



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA ELÉTRICA
COORDENAÇÃO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PROJETO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

***Estudo da Influência de uma Carga Posicionada
Assimetricamente numa Câmara de Reverberação
Compacta***

Aluno: Stenio Freire Cantalice

Matricula: 20311216

Orientador: Professor Glauco Fontgalland

Campina Grande – PB

Fevereiro - 2009

Agradecimentos

Dedico este trabalho à Deus, à meus pais, à minha família, à minha querida namorada Juliana, à meus grandes amigos Vitor, Claudio, Thiago, Daniel, Cícero, Warner, Euler, Glauber, ao meu primo Rafael. Agradeço principalmente aos meus professores e orientadores Glauco Fontgalland e Marcos Barbosa por todo o empenho e ajuda durante esse trabalho.

Agradeço também ao aluno de doutorado Erik Farias da Silva por toda ajuda e material repassado.

Sumário

Capítulo 1_ Introdução	4
Capítulo 2 Câmaras de Reverberação	5
2.1. <i>Vantagens da Utilização de Câmaras de Reverberação</i>	5
2.2. <i>Funcionamento das Câmaras de Reverberação</i>	6
Capítulo 3 Projeto da Câmara de Reverberação	16
3.1. <i>Projeto da Cavidade Retangular de Ressonância</i>	16
3.2. <i>Projeto das Antenas</i>	18
3.3. <i>Projeto do Agitador de Modos</i>	19
3.4. <i>Projeto do Sistema Motor do Agitador</i>	20
Capítulo 4 Calibração da Câmara e Influência da carga	22
4.1. <i>Medições com a Câmara Vazia</i>	22
4.2. <i>Influência da carga nas medições</i>	23
4.3. <i>Resultados das Simulações</i>	25
Capítulo 5 Conclusões e perspectivas	27
Referências Bibliográficas	28

Capítulo 1

Introdução

A compatibilidade eletromagnética (CEM) tem cada vez mais se tornado uma área essencial para o desenvolvimento de qualquer produto eletro-eletrônico, pois, com o aumento das frequências utilizadas e com a diminuição progressiva do tamanho dos dispositivos, eleva-se o nível de emissões/recepções não intencionais de ondas eletromagnéticas. Assim sendo, aumenta-se a possibilidade de que os elementos de circuito interfiram ou sofram interferência de outros elementos. Desta forma, equipamentos e dispositivos devem ser eletromagneticamente compatíveis, isto significa que estes devem:

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

Um elemento indispensável em testes de CEM é indubitavelmente a Câmara de Reverberação (CR), pois é nela que a susceptibilidade eletromagnética do equipamento será testada. Um equipamento susceptível a interferências não se enquadra nas rígidas normas internacionais (*International Electrotechnical Commission (IEC)*, *International Special Committee on Radio Interference (CISPR)*) e isto impossibilita a sua entrada em países que utilizem tais normas. No Brasil as normas baseiam-se na IEC e têm por sigla NBR.

Uma CR pode ser considerada em primeira análise como uma cavidade ressonante que funciona como um amplificador de RF [1]. Ela é um encapsulamento blindado que normalmente possui agitadores ou sintonizadores de onda em seu interior. A descrição detalhada do funcionamento de uma CR será abordada posteriormente neste relatório.

A câmara utilizada foi em sua totalidade realizada na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) [2] a qual foi utilizada para se realizar um estudo dos efeitos provocados por uma carga (cubo metálico medindo $8 \times 8 \times 8 \text{ cm}^3$) posicionado simétrica e assimetricamente em seu interior.

Neste trabalho serão apresentadas algumas câmaras de reverberação, o projeto da câmara utilizada, em seguida o estudo propriamente dito dos efeitos da posição da carga [18] e finalmente as conclusões e perspectivas.

Capítulo 2

Câmaras de Reverberação

Uma CR pode ser considerada como sendo uma cavidade de ressonância eletricamente grande na qual não se formam ondas estacionárias e em cujo interior existe uma região na qual o campo eletromagnético é uniforme em qualquer polarização.

O campo eletromagnético no interior de uma CR pode ser caracterizado como sendo [8]:

- Estatisticamente isotrópico;
- Aleatoriamente polarizado;
- Homogêneo.

Desta maneira, um Elemento Sob Teste (EST) no interior de uma CR está imerso em um ambiente no qual existe campo eletromagnético incidente em todas as possíveis polarizações, deste modo, se o EST for susceptível a um campo de intensidade e frequência semelhante ao gerado na câmara, esta falha poderá ser observada sem a necessidade de se alterar a polarização do campo incidente neste EST. Isto possibilita um teste mais exato e muito mais veloz, tornando desnecessário o uso de estruturas que alterem a posição do EST.

2.1. Vantagens da Utilização de Câmaras de Reverberação

Existem diversos outros modos de se testar susceptibilidade ou desempenho de emissões irradiadas dentre os quais podem ser citados [9]:

- Local de Teste em Área Aberta;
- Local de Teste em Área Aberta Forrada com Absorvedor;
- Câmara Totalmente Anecóica;
- Câmara Semi-Anecóica Forrada com Absorvedor;
- Câmara Anecóica Modificada;
- Célula Transversa Eletromagnética (TEM);
- Encapsulamento Blindado;
- Sala Parcialmente Forrada por Tela;
- Placas Paralelas;
- Câmara Híbrida.

O uso de CR em testes de CEM, tais como eficiência de blindagem e susceptibilidade a emissões irradiadas, é hoje em dia aceito dado às vastas pesquisas realizadas na área, havendo até mesmo normas que apresentam as medições em CR como alternativa para estes testes (a exemplo das normas IEC 61000-4-21, MIL-STD-1344A, EIA-364-66A, CISPR 16-1, dentre outras [9]). Os testes em CR apresentam duas características que os tornam mais atrativos que os demais, uma delas é o custo de fabricação de uma CR que é muito inferior ao da maioria dos ambientes acima citados, outro é o fato de estes testes serem realizados com maior velocidade nas CR que nos outros ambientes.

Há ainda outro fator vantajoso e característico das CR, o fato de o campo no interior destas ser relativamente mais alto que nos outros ambientes no caso em que se utiliza a mesma potência de entrada [9]. Isto possibilita a utilização de geradores de menor potência que são mais baratos.

