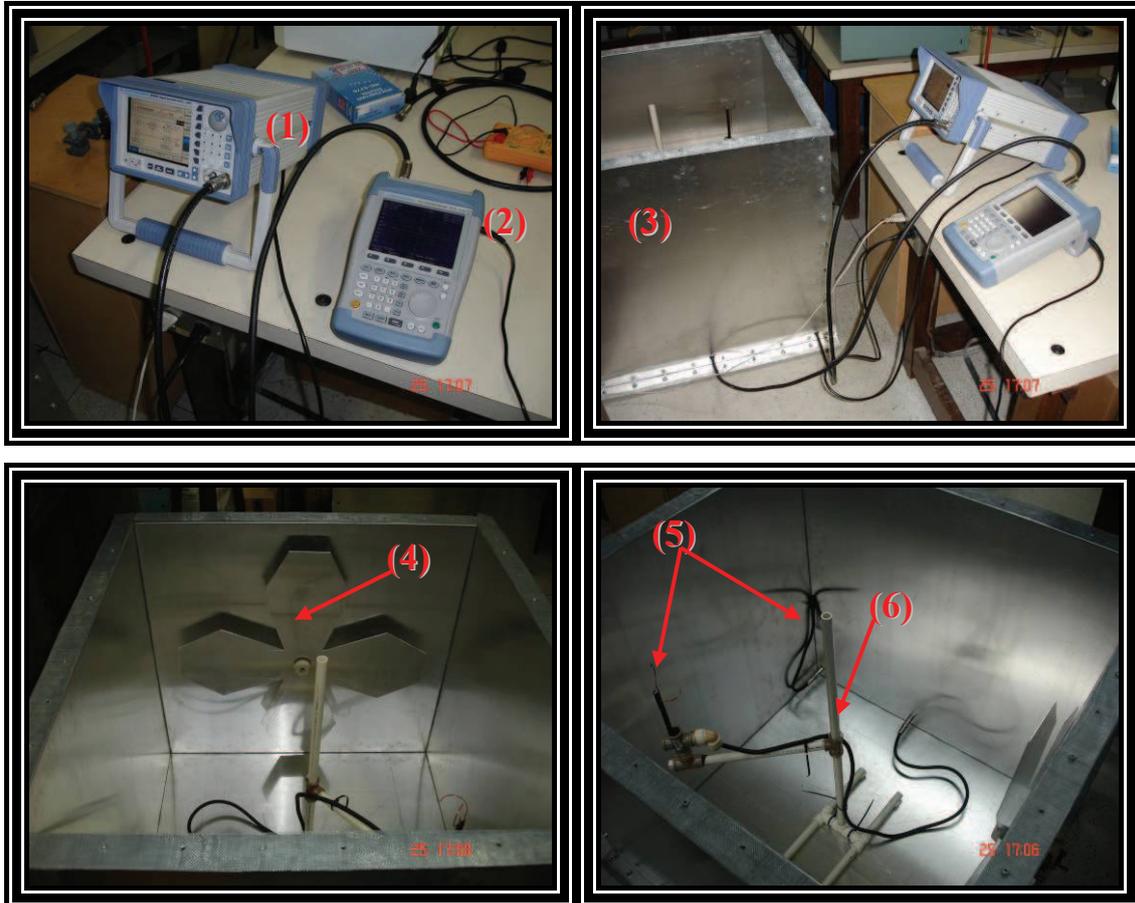


Figura 44 – Ambiente de Medição: (1) Gerador Sinais, (2) Analisador de Espectro, (3) Câmara de Reverberação, (4) Agitador de modos, (5) Antenas e (6) Suporte de PVC.

6.2. Validação Experimental

Utilizando a câmara de reverberação (CR), cuja descrição da construção foi apresentada no capítulo 5, foram realizados os testes sugeridos pela norma IEC 61000-4-21 para verificar se a CR construída está ou não em conformidade com a norma. Para efeito de validação, foi tomado o cenário descrito na seção 5.1.3.2. ; os resultados foram então comparados com aqueles obtidos durante a simulação.

6.2.1. Procedimento Experimental

Para verificar se a câmara está calibrada de acordo com a norma IEC 61000-4-21, seguiu-se o seguinte procedimento:

1. Montagem dos elementos de medição (antenas transmissora e receptora, suportes, agitador de modos, etc.) no interior da CR;
2. Posicionou-se o sensor de campo (antena receptora) em cada uma das 8 posições (P1-P8), apresentadas na Figura 20, previamente calculadas, considerando que o sensor deve estar posicionado a uma distância mínima igual a $\lambda/2$ de qualquer parede metálica.
3. Configurou-se o gerador vetorial de sinais (Rhode & Schwarz SM300) para a frequência de 800 MHz e nível de sinal de 5 dBm.
4. Mediu-se então o valor de máximo do campo elétrico durante um minuto, com o AGM em rotação, utilizando o analisador de espectro (Rhode & Schwarz FSH3).
5. Repetiu-se o procedimento até que todos os pontos fossem medidos.

