

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Ciências e Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

Relatório de Estágio Supervisionado em Engenharia
Elétrica

Klênio Dias Timoteo

10 de fevereiro de 2005



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Relatório de Estágio Supervisionado em Engenharia Elétrica

Klênio Dias Timoteo

10 de fevereiro de 2005

Dedicatória

Este trabalho é inteiramente dedicado às pessoas que me ensinaram a viver e são a razão desta vida:

José Oêmio Timoteo de Arruda

Iraci Pereira Dias Timoteo e

Indra Dias Timoteo

Agradecimentos

A Deus, por ter me dado a oportunidade de viver.

A Universidade Federal de Campina Grande, antes Universidade Federal da Paraíba, Campus II, por ter-me proporcionado e dado condições para estudar.

A todas as pessoas que contribuem para o funcionamento e sobrevivência da instituição.

Aos meus pais e minha irmã, que me educaram, ensinaram-me a viver, sempre estiveram comigo e me incentivaram a continuar meu caminho, lutando e prosperando.

A todos os meus familiares que fizeram a vida ter um sentido muito especial e a todos os meus amigos, que ajudaram direta ou indiretamente a minha carreira de estudante e amigo.

Aos amigos e colegas Miguel Aderaldo P. Jordão e Francisco Domicio C. de A. Filho, pelos incentivos e contribuições.

A minha companheira namorada Vivianni de Brito Castro pelo incentivo e compreensão.

Sumário

1	Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados	6
1.1	Apresentação	6
1.2	Estágio Supervisionado	7
2	Câmara de Reverberação Eletromagnética	8
2.1	Introdução	8
2.2	Características da CREM	9
2.3	Princípios de Operação	10
2.3.1	Cavidades Ressonantes	10
2.3.1.1	Modos Propagantes	11
2.3.2	Espalhadores de Sinal	11
2.3.2.1	Geometrias dos Espalhadores	11
2.3.2.2	Espalhadores Sugeridos	13
2.4	Fator Q	15
3	Projeto da CREM	16
3.1	Introdução	16
3.2	Faixa de Frequências de Operação	16
3.3	Dimensões Físicas da CREM	17
3.3.1	Forma Geométrica da Câmara	18
3.3.2	Lados da Câmara	18
3.4	Dimensões Elétricas da CREM	18
3.4.1	Número de Modos Propagantes	19
3.5	Espalhadores	20
3.5.1	Dimensão dos Espalhadores	20
3.5.2	Local de Instalação dos Espalhadores	21
3.5.3	Rotação dos Espalhadores	21
3.6	Antenas de Teste e Medição	21
3.6.1	Instalação das Antenas	23
3.7	Construção de um Objeto de Teste	23

3.8	Inserção de Cabos e Fios para Medição e Alimentação no Interior da Câmara de Reverberação	24
3.9	Especificação da Forma da Porta da Câmara	25
3.9.1	Sistema de Dobradiças	25
3.9.2	Sistema de Encaixe da Porta com as Paredes	25
3.9.3	Sistema de Tranca da Porta	25
3.10	Medição e Determinação da Distribuição de Campo na CREM	25
4	Recomendações e Conclusões	27
4.1	Introdução	27
4.2	Conclusão	27
4.3	Sugestões para Futuros Trabalhos	27

Lista de Figuras

2.1	Câmara de Reverberação Eletromagnética	9
2.2	Tipos de espalhadores de sinal	12
2.3	Distribuição de campo por cada espalhador	14
3.1	Antena Philips PM 7320X - 16dB, (a) vista lateral e (b) vista frontal . . .	22
3.2	Antena dipolo	22
3.3	Método de inserção de cabos e fios condutores na CREM e no objeto sob teste	24

Capítulo 1

Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados

1.1 Apresentação

O Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados (LEMA) compõe o quadro de laboratórios do curso de graduação e pós-graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande.

Sua construção foi concluída em 1970 e daí por diante o laboratório conta com cooperações internacionais com o Conselho Britânico e pela CIDA (de origem canadense), para a realização e aparelhagem das pesquisas desenvolvidas.

Pesquisas na área de antenas, eletromagnetismo e microondas são desenvolvidas pelo LEMA. As linhas de pesquisas, hoje, envolvidas são:

- Estruturas planares (ativas e passivas) de microondas para construção de dispositivos como antenas, osciladores, filtros, etc;
- Métodos numéricos para modelagem e solução de problemas eletromagnéticos;
- Emprego de microondas na indústria e na medicina;
- Compatibilidade Eletromagnética (CEM).

Vários dispositivos como filtros de microondas e antenas, em estruturas planares, foram construídos. O projeto e construção do primeiro forno a microondas da América Latina foi executado no LEMA.

Na área de aplicações médicas foram desenvolvidos aplicadores regionais para hipertermia clínica em microondas, assim como uma fonte a magnetron para tal objetivo. Uma parceria com o Hospital Universitário Alcides Carneiro (HUAC) é mantida com o objetivo de aplicação de microondas no tratamento do câncer.

Na parte de extensão o LEMA é habilitado a prestar serviços como:

- Manutenção de equipamentos de rádio frequência;
- Projeto e construção de equipamentos médicos para diatermia e hipertermia;
- Projeto e construção de fornos a microondas para processamento térmico de materiais industriais e agrícolas;
- Simulação de processos industriais.