2.2. Funcionamento das Câmaras de Reverberação

O princípio de funcionamento das CR baseia-se no de uma cavidade de ressonância retangular. Uma cavidade pode ser considerada como sendo um volume limitado por uma superfície condutora, no interior do qual pode ser excitado um campo eletromagnético [16]. No caso de uma CR, há um agitador ou um sintonizador de modos no interior desta cavidade. O que se deseja com este elemento agitador é tornar as ressonâncias (que ocorrem no interior da cavidade) aleatórias, de tal modo que o campo no interior desta cavidade possa ser considerado uniforme em uma determinada região.

Para a melhor compreensão do funcionamento de uma CR, alguns conceitos devem ser conhecidos, assim, alguns deles serão a seguir sucintamente apresentados.

2.2.1. Equações de Maxwell

O conhecimento das equações de Maxwell é de importância fundamental para um engenheiro electricista que deseje trabalhar com eletromagnetismo, isto porque estas equações descrevem de maneira completa o comportamento do campo elétrico (**E**) e da densidade de fluxo magnético (**B**), que são campos vetoriais relacionados com as coordenadas espaciais x , y , z e com a coordenada tempo t .

É importante introduzir ainda dois vetores auxiliares chamados, densidade de fluxo elétrico

(D) e intensidade de campo magnético (H). Estes são relacionados a E e B através da polarização elétrica e magnética dos meios, considerando este 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 variando no tempo gera um campo elétrico, para o caso em que os campos elétrico e magnético são harmônicos no tempo, a equação pode ser escrita como apresentado em (3).

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

Outra lei importante é a lei de Gauss a qual afirma que o fluxo total de **D** entrando ou saindo de um volume V, é igual à carga líquida contida neste volume. Considerando que ρ é a densidade de carga por metro cúbico, pode-se escrever a equação 4.

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

É importante que se relacione o rotacional e a divergência do campo magnético às suas fontes. A fonte que cria a circulação, ou rotacional, do campo **H** é a corrente. Por corrente toma-se a densidade total de corrente composta pela densidade de corrente de condução ($\mathbf{J}=\sigma\mathbf{E}$), a densidade de corrente de deslocamento ($j\omega\epsilon_0\mathbf{E}$) e a corrente de convecção (aqui desprezada). Desta maneira pode-se obter a terceira equação do conjunto que é apresentada em 5.

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

A última equação de Maxwell pode ser encontrada considerando que a carga magnética como dual da carga elétrica não existe na natureza, isto é, as linhas de fluxo de \mathbf{B} são sempre fechadas, devido ao fato de não haverem cargas nas quais elas terminem. Deste modo, o fluxo líquido de \mathbf{B} através de qualquer superfície fechada é sempre nulo. Assim, pode-se escrever a equação 6.

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

Estas equações (3-6) formam o conjunto básico de 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. Desta maneira, a solução de campos pode ser obtida, partindo diretamente das soluções correspondentes em guias de ondas [16].

Aplicando as equações de Maxwell a uma cavidade retangular de paredes metálicas de acordo com as condições de contorno correspondentes a cada parede, as equações de campo podem ser apresentadas separadamente em modos TE_{mnp} e TM_{mnp} , tal qual ilustrado na figura 1[17].

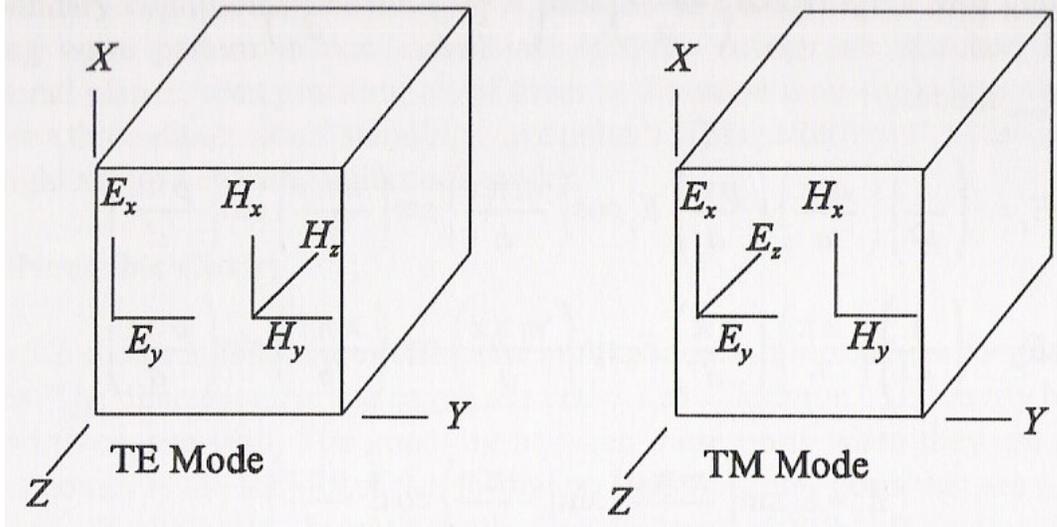


Figura 1 – Componentes de campo dos modos TE e TM em uma CRR. [17]

Os modos TE_{mnp} são dados por:

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

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

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

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

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

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

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

Os modos TM_{mnp} são dados por:

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

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

$$E_z = E_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (3)$$

$$H_x = \left(\frac{j\omega\epsilon_0}{h^2}\right)\left(\frac{n\pi}{b}\right)E_0 \sin\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (4)$$

$$H_y = -\left(\frac{j\omega\epsilon_0}{h^2}\right)\left(\frac{m\pi}{a}\right)E_0 \cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sin\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right) \quad (5)$$

$$H_z = 0 \quad (6)$$

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

Onde “a” é a altura, “b” é o comprimento, “d” é a largura da cavidade, “m” é o modo em x, “n” é o modo em y e “p” é o modo em z.

As frequências de ressonância da cavidade podem ser encontradas através da equação 21 [6]:

$$f_{\text{ressonância}} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (27)$$

Na equação 21, c é a velocidade da luz no vácuo. Quando se trata de CR, a equação 21 fornece a terça parte da menor frequência utilizável. Para o caso em que $a < d < b$, a menor frequência é a encontrada para o modo TE₀₁₁ [16].