Para realizar tal medição, alimentou-se a antena transmissora utilizando o gerador vetorial de sinais (sinal senoidal) na frequência escolhida. Alguns parâmetros do procedimento de medição devem ser lembrados. O primeiro deles é o fato de a norma utilizar o parâmetro intensidade de campo elétrico em V/m, a medição da potência ao invés de intensidade de campo pode levar à perda dos dados medidos, no caso de não se possuir os dados de calibração da antena utilizada.

Por limitações físicas, a distância dos pontos inferiores da ZCU em relação ao chão da CR foi maior que $\lambda/2$, dessa forma, a ZCU prática tem volume inferior à simulada. Os pontos de vértice inferiores da ZCU (P3, P4, P7 e P8) estão localizados a 31 cm do chão da CR, quando no modelo simulado tais pontos encontram-se a 19 cm.

Outro detalhe de medição relaciona-se com o fato de que a norma utiliza o valor máximo do campo elétrico na posição em questão durante um ciclo de rotação do AGM. Durante a medição ativou-se a função *Max hold* do analisador de espectro, pois quando essa função está ativa, ocorre uma comparação entre o valor do sinal medido nos tempos atual e anterior, nessa comparação ocorre a sobreposição do menor valor medido, então é armazenado sempre o valor máximo.

6.2.2. Resultados de Medições

Seguindo o procedimento descrito na seção anterior, foram realizadas as medições do valor máximo do campo elétrico nos pontos de vértice da ZCU. Os resultados de tais medições podem ser visualizados na Tabela 4.

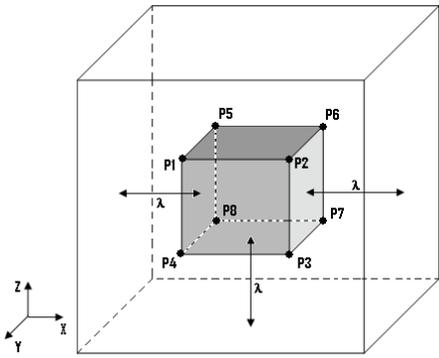
Posição dos pontos na CR	Ponto Medido	E_{MAX} (mV/m)
	P1	49,5
	P2	60,3
	P3	49,5
	P4	45,7
	P5	61,7
	P6	81,3
	P7	39,8
	P8	40,7

Tabela 4 – Valores de campo elétrico medidos.

Foram utilizados os valores da tabela 4 para calcular os parâmetros das equações 37 e 38, (aqui repetidas nas equações 39 e 40). Encontrou-se dessa maneira um valor de desvio padrão global $\sigma_{(dB)} = 1,87 \text{ dB}$ que está abaixo do limite de 3 dB imposto pela norma. Pode-se dessa maneira comparar esse resultado com o resultado da simulação do mesmo cenário para efeito de validação experimental dos dados simulados.

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_1^N (x - \bar{x})^2} \quad (39)$$

$$\sigma_{(dB)} = 20 \log \left(\frac{\sigma + \langle |E^{MAX}| \rangle}{\langle |E^{MAX}| \rangle} \right) \quad (40)$$

Observando a tabela 3, pode-se verificar que o valor do desvio padrão global para o cenário simulado (**AGM2 na ausência do elemento refletor**) foi de $\sigma_{(dB)} = 2,17 \text{ dB}$. Comparando os resultados, verificou-se uma diferença de 13,8% entre os dois valores.

Considerando que foram feitas considerações limitantes no modelo simulado (e.g. desconsiderar os cabos), essa diferença é justificável. O fato de a presença dos cabos no interior da cavidade aumentar a aleatoriedade do campo e conseqüentemente a sua uniformidade justifica a diferença encontrada, uma vez que a uniformidade medida foi superior à simulada. Verificou-se assim que a configuração do experimento é válida por levar a CR aos limites de conformidade exigidos pela norma.

Capítulo 7

Conclusões

O desenvolvimento de um ambiente de testes de baixo custo e dimensões reduzidas realizado no decorrer deste trabalho pode tornar mais acessível a realização dos testes de susceptibilidade eletromagnética e eficiência de blindagem. O uso deste ambiente para a realização de testes prévios pode reduzir o tempo necessário à realização de testes em laboratórios certificados, o que reduziria o preço e o tempo de desenvolvimento de produtos.

A utilização do método FDTD permitiu que diversas estruturas de geometria complexa fossem simuladas. Contribuições futuras podem ser realizadas com a simples inserção de qualquer estrutura desenvolvida em CAD no interior da câmara de reverberação, sem a necessidade de nenhuma análise matemática preliminar.

De acordo com os resultados de simulação apresentados no capítulo 6, foi possível verificar, observando a tabela 3, que todos os testes apresentaram resultados condizentes com as exigências da norma IEC 61000-4-21. Contudo, alguns cenários simulados apresentaram maior eficiência de uniformização de campo que outros.