O LEMA é responsável pela realização de experimentos das seguintes disciplinas de graduação em Engenharia Elétrica: Ondas e Linhas, Estruturas Guiadas, Antenas e Propagação e Engenharia de Microondas. O laboratório, atualmente, está sob a coordenação do professor Rômulo R. Maranhão do Valle.

1.2 Estágio Supervisionado

Este trabalho foi executado inteiramente no ambiente prático experimental do Laboratório, juntamente com o professor Dr. Glauco Fontgalland, onde foi feito o projeto para construção de uma Câmara de Reverberação Eletromagnética para testes de Compatibilidade Eletromagnética (CEM) em diversos dispositivos eletrônicos.

O Estágio Supervisionado foi composto pelos seguintes itens de projeto:

- Determinação da forma da Câmara;
- Material empregado em todas as partes da CREM;
- Faixa de frequências a ser utilizada;
- Tipos de antenas de teste e medição;
- Especificação das dimensões físicas e elétricas da CREM;
- Especificação das geometrias dos espalhadores de sinal empregados;
- Dimensionamento da porta, dobradiças, forma de tranca;
- Especificação da forma de inserção de cabos e fios;
- Dimensionamento do objeto sob teste;
- Determinação do circuito de teste;
- Procedimentos de medição.

Capítulo 2

Câmara de Reverberação Eletromagnética

2.1 Introdução

Nos dias atuais várias técnicas para medição de Compatibilidade Eletromagnética (CEM), entre dispositivos, são utilizadas, pois o avanço da tecnologia trás a todo momento novos circuitos que dinamizam certos trabalhos e facilitam a vida da sociedade. Estes tais dispositivos as vezes sofrem interferências de outros equipamentos, deixando de operar em seu estado normal de funcionamento.

Os testes de CEM são executados no intuito de detectar interferências entre dispositivos como máquinas pesadas da indústria, controladores, microprocessadores, simples componentes elétricos, eletrodomésticos e também entre fios condutores e dispositivos, as conhecidas interferências irradiada (emissão irradiada) e conduzida (emissão conduzida), respectivamente. Dentre estes métodos de medição de CEM existe a Câmara de Reverberação Eletromagnética (CREM), que parte do princípio da reflexão de som, luz ou calor. Neste caso a reflexão será de campos eletromagnéticos.

O objetivo da CREM é de fazer com que o sinal introduzido, de amplitude e frequência desejados, seja igualmente incidido sobre o objeto sob teste em todas as 3 dimensões. Ou seja, a CREM tem a função de fazer com que o campo emitido dentro da estrutura seja uniforme em todos pontos do objeto sob teste e seja possível a medição da potência total absorvida por este. A Figura 2.1 exemplifica uma CREM com todos os equipamentos, incluindo os dispositivos de medição.

Dessa forma podemos definir CREM como sendo uma cavidade eletricamente grande, altamente condutiva (fechada) para medições eletromagnéticas (susceptibilidade) em equipamentos eletrônicos.