Um outro fator muito importante é o número de modos suportados pela CRR, em se tratando de câmaras de reverberação, a CRR deve suportar no mínimo 60 modos na menor frequência utilizável [1]. A equação do número de modos é apresentada em 22 [1].

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

Com as equações acima é possível projetar corretamente uma CRR para que esta possa atuar como uma CR.

2.2.3. Efeitos do Agitador de Modos

Conforme visto anteriormente, uma CR pode ser descrita em termos de uma CRR. Um agitador de modos é uma lâmina metálica que perturba continuamente o campo no interior de uma CRR [17]. Esta perturbação faz com que a ocorrência de ressonâncias aconteça de forma aleatória com o intuito de tornar o campo o mais uniforme possível em uma região conhecida como Zona de Campo Uniforme (ZCU).

Cada modo eletromagnético existente no interior de uma CRR é uma solução para a equação de ondas eletromagnéticas e estas soluções são dadas principalmente pelas condições de contorno. O que o agitador faz é alterar a geometria interna da CRR, alterando assim as suas condições de contorno e isto altera os modos ressonantes característicos da CRR.

Quando se utiliza um agitador de modos móvel, para cada posição deste há condições de contorno diferentes. Deste modo, no caso em que o agitador é continuamente rotacionado, as condições de contorno e consequentemente os modos ressonantes são também continuamente alterados. Isto impede a formação de ondas estacionárias e faz com que o campo seja mais uniforme [8].

O campo que se estabelece em uma CRR sem a presença de um agitador pode ser comparado com um fio elástico ligado a duas paredes opostas. A excitação do campo pode ser comparada a um puxão no meio deste elástico. Quando isto ocorre o elástico vibra criando uma onda estacionária. Supondo que o elástico tem uma de suas pontas presa a um ventilador

(análogo ao agitador), o puxão não poderá estabelecer uma onda estacionária pois uma das extremidades do elástico estará em movimento [17].

Um agitador de modos tem sua eficiência diretamente ligada à sua capacidade de alterar os modos originais da CRR. Assim sendo é importante considerar o tamanho, formato e posição do agitador no interior da câmara. Com relação ao tamanho do agitador, é sabido que quanto maior for a dimensão deste elemento comparado à dimensão da câmara, maior será a uniformidade do campo [7]. O formato do agitador classicamente é escolhido como sendo uma pá metálica ou uma cruz, sendo o formato de cruz mais eficiente que o de pá metálica [10]. Com relação ao posicionamento, o agitador deve ser colocado à pelo ao menos meio comprimento de onda da parede da câmara [11].

2.2.4. Uniformidade de Campo

O parâmetro mais importante no projeto de 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 eletromagnético no interior de uma CR é: uniforme e independente da polarização.

No caso ideal, pode-se considerar que o sinal total medido pela antena receptora (Rx) deve ser totalmente invariante com respeito ao parâmetro desta antena. Isto pode ser explicado assumindo que várias ondas planas, de iguais fontes de probabilidade incidem na antena, deste modo, a potência recebida é dada por [3][15]:

$$w_r = W_i A_{em} = \frac{|E|^2}{2\eta} \frac{\lambda}{4\pi} g(\theta, \phi) \quad (23)$$

Na equação 23, a potência recebida (w_r) é igual à densidade de potência (W_i) multiplicada pela máxima área efetiva da antena receptora (A_{em}). Onde 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.

Devido ao funcionamento da câmara, é mais prudente que o comportamento do campo no interior da mesma seja analisado de forma estatística, desta maneira pode-se considerar que a potência média recebida é dada por 24:

$$\overline{w_r} = \frac{\lambda}{8\pi\eta} \int |E|^2 g(\theta, \phi) p(E, \theta, \phi) d(E, \theta, \phi) \quad (24)$$

Considerando uma antena isotrópica, em que a amplitude do campo independe de θ e ϕ , encontra-se:

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

De acordo com a bibliografia estudada [3], ao se considerar que $p(\theta, \phi)$ tem uma distribuição uniforme e assumindo seu valor como sendo $1/4\pi$, a segunda integral tem por valor 1. Deste modo pode-se confirmar que para qualquer direção de (θ, ϕ) , a potência média recebida na antena será a mesma e terá por valor:

$$\overline{w_r} = \frac{\lambda}{8\pi\eta} \int |E|^2 p(E) dE = \frac{\lambda}{8\pi\eta} \langle |E|^2 \rangle \quad (26)$$

A equação 26 é válida para qualquer ganho de diretividade da antena receptora [3]. 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. Esta 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. As perdas nas paredes da CR, bem como a presença de antenas e dos elementos sob teste são as fontes de diminuição do Q. Considerando a CR vazia, pode-se encontrar um valor aproximado de Q pela equação 27.

$$Q = \frac{3}{2} \frac{V}{S\delta} \quad (27)$$

Na equação acima, tem-se por V o volume da CR, por S o somatório das superfícies das paredes internas da CR e por δ a profundidade pelicular do material constituinte das paredes, cujo valor pode ser calculado por:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}} \quad (28)$$

Na equação 28, σ é a condutividade do material e μ a permeabilidade magnética do mesmo. Na prática o valor de Q pode ser encontrado pela relação entre a potência transmitida (P_T) e recebida (P_R) apresentada na equação 29 [12].

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\lambda^3} \frac{P_T}{P_R} \quad (29)$$

2.2.6. Tipos de Câmara de Reverberação

Um bom compromisso com relação à separação dos modos e o fator de qualidade é alcançado utilizando CR's retangulares [14]. Visando conseguir uma boa uniformidade de campo, diversas propostas de construção de CR foram feitas dentre as quais podem-se citar:

- 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 das partes de uma CR com pás giratórias pode ser observado na figura 2.