Pela análise dos resultados da simulação da câmara, conclui-se de que o agitador de modos (AGM) 2 uniformiza o campo de maneira mais eficiente que o AGM1 (desvio padrão para o AGM2 foi 21,94% menor em comparação ao AGM1). Como previsto no projeto dos AGM, a redução do raio central do AGM1 (Figura 7), pode ter reduzido a quantidade de ondas estacionárias. Contudo, em ambos os casos, o desvio padrão manteve-se inferior ao limite de 3dB imposto pela norma.

Propõe-se uma alteração à norma IEC 61000-4-21, uma vez que esta prevê medições somente nos pontos de vértice da ZCU, contudo esse número limitado de pontos de medição pode acarretar erros pela possibilidade de mascarar valores de pico que ocorram no interior da ZCU e não sejam medidos nos pontos de vértice. Sugere-se um aumento nesse número de pontos de medição de tal forma que sejam tomadas amostras no interior da ZCU bem como em suas faces como ilustrado na Figura 21.

Um estágio da consolidação da câmara construída como ambiente de testes é a realização de seus testes de calibração em um laboratório certificado. Atestada a conformidade da CR com a norma, esta poderá ser utilizada como ambiente de testes certificado permitindo que equipamentos testados em seu interior recebam um atestado

de conformidade, o que dispensaria a necessidade da realização de testes em laboratórios certificados na homologação de um produto junto à ANATEL.

Estando a câmara construída e calibrada, uma das propostas de trabalhos futuros é a realização de testes clássicos de susceptibilidade eletromagnética e de eficiência de blindagem. Podem ainda ser realizados outros experimentos, como testes de comportamento e desempenho de antenas, testes em placas de circuito impresso (linhas de microfita e linhas de fenda) e testes em dispositivos e equipamentos eletrônicos.

Outra proposta de trabalhos futuros, no tocante ao projeto da câmara, é a realização de simulação na qual o AGM não possua simetria rotacional, este tipo de AGM altera de maneira mais significativa as condições de contorno. Espera-se que dessa forma conseguir uma maior uniformidade de campo. Realizadas as simulações para definir a geometria ótima do AGM, propõe-se a construção e testes do mesmo.

Referências Bibliográficas

- [1] G. Fontgalland, “Notas de aula de Compatibilidade Eletromagnética - UFCG”, disponível em www.dee.ufcg.edu.br/~fontgalland, consultada em 5 de março de 2006.
- [2] V. Vellano, "Brazilian Regulation Regarding Electromagnetic Compatibility", Fundação CPqD, Campinas -SP, Brasil.
- [3] W. V. Junior, G. L. A. Bittar, A. Raizer, “*Electromagnetic Compatibility For Electrical And Electronic Systems In Brazil*”, International Symposium On Electromagnetic Compatibility - ISEMC 2005, Petrópolis, 2005
- [4] S. Girard, F. Diouf, F. Paladian, “*Electric Field – Power Relationship in Mode Stirred Reverberation Chamber*”, EMC Europe, Barcelona, 2006.
- [5] L. Bai, L. Wang, B. Wang, J. Song, “*Reverberation Chamber Modeling Using FDTD*”, *IEEE EMC Symposium*, 7–11, Seattle, 1999.
- [6] W. Sheng, L. H. Been, “*An Efficient Modelling Method for Analysis of Shielding Rooms*”, 17th International Zurich Symposium on EMC, Singapore, 2006.
- [7] D. Kwon, R. J. Burkholder, P. H. Pathak, “*Ray Analysis of Electromagnetic Field Build-up and Quality Factor of Electrically Large Shielded Enclosures*”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, Vol. – 40, No 1, 1998.
- [8] D. Weinzierl, et al., “*The Transmission Line Modelling Method (TML) Applied to the Simulation of TEM Cells and Shielded Enclosures*”, *Journal of Microwaves and Optical Electronics*, Vol. 5, No. 1, 2006.
- [9] K. Karlsson, J. Carlsson, U. Carlberg U, P. S. Kildal, “*A Method of Moments Solution of a 2D Reverberation Chamber Using G1DMULT and Asymptotic Extraction*”, *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, Vol. 2, pp 1323- 1326, 2004.
- [10] C. F. Bunting, K. J. Moeller, C. J. Reed, S. A. Scarce, “*Finite Element Analysis of Reverberation Chambers: A Two-Dimensional Study at Cutoff*”, *Electromagnetic Compatibility*, 1998. 1998 IEEE International Symposium on Volume 1, 24-28,. 1998.
- [11] Y Huang, JT Zhang, P Liu, “*A Novel Method to Examine the Effectiveness of a Stirrer*”, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC 2005, Chicago, 2005.
- [12] F. Hoëppe, P. Gineste, B. Demoulin, “*Numerical Modelling for Mode-Stirred Reverberation Chambers*”, *Proceedings of the 2001 Zürich EMC Symposium*, Zürich, 2001.
- [13] S.-P. Yu, A. F. Bunting, “*Statistical Investigation of Frequency-Stirred Reverberation Chambers*”, *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, vol.1, pp. 155- 159, Istanbul, 2003.
- [14] A. K. Mitra, T. F. Trost, “*Statistical Simulations and Measurements Inside a Microwave Reverberation Chamber*”, *IEEE 1997 International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Bejiin, 1997.
- [15] L. R. Arnaut, “*Effect of Local Stir and Spatioal Averaging on Measurement and Testing in Mode-Tuned and Mode-Stirred Reverberation Chambers*”, *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 43, pp. 305 -325, 2001.
- [16] M. Piette, K. Moesen, S. Montezuma, “*Experimental Field Statistics Validation in a Cubic Reverberation Chamber with Mechanical Mode Stirring & Bistatic Illumination*”, *Progress In Electromagnetics Research Symposium 2005*, 22-26 1, Hangzhou, 2005.