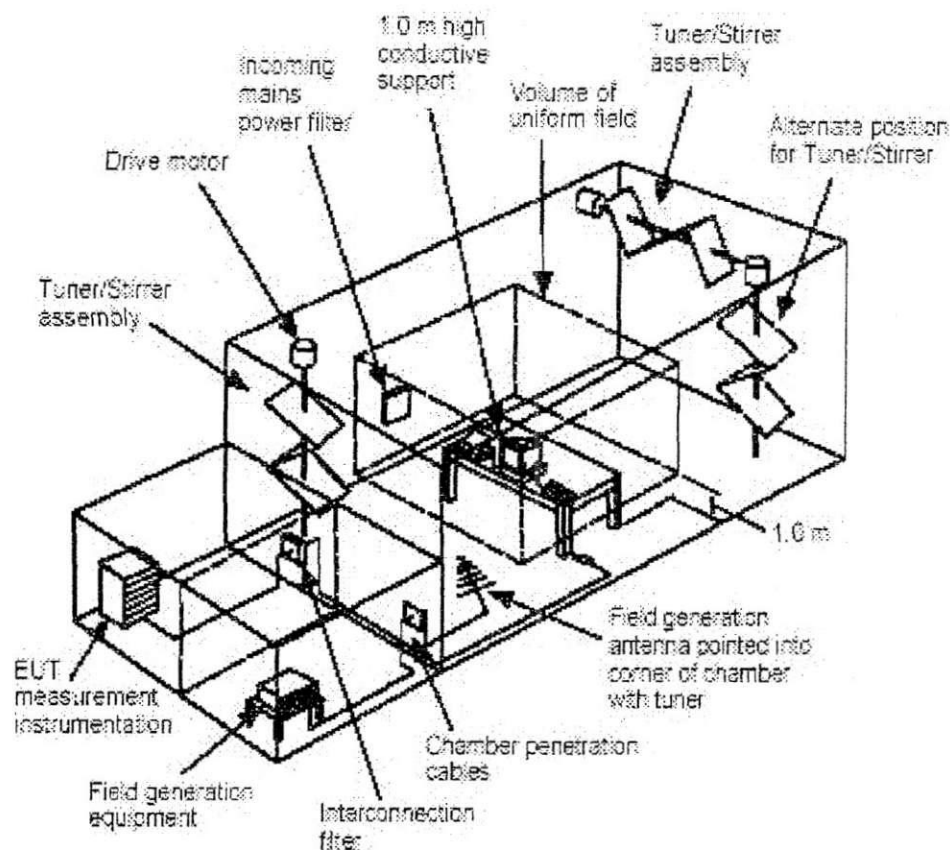


Figura 2.1: Câmara de Reverberação Eletromagnética

2.2 Características da CREM

Uma das grandes dificuldades para testes de CEM era fazer com que o campo atingisse todas as partes do dispositivo sobre teste e encontrar seus pontos mais e menos susceptíveis à irradiação e interferência. Para isto era feito a rotação do objeto, e para cada posição deste um novo ensaio executado. Estes experimentos, dessa forma, eram muito demorados e cansativos.

Com o desenvolvimento e validação dos experimentos de CEM das Câmaras de Reverberação ficou menos trabalhoso e relativamente fácil de tratar com dispositivos sobre teste onde é necessário a irradiação em todos os pontos de sua superfície, pois é uma das

características das CREM a incidência de sinal em todas as partes do objeto de forma uniforme.

Dentre suas principais características podemos destacar:

- A Câmara proporciona um local reservado e imune a influências externas que possam interferir nos resultados do teste;
- O ambiente eletromagnético gerado é altamente controlável, repetível e oferece ciclos rápidos de aquisição de dados e análise;
- A faixa de frequências que pode ser utilizada nos testes é bastante abrangente, a depender do tamanho da CREM e do tamanho do objeto de teste;
- A intensidade de campo a ser gerada usa menos potência do que a requerida por outros ambientes de teste;
- Possibilidade de medição de potência total irradiada (emissão).

2.3 Princípios de Operação

2.3.1 Cavidades Ressonantes

As linhas de transmissão e os guias de onda tem a finalidade de transmitir energia eletromagnética de um ponto para outro. Um ressonador, por outro lado, é um dispositivo feito para armazenar energia. Como tal, é equivalente a um circuito ressonante. Em, baixas frequências, usam-se um capacitor e um indutor em paralelo para formar um circuito ressonante. Para fazer esta combinação ressonar em comprimentos de onda mais curtos, a indutância e a capacitância podem ser reduzidas. Tiras paralelas reduzem a indutância ainda mais. No caso limite, temos a caixa retangular completamente fechada ou *cavidade ressonante*. Na cavidade ressonante, a máxima tensão é desenvolvida entre os centros da parte superior e inferior.

A energia na cavidade oscila de um lado para o outro, passando de inteiramente elétrica a inteiramente magnética, duas vezes por ciclo. A CREM funcionará como uma espécie de cavidade ressonante.

As Câmaras de Reverberação operam usando suas superfícies interiores para refletir os campos de RF (rádio-frequência) internamente gerados.

Uma cavidade fechada possui muitos modos de propagação que formam padrões de onda estacionária tridimensionais, com grande número de modos ressonantes. Isto dá origem a regiões onde o campo é pequeno e outras em que o campo assume valores elevados. Variações típicas são da ordem de 40 dB, fazendo com que o campo de teste seja percebido muito fortemente em certos locais determinados a depender dos modos existentes e frequências.

Como uma cavidade ressonante, um grande número de modos de propagação são existentes, fazendo com que o padrão de campo se torne altamente detalhado (embora regular) e com grandes e rápidas variações de sua intensidade com a frequência.

2.3.1.1 Modos Propagantes

As frequências ressonantes (frequências de ressonância modais) de uma cavidade retangular (em Hz) são dadas por:

$$f_{ijk} = \frac{c_0}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{c}\right)^2} \quad (2.1)$$

onde a , b e c são as dimensões da cavidade (em metros); m , n e p são inteiros, e c_0 é a velocidade de propagação das ondas na cavidade. ($c_0 = 3 \times 10^8$ m/s \rightarrow espaço livre)

O número de possíveis modos ressonantes, abaixo da frequência de operação f , é dado por:

$$N_{mod} = \frac{8\pi abc f^3}{3c_0^3} - \frac{(a+b+c)f}{c_0} \quad (2.2)$$

Quando existe um grande número de modos (geralmente > 60) é calculado a média do campo nos vários espalhadores em diferentes posições, onde o campo seja, em média, uniforme ao longo do volume, levando em consideração que a uniformidade do campo é deteriorada próximo às paredes e qualquer outra estrutura metálica.

2.3.2 Espalhadores de Sinal

No passado, vários autores apresentaram CREMs com diferentes tipos de espalhadores. Devido ao desafio de modelagem computacional destes dispositivos, simulações existentes eram restringidas a duas dimensões, excitação com o dipolo de Hertz, assumindo materiais condutores perfeitos, ou impondo limitações na complexidade dos espalhadores.