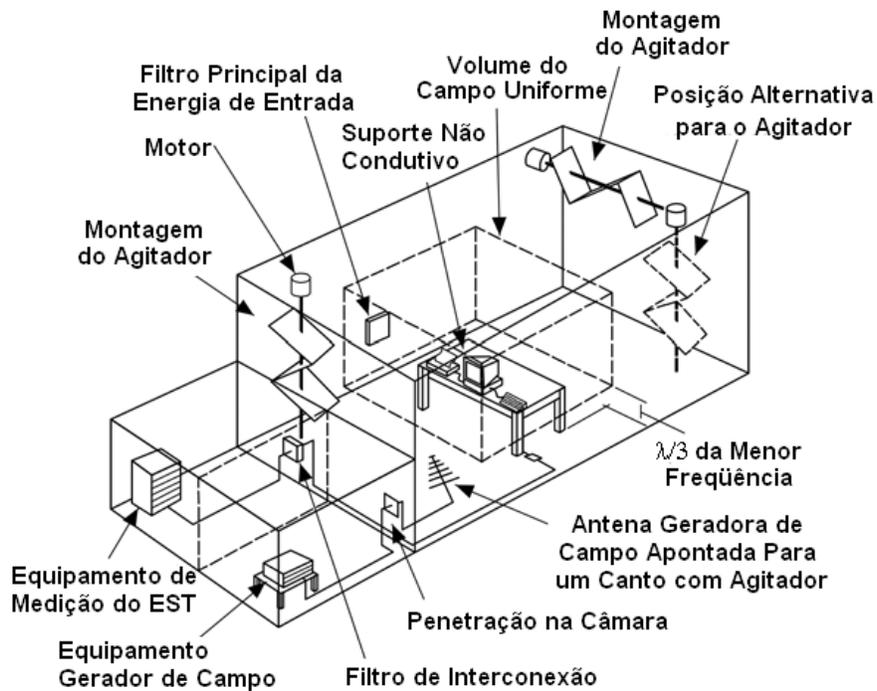


Figura 2 – Modelo de Câmara de Reverberação com Agitador de Modos [1].

A CR com pás giratórias é o modelo mais aceito pela bibliografia, esta é conhecida como câmara de modos agitados (*mode stirred chamber*). O método convencional usa uma lâmina metálica girando continuamente, isto altera as condições de contorno no interior da câmara como fora anteriormente explicado.

Capítulo 3

Projeto da Câmara de Reverberação

O projeto de uma CR pode ser dividido em quatro etapas:

- Projeto da Cavidade Retangular de Ressonância;
- Projeto das Antenas;
- Projeto do Agitador de Modos;
- Projeto do Sistema Motor do Agitador.

Pode-se agora seguir com o projeto da CR.

3.1. Projeto da Cavidade Retangular de Ressonância

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

De acordo com [6], a ZCU deve ser considerada a partir de uma distância de $\lambda/3$ de qualquer parede metálica ou agitador de modos. No projeto foi escolhida uma ZCU de dimensões 55x60x65 cm (altura x largura x comprimento). Como neste projeto apenas um agitador de modos será utilizado, considerando que a sua espessura é desprezível e que ele está posicionado a 5cm da parede metálica localizada no eixo do comprimento da CR, as dimensões da ZCU serão alteradas para 55x60x60 cm. As menores dimensões possíveis para uma CR serão:

$$\begin{aligned} \text{Altura} = a &= 2 \frac{\lambda}{3} + ZCU_{\text{altura}} = 80\text{cm} \\ \text{Largura} = b &= 2 \frac{\lambda}{3} + ZCU_{\text{largura}} = 85\text{cm} \\ \text{Comprimento} = d &= 2 \frac{\lambda}{3} + ZCU_{\text{comprimento}} + D_{\text{Agitador}} = 90\text{cm} \end{aligned} \quad (30)$$

Com as dimensões físicas da câmara, deve-se verificar se a MFU é menor ou igual a 800MHz (31) e se o número de modos é maior que 60 (32) utilizando para isto as equações 21 e 22, para se encontrar a menor frequência possível deve-se tomar o modo TE_{011} . Caso os valores não sejam coerentes, a câmara deve novamente ser calculada. Assim tem-se:

$$f_r = 3 \frac{3 \cdot 10^8}{2} \sqrt{\left(\frac{0}{0,80}\right)^2 + \left(\frac{1}{0,90}\right)^2 + \left(\frac{1}{0,85}\right)^2} = 728,2 \text{ MHz} \quad (31)$$

$$N_s = \frac{8\pi}{3} 0,8 * 0,9 * 0,85 \left(\frac{800 * 10^6}{3 * 10^8}\right)^3 - (0,8 + 0,9 + 0,85) \frac{800 * 10^6}{3 * 10^8} + \frac{1}{2} = 91 \text{ modos} \quad (32)$$

Como o número de modos é maior que 60 e a frequência é menor que 800 MHz a CR tem dimensões aceitáveis estando esta com uma boa margem de segurança para seu funcionamento dado que a MFU real é aproximadamente 9% menor que a MFU desejada inicialmente. No Anexo 1 encontram-se os desenhos detalhados para a construção da CR. A figura 3 apresenta o gráfico da relação entre o número de modos suportados na CR e a frequência utilizada.

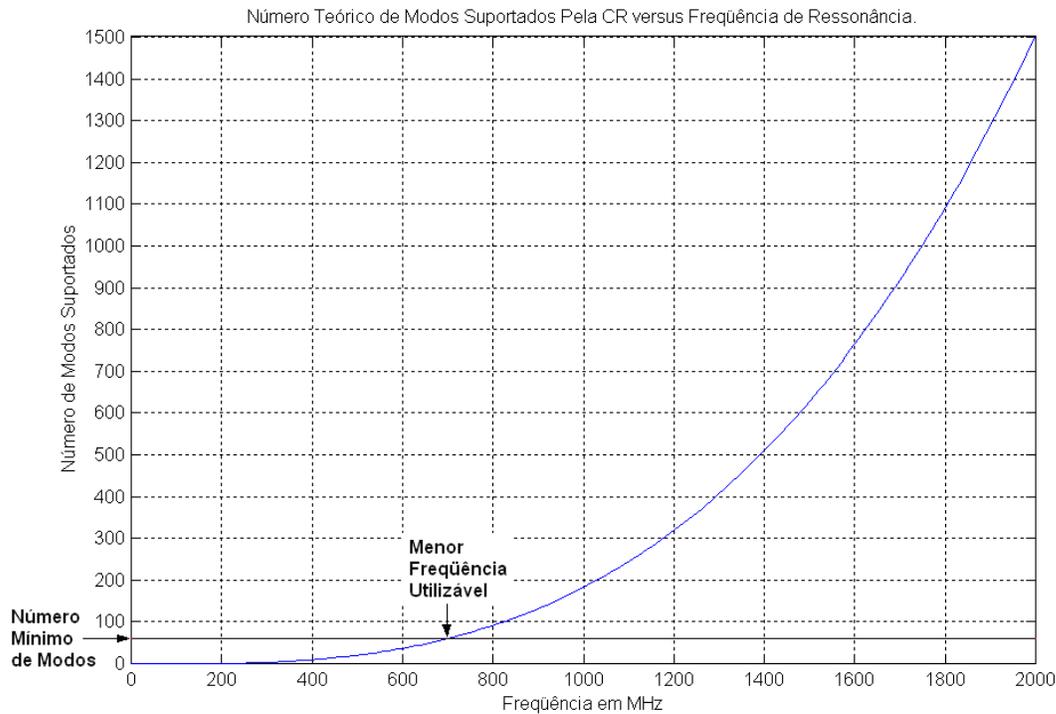


Figura 3 - Número de Modos Suportados na CR.