- [17] L. Bai, L. Wang, B. Wang, and J. Song, “*Effects of paddle configurations on the uniformity of the reverberation chamber*” in Proc. IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, pp. 12–16, Seattle, 1999.
- [18] K. Harima and Y. Yamanaka, “*FDTD analysis on the effect of stirrers in a reverberation chamber*” in Proc. Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, IEICE, pp. 223–229, Tokyo, 1999.
- [19] Y. Yamanaka, S. Ishigami, and K. Harima, “*Recent Progress of Studies on EMC Relating to Various Equipment*”, Journal of the Communications Research Laboratory Vol.48, No.4, 2001.
- [20] M. Höijer, et al, “*Numerical Simulations as a Tool for optimizing the Geometrical Design of Reverberation Chambers*”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Washington, 2000.
- [21] R. P. Picanço, “*Desenvolvimento de uma Interface Integrada para o Projeto e Análise de Antenas Utilizando o Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (FDTD)*”, Dissertação, UnB, Brasil, 2006.
- [22] E. F. Silva, K. C. Santos, A. Ghiotto, G. Fontgalland and T. P. Vuong, “*Compact Electromagnetic Reverberation Chamber Design And Construction*”, 12th IEEE International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics [ANTEM] and the Canadian Radio Sciences Conference, Montréal, 2006.
- [23] H. Garbe, “*New EMC Test Facilities for Radiation Measurement*”, University of Hanover, Hanover, Germany;
- [24] E. J. Borgstrom, “*A Comparison of Methods and Results Using the Semi-Anechoic and Reverberation Chamber Radiated RF Susceptibility Test Procedures in RTCNDO-IGOD, Change One*” - IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Santa Clara, 2004.
- [25] Y. J. Wang, W. J. Koh, Y. K. Tai, C. K. Lee, K. Y. See, “*Evaluating Field Uniformity of a Mini-Reverberation Chamber with Two Mechanical Stirrers*”, IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp 795-798, Minneapolis, 2002.
- [26] R. E. Collin, “*Foundations for Microwave Engineering*”, 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1992.
- [27] R. Schmitt, “*Electromagnetics explained : a handbook for wireless/RF, EMC, and high-speed electronics*”, 1st ed. Boston: Newnes, 2002.
- [28] D. Zhang and J. Song, “*Impact of stirrer’s position on the properties of a reverberation chamber with two stirrers*” in IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, vol. 1, pp. 7–10, Washington, 2000.
- [29] T. V. Chan, H.C. Reader, “*Understanding Microwave Heating Cavities*”, Boston: Artech House, 2000.
- [30] P. Corona, G. Ferrara, M. Migiliaccio, “*Reverberating Chambers as Sources of Stochastic Electromagnetic Fields*”, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, vol. 38, N 03, 1996.
- [31] P. Corona, J. Ladbury, and G. Latmiral, “*Reverberation-chamber research-then and now: a review of early work and comparison with current understanding*” IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility, vol. 44, no. 1, pp. 87–94, 2002.
- [32] D.A. Hill, “*Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers*”, IEEE Trans. Electromagnetic Compatibility. Vol 40 209-217, 1998.
- [33] C. A. Balanis, “*Antenna theory: Analysis and Design*”, 2nd ed. New York: John Wiley & Sons, 1997.