Na tentativa de homogeneizar o campo em torno do dispositivo sobre teste, são instalados no interior da CREM espalhadores, conhecidos como agitadores de modos, que tem como finalidade espalhar ao máximo o sinal irradiado dentro da câmara pela antena. Estes espalhadores são rotacionados em torno de um eixo, que pode estar na posição vertical ou horizontal, a depender do projetista. Também é bastante comum encontrarmos câmaras que usam de 1 a 3 espalhadores.

2.3.2.1 Geometrias dos Espalhadores

Dentro da CREM até três espalhadores podem ser montados e operados simultaneamente em diferentes eixos (1 vertical e 2 horizontais - x , y , z).

Na Figura 2.2, mostramos os tipos de espalhadores mais utilizados nas Câmaras de Reverberação Eletromagnéticas de acordo com [3]. Onde temos quatro tipos, que são empregados tanto na posição vertical como na horizontal. Estes agitadores podem ser especificados como:

- 6 placas independentes, correspondente a Figura 2.2(a);
- Placas de seção cruzada (ortogonais), Figura 2.2(b);
- 6 placas conectadas entre si, Figura 2.2(c);
- Espalhador em Z, Figura 2.2(d).

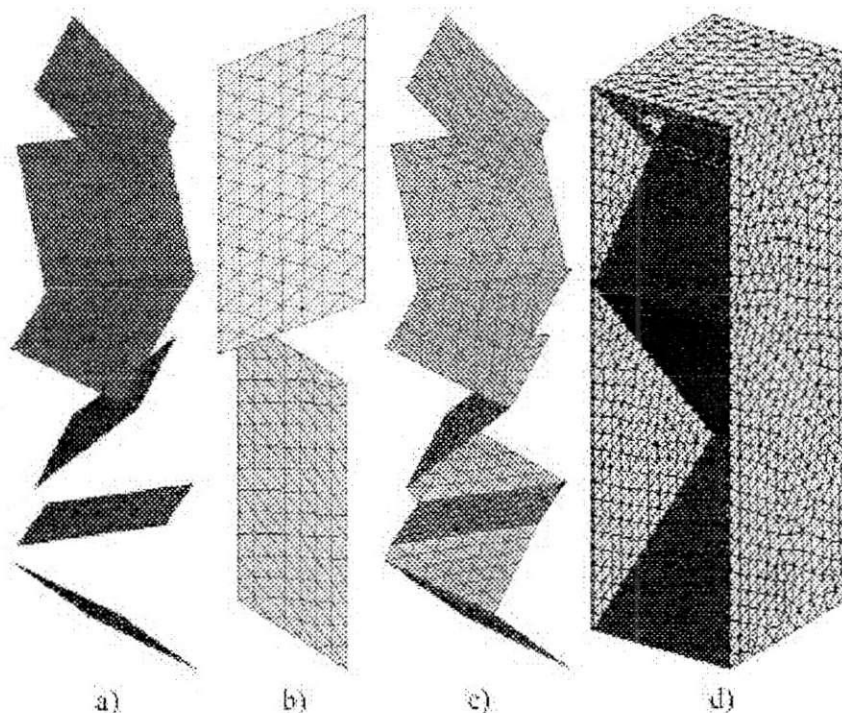


Figura 2.2: Tipos de espalhadores de sinal

Espalhador de 6 placas independentes

Este tipo de espalhador é caracterizado por seis placas quadradas independentes (não existe interconexão) e de mesmas dimensões. As placas são dispostas em um eixo, que

pode ser horizontal ou vertical, com 60° de rotação de uma placa com relação a outra, ou seja, teremos espelhos (pás) a cada 60° totalizando os 360° do respectivo eixo. O ângulo de inclinação como o eixo é de 45° para todas as placas.

Espalhador de placas com seção cruzada

São formados por duas placas idênticas retangulares, que são dispostas ortogonalmente entre si, ou seja, estão com 90° de defasagem.

Espalhador de 6 placas conectadas

Essa estrutura é similar ao de 6 placas independentes com uma única diferença, as placas são interconectadas entre si, fazendo com que o comprimento elétrico do espalhador se torne bem maior.

Espalhador em Z

Consiste de três placas retangulares, que são interconectadas em forma de Z, e uma placa de abertura.

OBS: Um parâmetro que deve ser observado na implantação dos espalhadores é a distância destes às paredes da CREM.

2.3.2.2 Espalhadores Sugeridos

No projeto da Câmara de Reverberação a ser desenvolvida pelo LEMA, é especificado a empregar os seguintes tipos de espalhadores:

- Posição vertical - espalhador de placas com seção cruzada;
- Posição horizontal - espalhador de 6 placas conectadas;
- Posição horizontal - espalhador de 6 placas independentes.

A escolha desses agitadores está relacionada com a referência [3] de acordo com os gráficos comparativos dos espalhadores da Figura 2.3. O emprego foi determinado analisando as curvas dos diferentes tipos e observando aqueles que apresentavam uma maior homogeneidade do campo.