Outro elemento que deve ser considerado é a escolha do material a ser utilizado na construção da câmara é o material com o qual a mesma será construída. Como foi visto anteriormente parte das perdas que diminuem o fator de qualidade da câmara está relacionada

com este material. No projeto optou-se por utilizar alumínio devido ao seu fácil acesso e à sua maleabilidade. Outro fator importante é que o alumínio é uma liga metálica de baixas perdas, tendo $\sigma = 37.7 \cdot 10^6$ S/m e $\mu = 1.2569701 \mu\text{N/A}^2$ assim sendo, o fator de qualidade teórico da CRR é calculado utilizando a equação 33:

$$Q \cong 31024 \quad (33)$$

O valor prático do fator de qualidade não foi medido experimentalmente, desta maneira, o valor teórico é apresentado apenas como uma curiosidade.

Ainda com relação ao projeto da cavidade, deve-se decidir como se dará o acesso ao interior da mesma, já que no momento do experimento a CR deve encontrar-se fechada. Uma possibilidade é a colocação de uma porta específica para a cavidade, contudo, pode ser bastante complicado fazer um sistema de dobradiças e fechos que se adaptem às necessidades de projeto. Desta maneira, optou-se por utilizar como o acesso ao interior da CR um dos lados da mesma. De tal maneira que a parede superior da câmara é removida para que seu interior seja alcançado.

A câmara foi projetada de maneira a possibilitar a sua expansão, ou seja, caso seja necessário, o usuário pode construir outras paredes iguais às existentes no projeto e sem nenhum problema será capaz de uni-las de tal modo que as dimensões da CR sejam aumentadas.

Um fator importante no projeto é o posicionamento dos conectores que irão ligar os elementos no interior da câmara ao exterior. Foi decidido no projeto que os conectores devem estar posicionados na parte inferior de uma das paredes de medida 80x90 cm.

3.2. Projeto das Antenas

Duas antenas necessitaram ser projetadas para serem utilizadas na calibração da câmara. Inicialmente optou-se por utilizar como transmissora (Tx) uma antena log periódica que por ser uma antena de banda larga poderia cobrir uma grande faixa de frequências de operação no interior da CR.

O projeto da antena foi feito utilizando o software RF-Toolbox V3.2.0 em conjunto com as equações apresentadas na referência [15]. A antena foi escolhida de modo a possuir uma diretividade $D_0 = 8\text{dB}$, para a qual os valores ótimos da razão geométrica τ e do fator de

espaçamento σ são respectivamente dados por 0,865 e 0,157. De posse destes valores e sabendo que a antena deve estar entre 800MHz e 3GHz, encontram-se os valores de projeto utilizando o programa.

Contudo a antena log-periódica não foi utilizada, pois apesar de estar com o projeto correto e de não mostrar nenhum problema de construção, apresentou problemas de casamento de impedância e balanceamento que impossibilitaram seu uso.

Desta maneira, optou-se pela utilização de duas antenas dipolo de meio comprimento de onda, devido ao seu desempenho satisfatório e sua fácil construção. As antenas devem ser projetadas para que tenham a mesma frequência de ressonância, o que aumenta a comunicação entre as duas. Desta maneira, apenas um projeto deve ser feito para as duas construções.

Uma antena dipolo de meio comprimento de onda tem a sua transmissão otimizada para a frequência de ressonância. Como o diagrama de irradiação desta antena é classicamente conhecido, não será apresentado neste relatório. Cada braço da antena deve possuir um comprimento igual a $\lambda/4$ totalizando a soma dos dois braços $\lambda/2$. Desta maneira, para uma antena de 800 MHz que tem comprimento de onda $\lambda=37,50$ cm, tem-se um comprimento de braço igual a 9,38cm. Também tem tamanho $\lambda/4$ o *balun* desta antena.

3.3. Projeto do Agitador de Modos

Por simplificação de projeto, optou-se por utilizar apenas um agitador de modos na CR, esperando ser este o suficiente para a aquisição de uma uniformidade satisfatória de campo. Um elemento de vital importância é o formato do agitador de modos, pois este formato irá determinar como este elemento altera as condições de contorno no interior da CR. No projeto em questão, optou-se por um agitador no formato de cruz, já que segundo [10], este formato é mais eficiente que o formato retangular que seria mais simples de construir que o agitador em cruz.

Após a escolha do formato do agitador, deve-se escolher seu tamanho, de acordo com [7], um agitador que possua dimensões (de comprimento) entre 50 e 75% das dimensões da parede na qual está fixado, apresentará bons resultados no tocante à uniformidade do campo. Desta forma, estando o agitador na parede que mede 80x85 cm, deve-se construir um agitador que possua cerca de 60x63 cm, como este agitador tem o formato de cruz, as dimensões serão tomadas em seus eixos centrais.

De acordo com [11], um agitador deve ter dimensão entre 1 e 3 comprimentos de onda. Sendo o comprimento de onda para 800MHz, $\lambda=37,5\text{cm}$, tornar-se-ia impraticável a construção da câmara para o caso em que se construiu um agitador maior ou igual que 2λ . Decidiu-se então que o agitador teria dimensão maior que λ , nos seus eixos centrais. A largura de cada braço porém foi tomada como sendo da ordem de $0,6\lambda$. Desta forma, o agitador de modos foi projetado conforme apresentado na figura 4.