- [34] C. Burns, “*Three-Dimensional Simulation And Experimental Verification Of A Reverberation Chamber*”, PhD Thesis, Swiss Federal Institute Of Technology Zurich, 2005.
- [35] A. Abarello, D. H. Pastro, “Simulação e Análise da Uniformidade do Campo Eletromagnético no Interior de uma Câmara Reverberante”, Trabalho de Conclusão de Curso, UFPR, Curitiba, 2005.
- [36] E. S. Pires, G. Fontgalland, M. A. B. de Melo, R. M. Valle, G. F. Aragão, T. P. Vuong, A. Ghiotto, “*Proposal of a New Compact Quasi-Isotropic Radiator*”, 12th IEEE International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics [ANTEM] and the Canadian Radio Sciences Conference, Montréal, 2006.
- [37] L. Ferraz, “Dimmer com TRIAC” disponível em www.feiradeciencias.com.br/sala03/03_09.asp, consultada em 05 de março de 2006.
- [38] K. C. Gupta, R. Gard, and I. J. Ball, “*Microstrip Lines and SlotLines*”, Artech House, 1979.
- [39] C. B. de Lima, “Análise de dispositivos eletromagnéticos para hipertermia usando o método FDTD”, Tese, UFSC, Brasil, 2006.
- [40] F. Petit, “*Modélisation et simulation d'une chambre réverbérante à brassage des modes à l'aide de la méthode des différences finies dans le domaine temporel*”, Thèse, Université de Marne La Vallée, France, 2002.

Apêndice 1:

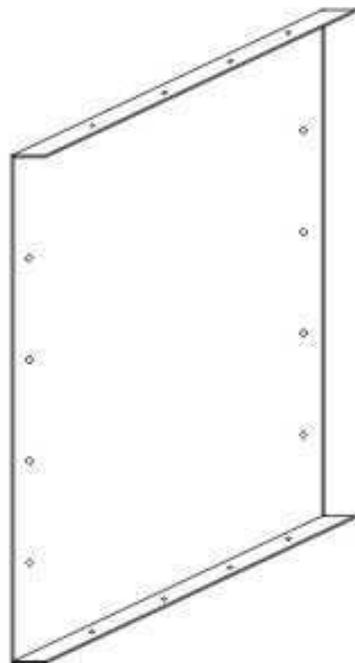
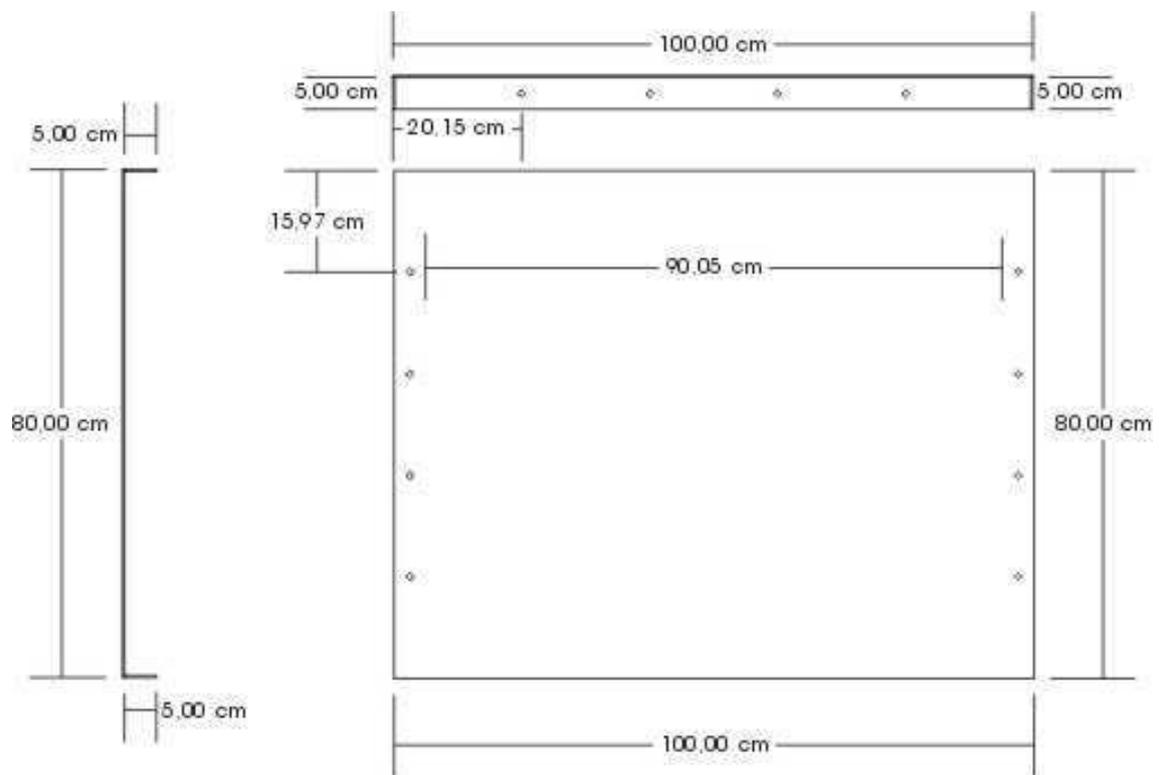


Figura A 1 – Paredes no eixo Z.