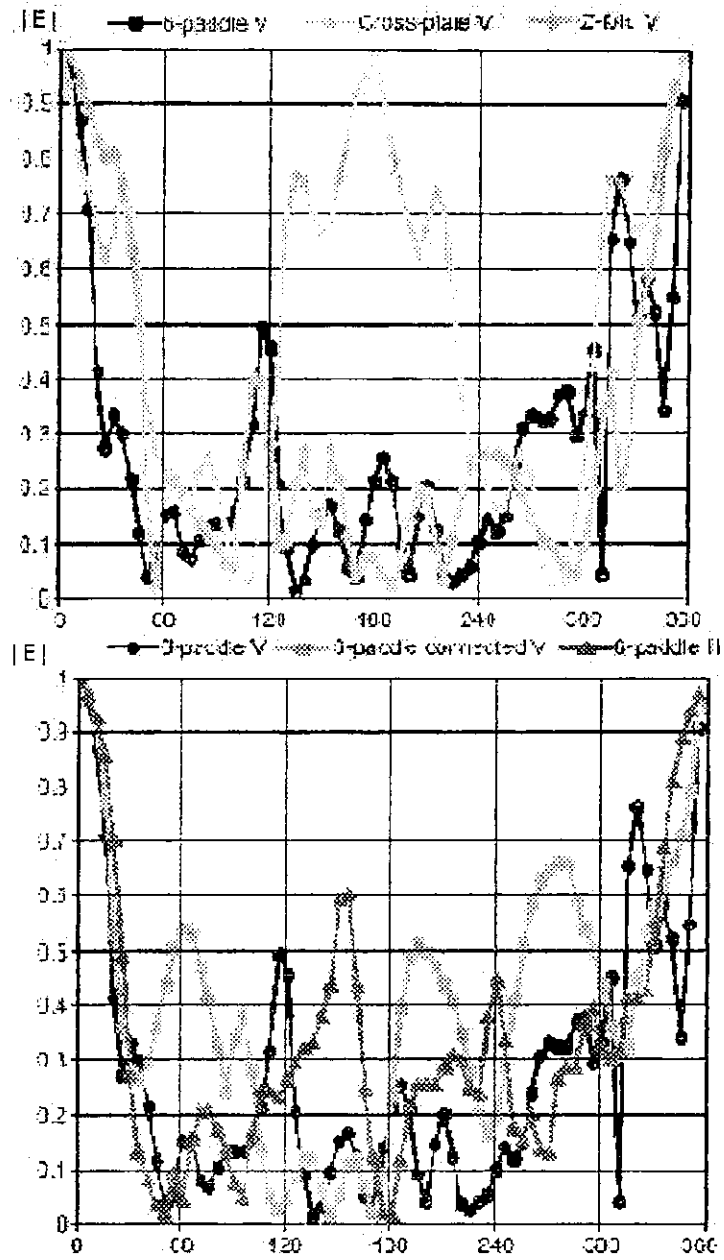


Figura 2.3: Distribuição de campo por cada espalhador

2.4 Fator Q

O fator de qualidade (fator Q) é usado para descrever a capacidade que uma câmara tem de armazenar energia. Essa capacidade é determinada pelas perdas existentes no interior da câmara. Este fator determina, também, a intensidade de campo na câmara para um determinado nível de potência irradiada. Isto identifica:

- A sensibilidade da câmara para medições ;
- A máxima intensidade de campo que pode ser alcançada por um determinado amplificador de potência em teste de susceptibilidade.

A perda dominante em uma CREM vazia é devido às paredes. As estruturas adicionais como antenas, aberturas, estruturas de apoio e o equipamento sobre teste também afetam no fator Q (global) da câmara.

O fator de qualidade de uma CREM, a altas frequências, é dado aproximadamente por:

$$Q = \frac{3}{2} \cdot \frac{V}{S \cdot \delta} \quad (2.3)$$

onde V é o volume total da CREM, S é a área de superfície das paredes internas e δ representa a profundidade de penetração das paredes, dada por:

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{\pi f \sigma \mu}} \quad (2.4)$$

onde σ é a condutividade e μ a permeabilidade das paredes.

O fator Q pode ser calculado se a entrada de potência na câmara e o campo médio são conhecidos:

$$Q = \frac{16\pi^2 V}{\eta_{Tx} \eta_{Rx} \lambda^3} \left\langle \frac{P_{med}}{P_{in}} \right\rangle \quad (2.5)$$

onde λ é o comprimento de onda do sinal, $\langle (P_{med}/P_{in}) \rangle$ é a relação entre a potência média recebida e a potência de entrada em uma seqüência completa de espalhadores, e η_{Tx} , η_{Rx} são os fatores de eficiência das antenas para transmissão e recepção, respectivamente.

OBS: A eficiência das antenas corneta é de 0,9¹, aproximadamente.

Embora o fator Q de uma CREM possa ser calculado teoricamente, medições do valor de Q são normalmente feitos em torno de uma magnitude (em torno de 1/50 para baixas frequências e 1/5 para altas frequências), devido a imperfeições na sua construção.

Se o fator Q está muito baixo, devido a perdas, então a uniformidade do campo pode ser afetada adversamente. O valor mínimo permissível de Q é mais baixo para altas frequências do que para baixas frequências.

¹Valor obtido em [5]

Capítulo 3

Projeto da CREM

3.1 Introdução

Neste capítulo serão mostrados os procedimentos para a determinação de todos os componentes da câmara de reverberação eletromagnética. Dimensões físicas, sistema de portas, frequências de operação, tipos de antenas a serem usadas, são alguns parâmetros mostrados no decorrer do texto.