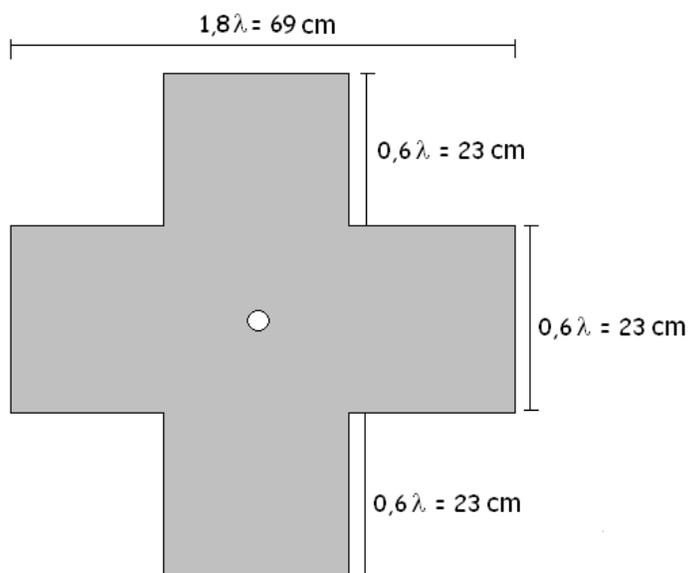


Figura 4 – Agitador de Modos.

3.4. Projeto do Sistema Motor do Agitador

O sistema de movimentação do agitador deve possuir a capacidade de ter sua velocidade alterada pelo usuário da câmara. Desta maneira, inicialmente cogitou-se a idéia de utilizar um motor de passo como elemento central do sistema, dado que o mesmo tem velocidade e posição facilmente controláveis. Contudo, problemas de construção impossibilitaram seu uso.

O motor de indução foi o que melhor se adequou às necessidades de projeto deste sistema, devido à sua robustez mecânica e à sua grande disponibilidade no mercado, podendo ser encontrado em ventiladores, por exemplo.

Contudo, este motor não tem velocidade controlável de maneira simples bem como não possui controle de posição. Assim, sendo seu uso não seria tão bom quanto o do motor de

passo. Apesar disto, o motor de indução pode ter sua velocidade variada com a diminuição do torque em seu eixo devido à diminuição tensão de alimentação do mesmo. Desta maneira, o uso de um controlador de tensão, indiretamente alteraria a velocidade do motor.

Um controlador de tensão é simples de se projetar e de se encontrar no mercado. Desta maneira esta foi a solução encontrada. O sistema de controle é feito utilizando um Dimmer [13].

O circuito 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. Desta maneira, 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 ao 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 5 e o seu diagrama elétrico é apresentado na figura 6 [13].

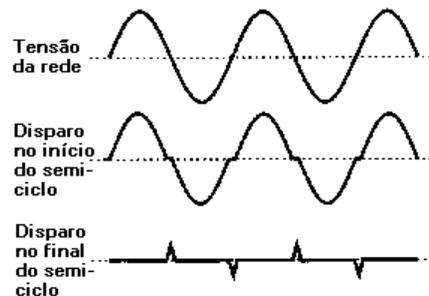


Figura 5 – Potência Aplicada à Carga em Função do Instante de Disparo do TRIAC [13].

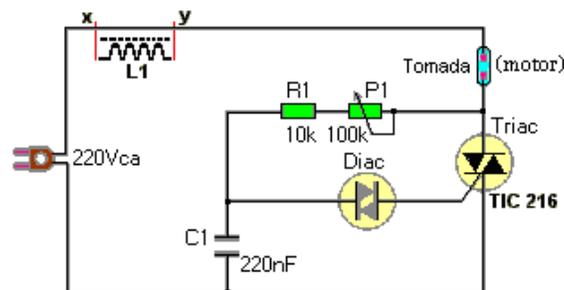


Figura 6 – Circuito do Controlador de Velocidade [13].

Capítulo 4

Calibração da Câmara e Influência da carga

As medições da uniformidade do campo foram realizadas de acordo com a norma IEC610004-21. O procedimento consiste em verificar o desvio padrão global da intensidade máxima do campo elétrico na Zona de Campo Uniforme (ZCU) medindo-se o campo nos vértices da ZCU. A norma estipula uma tolerância aceitável de ± 3 dB de desvio [4].

Todas as medições foram realizadas considerando a Menor Frequência Utilizável (MFU) de 800 MHz e uma ZCU com a distância de $\lambda/2$ (λ sendo o comprimento de onda da MFU) de todos os elementos metálicos (paredes ou agitador). Sabendo que o agitador está a uma distância de 5 cm de uma das paredes, as dimensões da ZCU são:

- Largura: 47,5 cm
- Comprimento: 47,5 cm
- Altura: 42,5 cm

Inicialmente foram realizadas medições do campo da câmara sem a carga, em seguida com a carga posicionada paralelamente às paredes da câmara e finalmente com a mesma posicionada assimetricamente [18]. Em seguida, foram realizadas simulações utilizando um software baseado no Método das Diferenças Finitas no Domínio Temporal para que os resultados fossem comparados. Todos os resultados são tabelados e comparados ao fim desse capítulo.

4.1. Medições com a Câmara Vazia

Nas medições do campo elétrico da câmara vazia, os únicos elementos presentes foram o agitador de modos, a antena transmissora e a antena receptora. A transmissora foi fixada em um ponto de encontro entre duas paredes da câmara e foi conectada a um gerador de sinal à 800 MHz com 5 dBm de potência de saída. A antena receptora foi utilizada para medir a intensidade do campo elétrico nos oito vértices da ZCU a qual estava conectada a um analisador de espectro R&S modelo FSH3. A figura 7 apresenta uma fotografia da câmara utilizada sem carga.

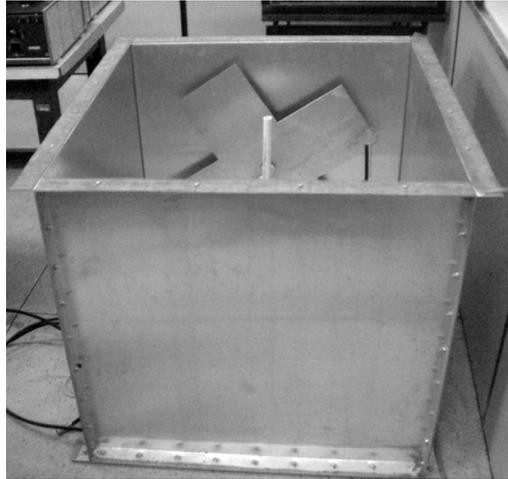


Figura 7 – Fotografia da CR utilizada sem carga.