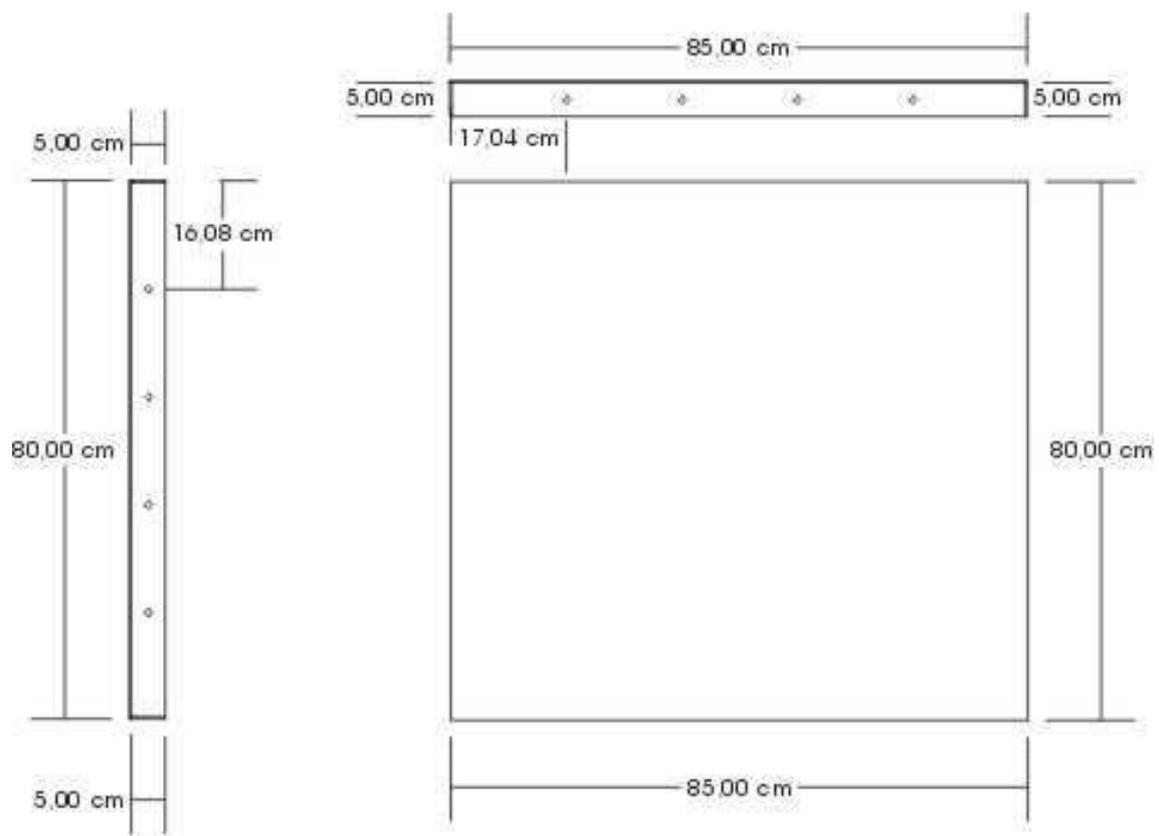


Figura A 2 – Paredes do eixo Y.