3.2 Faixa de Frequências de Operação

A especificação de uma faixa de valores de frequências a serem utilizadas é o primeiro passo para a determinação dos demais parâmetros de construção da CREM. A partir destes valores é que pode-se calcular as dimensões físicas da estrutura.

As frequências a serem empregadas limitam-se à estrutura encontrada no LEMA. Ou seja, aos aparelhos como geradores de potência, válvulas e outros dispositivos que são usados para irradiar potência e, também, às dimensões escolhidas para a CREM. Para o projeto foi escolhida uma faixa de frequências de $1,5\text{ GHz}$ a $2,7\text{ GHz}$. Só que como o LEMA dispõe do analisador de malhas que varre a faixa de 300 kHz a 3 GHz , pode-se construir antenas dipolo para frequências de 1 a 3 GHz .

Para esta faixa de frequências pode-se calcular a distância mínima entre o objeto sob teste e as paredes da câmara. Essa distância mínima é sugerida por [1], onde é determinado como sendo,

$$d_{min} = \frac{\lambda}{4} \quad (3.1)$$

onde λ é o comprimento de onda usado. Como adotou-se a faixa que compreende as frequências entre $1,5\text{ GHz}$ e $2,7\text{ GHz}$, calcula-se o valor da distância mínima entre objeto sob teste e paredes da câmara, partindo-se de que essa medida será determinada pela mais

Para a frequência $f_{max} = 2,7 \text{ GHz}$, temos

$$d_{min} = \frac{\lambda_{min}}{4} \quad (3.2)$$

onde

$$\lambda_{min} = \frac{c_0}{f_{max}} = \frac{3 \times 10^8}{2,7 \times 10^9} = 11,11 \text{ cm} \quad (3.3)$$

Assim,

$$d_{min} = 2,78 \text{ cm}$$

Com o resultado em mãos, fica acertado que a câmara não pode ter a distancia, entre objeto de teste e paredes da mesma, menor que $2,78 \text{ cm}$.

3.3 Dimensões Físicas da CREM

No projeto da CREM adotou-se um volume de 1 m^3 para a superfície exterior da câmara. Esse dimensionamento atende a duas questões:

1. Obedecer à distância mínima entre objeto sob teste e às paredes internas da câmara;
2. Desenvolver uma estrutura onde se torne possível testes em dispositivos de tamanho compatíveis com os utilizados nos dias atuais como placas de circuito impresso, pequenos aparelhos, etc.

A primeira condição é atendida, onde tem-se a distância mínima permitida entre o dispositivo de teste e as interfaces metálicas do interior da câmara. Admitindo-se um objeto de teste de tamanho compatível com o maior comprimento de onda a ser usado, no caso, $\lambda_{max} = 20 \text{ cm}$, temos no mínimo o comprimento de

$$l = 2\lambda_{min} + \lambda_{max} = 5,56 + 20 = 25,56 \text{ cm} \quad (3.4)$$

onde l representa o comprimento de uma parede a outra do interior da CREM.

A partir de [6] é especificado que o tamanho máximo para o objeto de teste é de 8% do volume da câmara. No caso de uma CREM de 1 m^3 é possível trabalhar com dispositivos de tamanhos razoáveis, comparados com aparelhos e circuitos hoje usados.

Como pode-se observar da equação (3.4), que serve apenas como demonstrativo da capacidade interna de exposição de objetos para ensaios, esta dimensão é bem inferior à escolhida para construção da câmara.

Partindo-se destas determinações de faixa de frequências, comprimento mínimo entre objeto sob teste e parede da CREM e volume máximo deste, entra-se em uma questão muito importante, que é a determinação da forma geométrica e dimensões da CREM.

3.3.1 Forma Geométrica da Câmara

Com base no artigo [5], fica explícito que não existe forma geométrica padrão para a construção de Câmaras de Reverberação e que o importante neste feito é o volume de operação que esta é capaz de ter.

Com tal informação escolhe-se a forma retangular para a câmara, como a referência [5], onde tem-se uma estrutura de mais fácil construção.

3.3.2 Lados da Câmara

Como já citado nas seções anteriores, o volume escolhido para a câmara foi de $1 m^3$. De acordo com [5] não se deve ter dimensões dos lados do retângulo (forma geométrica escolhida para a estrutura) como sendo frações inteiras uns dos outros, e também, não se deve ter lados múltiplos de comprimentos de ondas e/ou frações destes.

Assim sendo, foram atribuídas as dimensões dos lados correspondentes aos eixos x , correspondente à largura, e y correspondente à altura da câmara. Pela equação do volume de um prisma, obtém-se o valor do lado de componente z , correspondente ao comprimento.

Para a largura da câmara foi atribuído o valor de $81 cm$, para a altura o valor de $115 cm$ e o comprimento encontrado de $107 cm$. Estes valores atendem às especificações de [5].

3.4 Dimensões Elétricas da CREM

As dimensões elétricas da câmara estão intimamente ligadas aos comprimentos de onda dos sinais injetados em seu interior. Como tem-se uma faixa de valores de frequências e não uma frequência fixa, essas dimensões são variáveis. Isto é, para cada valor de frequência tem-se um dimensionamento elétrico específico.