Para obter o desvio padrão global na escala de decibéis, a equação 34 foi utilizada:

$$\sigma_{i(dB)} = 20 \log \left(\frac{\sigma_i + \langle E_i^{\max} \rangle}{\langle E_i^{\max} \rangle} \right), i = x, y, z \quad (34)$$

Onde σ_i é o desvio padrão numérico dos oito valores máximos das intensidades do campo elétrico medido e $\langle E_i^{\max} \rangle$ é a média desses máximos.

Resultando de (33), o desvio padrão global obtido para a ZCU vazia (sem carga) foi de 1,55 dB o qual é um valor aceitável comparado à tolerância recomendada de 3 dB.

4.2. Influência da carga nas medições

Após a verificação da uniformidade do campo da ZCU sem a presença da carga, um cubo metálico, representativo de qualquer circuito ou equipamento, medindo 8 cm de lado (512 cm^3), foi utilizado como uma carga na ZCU.

Inicialmente o cubo foi posicionado na ZCU com seus lados (faces do cubo) paralelos às paredes da CR. O desvio padrão global medido nesta configuração foi de 4,18 dB, o qual é um valor inaceitável para ser considerada uma distribuição de campo uniforme.

A partir deste resultado, pode-se concluir que com uma pequena perturbação, carga com um décimo das dimensões da CR e simetricamente posicionada, a uniformidade do campo é afetada.

Em seguida, o mesmo cubo foi rotacionado e transladado com relação aos eixos da CR. Nesta nova posição, permanecendo ainda no centro da ZCU, os lados do cubo estão numa posição assimétrica com relação às paredes da CR. O desvio padrão global obtido foi de 2,10 dB. A figura 8 apresenta uma fotografia da câmara com a carga assimetricamente posicionada.

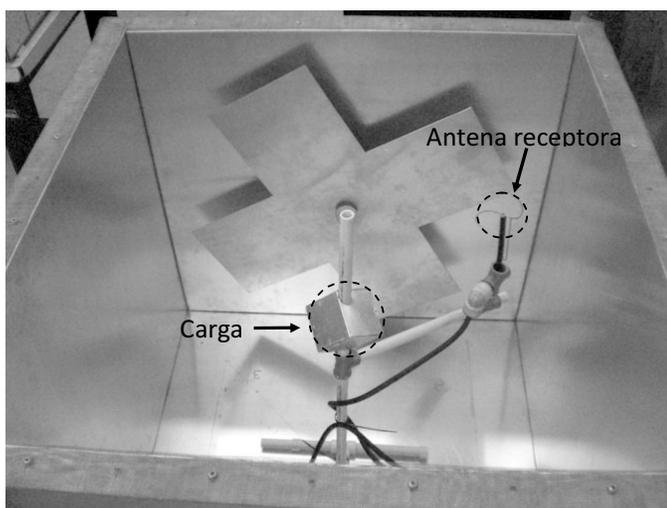


Figura 8 – Carga na CR assimetricamente posicionada.

A tabela 1 apresenta uma comparação dos resultados dos desvios padrão obtidos entre os três casos estudados: câmara sem carga, carga simetricamente posicionada e carga assimetricamente posicionada.

TABELA 1. INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA CARGA (MEDIÇÕES)

Presença/Posição da Carga	Desvio Padrão Global (dB)
Sem Carga	1,55
Carga Simetricamente Posicionada	4,18
Carga Assimetricamente Posicionada	2,10

4.3. Resultados das Simulações

Após as medições, foi utilizado um software baseado no Método das Diferenças Finitas no Domínio Temporal [5] para que os resultados numéricos pudessem ser comparados com os testes realizados.

A figura 9 abaixo mostra a interface de simulação utilizada já com a câmara e a carga em seu interior presente.

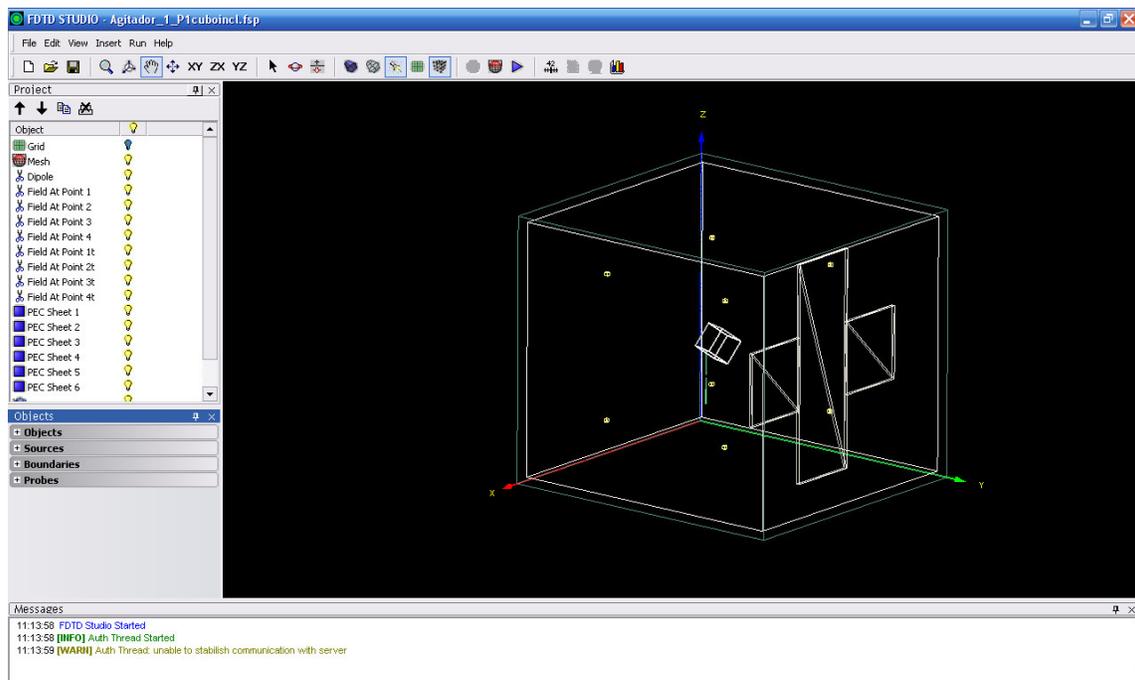


Figura 9. Interface de simulação utilizada.