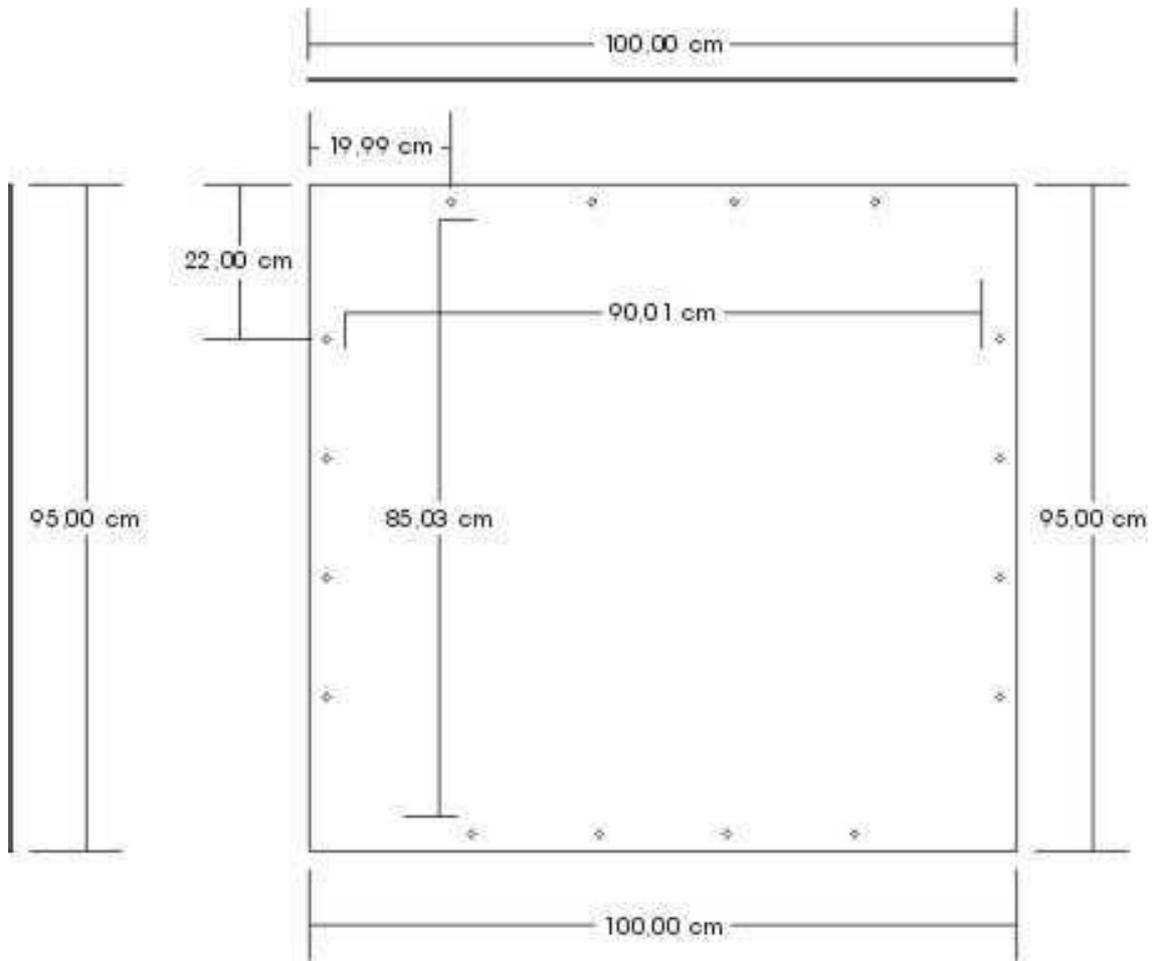


Figura A 3 – Paredes do eixo X.

Apêndice 2

Material Utilizado na Construção da CR	Quantidade
Chapa de Alumínio Número 18 (2x1 m)	3
Chapa de Alumínio Número 16 (2x1 m)	1
Parafusos (Diâmetro 4,5 mm)	100
Roscas	200
Porcas	100
Motor de Indução AC de 55 W	1
Dimmer	1
Conector Tipo N macho Para cabo RG 213	6
Conectores Fêmeas do tipo N com base quadrada para cabo RG 213	2
Cabo RG213	4 m
Presilhas	8

Apêndice 3

Programa para cálculo e geração dos gráficos para os planos de medição:

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Programa para ler os dados dos arquivos .dat gerados pelo %%
%%simulador e gerar os gráficos dos planos de medição %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Endereço dos arquivos
matlab = 'C:\MATLAB7\work\';
agitador = 'Novos_Dados\Teste_Refletor1.dir\Field At Plane ';
posicao_agitador= ['2'; '3'; '4'];
inicio_nome_arquivo = '_';
arquivo_int = 1:1:199;
arquivo = num2str(arquivo_int);
final_nome_arquivo = '.dat';
a=zeros(89,95);
b=zeros(95,95,3);

%Escrevendo uma matriz para cada arquivo.
for j=1:1:3

%Escrevendo uma matriz com todos os dados.
for i=1:5:44

destino = [matlab agitador posicao_agitador(j,1)...
           inicio_nome_arquivo arquivo(1,i) final_nome_arquivo];
a = dlmread(destino, ' ',5,0);

%Teste de Seleção e escrita de valores máximos até o string 9 do
arquivo;
h=size(a);
for l=1:1:h(1,1)
for m=1:1:h(1,2)
if b(l,m,j) < a(l,m)
b(l,m,j) = a(l,m);
end
end
end
end
for i=45:5:493
destino = [matlab agitador posicao_agitador(j,1)...
           inicio_nome_arquivo arquivo(1,i:i+1) final_nome_arquivo];
a = dlmread(destino, ' ',5,0);

%Teste de Seleção e escrita de valores máximos do string 10
até o string 99 do arquivo;
h=size(a);
for l=1:1:h(1,1)
for m=1:1:h(1,2)
if b(l,m,j) < a(l,m)
b(l,m,j) = a(l,m);
end
end
end
end
end

for i=494:5:max(size(arquivo))
destino = [matlab agitador posicao_agitador(j,1)...
           inicio_nome_arquivo arquivo(1,i:i+2) final_nome_arquivo];
a = dlmread(destino, ' ',5,0);
```

Planos de medição (continuação):

```
%Teste de Seleção e escrita de valores máximos do string 100
%até o string 199 do arquivo;
    h=size(a);
    for l=1:1:h(1,1)
        for m=1:1:h(1,2)
            if b(1,m,j)< a(1,m)
                b(1,m,j) = a(1,m);
            end
        end
    end
end

end

plano_XY = b(:, :, 1);
plano_XZ = b(:, :, 2);
plano_YZ = b(:, :, 3);