O que se pode fornecer a respeito do assunto, são as dimensões máximas e mínimas, eletricamente falando. Um aspecto levado em consideração foi o compromisso de não se ter comprimentos de onda múltiplos ou frações dos comprimentos dos lados da câmara.

Os valores correspondentes em comprimentos de onda máximo e mínimo, respectivamente, são:

Máxima dimensão elétrica da câmara

Correspondente à menor frequência da faixa de operação, tendo com isso uma câmara com arestas dadas por:

$$\bullet x = 7,30\lambda_{min}, y = 10,35\lambda_{min} \text{ e } z = 9,63\lambda_{min}.$$

Mínima dimensão elétrica da câmara

Correspondente à menor frequência da faixa de operação, tendo com isso uma câmara de arestas dadas por:

- $x = 4,05\lambda_{max}$, $y = 5,75\lambda_{max}$ e $z = 5,35\lambda_{max}$.

Para uma frequência usual de $1,8\text{ GHz}$, que é a utilizada pelos aparelhos móveis celulares de tecnologia GSM, onde seu comprimento de onda é:

$$\lambda = \frac{3 \times 10^8}{1,8 \times 10^9} \simeq 0,1667\text{ m} = 16,67\text{ cm}$$

Fazendo as relações entre comprimento de onda e comprimento físico dos lados das paredes da CREM tem-se as seguintes dimensões elétricas da câmara para a frequência dada:

- $x = 4,86\lambda$, $y = 6,9\lambda$ e $z = 6,42\lambda$.

Isto prova que as paredes da CREM não possuem valores proporcionais aos comprimentos de onda máximo, mínimo e ao exemplificado. Esse é um aspecto que deve-se verificar quando for feitos experimentos de medida de susceptibilidade e interferência eletromagnética (IEM) em dispositivos, pois nestes casos deve-se tomar cuidado para não usar frequências em que o comprimento das paredes da câmara coincidam com os múltiplos dos respectivos comprimentos de onda. Não que o teste de IEM e susceptibilidade não funcione, mas os resultados serão menos precisos por conta da ressonância que poderá acontecer.

3.4.1 Número de Modos Propagantes

O cálculo do número de modos propagantes existentes no interior da câmara é feito para cada frequência separadamente. Ou seja, cada frequência trabalhada apresenta um determinado número de modos propagantes.

Desta forma, fazendo-se os cálculos para as frequências limites, usando a equação (2.2) dada por:

$$N_{mod} = \frac{8\pi abc f^3}{3c_0^3} - \frac{(a+b+c)f}{c_0} \quad (3.5)$$

onde a , b e c são as dimensões (em metros) da câmara dos eixos x , y e z , respectivamente. Assim, para a frequência máxima de $2,7\text{ GHz}$,

$$N_{mod_{f_{max}}} = \frac{8\pi(0,81)(1,15)(2,7 \times 10^9)^3}{3(3 \times 10^8)^3} - \frac{(0,81 + 1,15 + 1,07)(2,7 \times 10^9)}{3 \times 10^8} \quad (3.6)$$

$$N_{mod_{f_{max}}} \simeq 6060 \text{ modos ressonantes}$$

Para a frequência máxima de $1,5 \text{ GHz}$,

$$N_{mod_{f_{min}}} = \frac{8\pi(0,81)(1,15)(1,5 \times 10^9)^3}{3(3 \times 10^8)^3} - \frac{(0,81 + 1,15 + 1,07)(1,5 \times 10^9)}{3 \times 10^8} \quad (3.7)$$

$$N_{mod_{f_{min}}} \simeq 1029 \text{ modos ressonantes}$$

3.5 Espalhadores

Através de uma análise detalhada das características de espalhamento dos agitadores, contidos em [3], foram escolhidos para a Câmara de Reverberação os seguintes espalhadores:

- Espalhador de placas com seção cruzada - instalado na posição vertical (eixo y);
- Espalhador de 6 placas independentes - instalado na posição horizontal (eixo x);
- Espalhador de 6 placas conectadas - instalado na posição horizontal (eixo z).

O material constituinte dos espalhadores tem que ser de um metal ótimo condutor, para impor menos perdas e refletir ao máximo a energia nele incidida.

Como na aquisição do material para a construção da CREM optou-se pelo alumínio, por ser um metal de ótima condutividade e preço acessível no mercado, será empregado nos espalhadores este mesmo material.

3.5.1 Dimensão dos Espalhadores

Analisando a referência [3] é visto que as placas dos espalhadores possuem área correspondente a, aproximadamente, 4% da área das paredes da câmara. Esta é uma aproximação grosseira, pois não foi encontrada mais referências a respeito do assunto.

Levando-se em consideração este dado, é possível a determinação das dimensões das placas para os espalhadores.

Para os espalhadores de 6 placas conectadas e independentes, tem-se o mesmo dimensionamento, pois estas placas são quadradas e idênticas para os dois modelos, onde a única diferença entre eles é o fato das placas serem conectadas entre si no espalhador de 6 placas conectadas.

Normalizando a câmara como tendo área lateral de $1 m^2$, calcula-se a área da placa do espalhador com simples regra de três, visto que esta terá 4% da área lateral da CREM.