A tabela 2 a seguir apresenta da mesma forma que a tabela 1 os resultados obtidos com as simulações: câmara sem carga, carga simetricamente posicionada e carga assimetricamente posicionada.

TABELA 2. INFLUÊNCIA DA POSIÇÃO DA CARGA (SIMULAÇÕES)

Presença/Posição da Carga	Desvio Padrão Global (dB)
Sem Carga	1,98
Carga Simetricamente Posicionada	4,67
Carga Assimetricamente Posicionada	2,44

E finalmente na tabela 3 apresenta-se um resumo dos resultados de medição e simulação para as três configurações utilizadas da câmara.

TABELA 3. COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Presença/Posição da Carga	Desvio Padrão Global (Medições) (dB)	Desvio Padrão Global (Simulações) (dB)
Sem Carga	1,55	1,98
Carga Simetricamente Posicionada	4,18	4,67
Carga Assimetricamente Posicionada	2,10	2,44

Observa-se que a introdução de uma perturbação (objeto metálico), mesmo que seja pequeno, no centro da ZCU, pode produzir uma degeneração da uniformidade do campo elétrico. Por outro lado, assimetricamente posicionado, o mesmo objeto modifica o valor do desvio padrão obtido. Tal resultado pode ser explicado pelo fato de que o cubo metálico gera uma maior quantidade de reflexões, interrompendo a geração de ondas uniformes entre as paredes da CR e a carga.

A norma IEC61004-21 não estabelece qualquer sugestão para que se verifique a uniformidade do campo na presença de uma carga. A geometria da carga possui uma grande influência na distribuição do campo, visto que a uniformidade do mesmo foi modificada de um valor inaceitável (acima de 3 dB) para um valor aceitável (abaixo de 3 dB) apenas modificando a posição da carga.

Capítulo 5

Conclusões e perspectivas

Neste trabalho foram apresentados alguns tipos de câmara de reverberação, em seguida o projeto da CR que foi realizada no LEMA e finalmente o estudo da influência de uma carga, cubo metálico com 8 cm de lado, na uniformidade do campo elétrico da ZCU.

A uniformidade do campo na CR compacta foi medida baseando-se na norma IEC61004-21 em três diferentes formas. A primeira foi a medição do campo sem carga; a segunda com uma carga (cubo metálico) simetricamente posicionada; e a última com a carga assimetricamente posicionada.

Os resultados das medições e simulações podem provar que poderíamos obter, com o procedimento do desvio padrão, a uniformidade do campo apenas modificando a posição da carga. Seria importante ser realizada uma revisão na norma para que seja garantida a uniformidade do campo durante o teste de imunidade em uma câmara de reverberação.

Como trabalhos posteriores, pode-se realizar medições com outras cargas ou ate mesmo com outros agitadores, já que as geometrias dos mesmos também influenciam a uniformidade do campo em questão.

Referências Bibliográficas

- [1] Heyno Garbe, "New EMC Test Facilities for Radiation Measurements", University of Hanover, Hanover, Germany;
- [2] Silva, E. F., Santos, K. C., Ghiotto, A., Fontgalland G., and Vuong, T. P., "Compact Electromagnetic Reverberation Chamber Design and Construction", in Proc. ANTEM2006 Int. Symp. on Antenna Technology and Applied Electromagnetics/Canadian Radio Science, v. 1. Montreal, 2006, pp.97-99.
- [3] Corona P., J. Ladbury, and G. Latmiral, "Reverberation-chamber research-then and now: a review of early work and comparison with current understanding," IEEE Trans. Electromagn. Compat., vol. 44, no. 1, Feb. 2002, pp. 87–94.
- [4] IEC Standard Reverberation Chamber Test Methods, IEC Standard 61004-21, 2001.
- [5] 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.
- [6] D. Zhang and J. Song, "Impact of stirrers' position on the properties of a reverberation chamber with two stirrers," in Proc. IEEE Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility, vol. 1. Piscataway, NJ: IEEE, 2000, pp. 7–10.
- [7] 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. Piscataway, NJ: IEEE, 1999, pp. 12–16.
- [8] Y Huang, JT Zhang, P Liu, "A Novel Method to Examine the Effectiveness of a Stirrer", IEEE, 2005.
- [9] YJ Wang, WJ Koh, YK Tai, CK Lee, KY See, "Evaluating Field Uniformity of a Mini-Reverberation Chamber with Two Mechanical Stirrers", Proc. Of IEEE int. Symp. Of EMC, pp 795-798, 2002.
- [10] Corona P., Ferrara G., Migiliaccio M., " Reverberating Chambers as Sources of Stochastic Electromagnetic Fields", Trans. On EMC of IEEE, vol. 38, N 03, 1996.
- [11] K. Harima and Y. Yamanaka, "FDTD analysis on the effect of stirrers in a reverberation chamber," in Proc. Int. Symp. on Electromagnetic Compatibility. Tokyo, Japan: IEICE, 1999, pp. 223–229.
- [12] Burns, Christian, "Three-Dimensional Simulation And Experimental Verification Of A Reverberation Chamber", Phd Thesis, Swiss Federal Institute Of Technology Zurich, 2005.
- [13] Luiz Ferraz Netto, "Dimmer com TRIAC" em www.feiradeciencias.com.br/sala03/03_09.asp, 2006.
- [14] Alexandre Albarello Costa, Daniel Henrique Pastro, "Simulação e Análise da Uniformidade do Campo Eletromagnético no Interior de Uma Câmara Reverberante", Curitiba, Março 2005
- [15] Balanis, C.A. "Antenna theory: Analysis and Design", 2nd ed.. New York: John Wiley & Sons, 1997
- [16] Collin, R. E. "Foundations for Microwave Engineering", 2nd ed. New York: McGraw-Hill, 1992.
- [17] Chan, Tse V., Reader, Howard C., "Understanding Microwave Heating Cavities", Artech House, Boston, 2000.
- [18] Cantalice, S. F., Fontgalland, G. and Richalot, E. "Influence of an Asymmetrically Positioned Load in a Reverberation Chamber", artigo aceito para *Instrumentation and Measurement Technology Conference – IMTC 2009*.