%%Geração de Gráficos
figure(1)
csXY = contour(plano_XY, 100); %clabel(csXY);
colorbar; title('Teste Com Refletor Plano XY')
figure(2)
csXZ = contour(plano_XZ, 100); %clabel(csXZ);
colorbar; title('Teste Com Refletor Plano XZ')
figure(3)
csYZ = contour(plano_YZ, 100); %clabel(csYZ);
colorbar; title('Teste Com Refletor Plano YZ')
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

Programa para cálculo do desvio padrão global :

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%Programa para ler os dados dos arquivos .dat gerados pelo %%
%% simulador e calcular o desvio padrão global %%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%Dados de entrada
numero_posicoes_total = 32;
numero_posicoes = 4;

%Passo de tempo a final da análise;
numero_pontos_final = 30000;

%Passo de tempo a partir do qual será iniciada a análise;
numero_pontos_inicial = 10000;

%Número total de passos de tempo a serem analisados;
numero_pontos = numero_pontos_final - numero_pontos_inicial;
%Definição de Matriz;
Posicoes_Pontos = zeros(numero_pontos+1,numero_posicoes_total);

%Endereço dos arquivos
matlab =
'C:\MATLAB7\work\Mestrado_Erik\Tamanho_ZCU\Agitador_2\Sem_Refletor';
agitador = '\Agitador_';
tipo_agitador = '2_Posicao_';
posicao_agitador= ['1'; '2'; '3'; '4'];
inicio_nome_arquivo = '.dir\ZCU_1_';
```

Programa para cálculo do desvio padrão global (continuação):

```
arquivo = ['01'; '02'; '03'; '04'; '05'; '06'; '07'; '08'; '09'; '10'  
; '11'; '12'; '13'; '14'; '15'; '16'; '17'; '18'; '19'; '20'; '21';  
'22'; '23'; '24'; '25'; '26'; '27'];  
final_nome_arquivo = '_Field.dat';  
k=1;  
  
%Escrevendo uma matriz com todos os dados.  
for i=1:1:27  
    for j=1:1:4  
        destino = [matlab agitador tipo_agitador  
posicao_agitador(j,1) inicio_nome_arquivo arquivo(i,1:2)  
final_nome_arquivo];  
        Posicoes_Pontos(:,k) = csvread(destino,  
numero_pontos_inicial, 0, [numero_pontos_inicial 0 numero_pontos_final  
0]);  
        k=k+1;  
    end  
end  
  
%Valores máximos do campo elétrico em todos os pontos para todas as  
posições;  
E_Maximo = max(Posicoes_Pontos);  
  
%Valores máximos em uma rotação para cada ponto de medição;  
E_Max_Por_Ponto=[ max(E_Maximo(1,1:4)) max(E_Maximo(1,5:8))  
max(E_Maximo(1,8:12)) max(E_Maximo(1,13:16)) ...  
max(E_Maximo(1,17:20)) max(E_Maximo(1,21:24))  
max(E_Maximo(1,25:28)) max(E_Maximo(1,29:32))  
max(E_Maximo(1,33:36))...  
max(E_Maximo(1,37:40)) max(E_Maximo(1,41:44))  
max(E_Maximo(1,45:48)) max(E_Maximo(1,49:52))  
max(E_Maximo(1,53:56))...  
max(E_Maximo(1,57:60)) max(E_Maximo(1,61:64))  
max(E_Maximo(1,65:68)) max(E_Maximo(1,69:72))  
max(E_Maximo(1,73:76))...  
max(E_Maximo(1,77:80)) max(E_Maximo(1,81:84))  
max(E_Maximo(1,85:88)) max(E_Maximo(1,89:92))  
max(E_Maximo(1,93:96))...  
max(E_Maximo(1,97:100)) max(E_Maximo(1,101:104))  
max(E_Maximo(1,105:108))];  
  
%Cálculo da média dos máximos do campo elétrico  
E_Med_Max = mean(E_Max_Por_Ponto);  
  
%Cálculo do desvio padrão dos valores máximos do campo elétrico  
Desvio_Max_Calc_E = sqrt((1/27)*sum( ( E_Max_Por_Ponto - E_Med_Max  
)^2 ));  
Desvio_Max_Matlab_E = std(E_Max_Por_Ponto);  
  
%Cálculo do Desvio Padrão Global;  
Desvio_Padrao_Global_Calc_E = 20*log10((Desvio_Max_Calc_E +  
E_Med_Max)/(E_Med_Max));  
Desvio_Padrao_Global_Matlab_E = 20*log10((Desvio_Max_Matlab_E +  
E_Med_Max)/(E_Med_Max));  
  
disp('O Valor do Desvio Padrão Global Para a ZCU 2 do Agitador 2  
utilizado é Com Refletor: ');  
disp(Desvio_Padrao_Global_Calc_E);
```