Efetuando os cálculos necessários obtém-se espalhadores de 6 placas (conectadas entre si ou não) com área individual das lâminas de $0,04 m^2$, ou seja, placas com lados de 20 cm de comprimento.

Para as placas do espalhador de seção cruzada temos uma diferença, porque as suas placas não são mais quadradas, e sim retangulares. De acordo com a análise de [3], vê-se que a aresta de maior comprimento tem aproximadamente 44,33% do comprimento do lado da parede da câmara. A aresta de menor tamanho do retângulo tem o equivalente a 24,5% do lado da parede da câmara.

Feito os cálculos deste dimensionamento, tem-se espalhadores de seção cruzada com placas de dimensões $x = 24,5 cm$ e $y = 44,33 cm$. Neste caso são duas placas de seção cruzada formando um ângulo de 90° , uma com relação a outra.

3.5.2 Local de Instalação dos Espalhadores

Os espalhadores de sinal, ou espalhadores de modo, serão instalados da seguinte forma:

1. Espalhador de placas de seção cruzada: posição vertical no canto direito da câmara;
2. Espalhador de 6 placas independentes: posição horizontal posicionado no sentido do eixo x ;
3. Espalhador de 6 placas conectadas: posição horizontal posicionado no sentido do eixo z .

3.5.3 Rotação dos Espalhadores

Um aspecto de extrema importância para a funcionalidade da câmara, garantindo as propriedades da homogeneidade do campo, diz respeito ao movimento de rotação dos eixos que contêm os espalhadores. Essa rotação garante um maior nível de agitação de modos objetivando melhor distribuição de campo.

Neste projeto não será explicado os procedimentos para controlar e fazer girar os agitadores de modos. Isso fica a cargo do projetista ou de outro pesquisador do assunto que queira dar continuidade, com mais informações, a este trabalho.

O movimento de rotação dos espalhadores deve atender ao sentido horário.

3.6 Antenas de Teste e Medição

O LEMA dispõe para o gerador de microondas empregado, antenas do tipo cornetas (Philips PM 7320X - 16dB) e antenas dipolos. Nesta Câmara de Reverberação serão

empregados os dois tipos de antenas, pois a depender dos resultados dos testes futuramente executados, se terá uma definição correta de qual melhor antena a se usar. Visto que em [5] usa-se uma antena do tipo corneta direcionada para um dos cantos da CREM.

A antena corneta Philips PM 7320X é mostrada na Figura 3.1, e possui as seguintes dimensões:

- $D = 7,7 \text{ cm}$
- $d = 3,5$

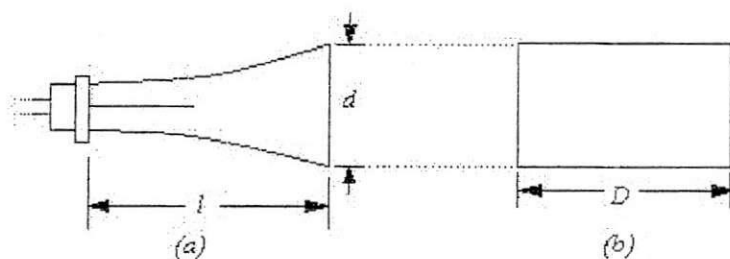


Figura 3.1: Antena Philips PM 7320X - 16dB, (a) vista lateral e (b) vista frontal

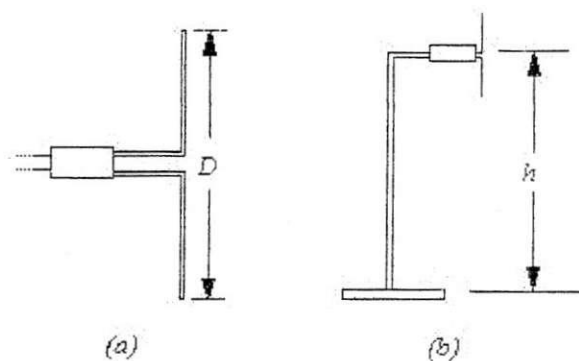


Figura 3.2: Antena dipolo

A antena dipolo normalmente usada em experimentos no LEMA, mostrada na Figura 3.2, possui dimensões:

- $D = 5,8 \text{ cm}$
- $h = 53,5 \text{ cm}$

3.6.1 Instalação das Antenas

Geralmente as antenas usadas nas câmaras de reverberação são dispostas internamente a estrutura. Como a câmara tratada neste projeto se trata de uma cavidade de pequeno porte, comparada com as construídas nas referências consultadas, pensou-se em instalar a antena emissora externamente à CREM, neste caso a corneta Philips PM 7320X.

A hipótese não é totalmente descartada, mas algumas dificuldades serão encontradas no caso de uma abertura para a colocação desta antena. Em primeiro lugar, para esta conexão entre antena e câmara, teria que se ter uma fenda numa das paredes da CREM. Com uma fenda aberta numa cavidade onde se tem energia acumulada em seu interior, e neste caso, em alta frequência, esta abertura poderia se comportar como uma antena, irradiando energia eletromagnética para o espaço livre.

Outra questão importante e diretamente relacionada com o que foi dito, está na construção de blindagem para a fenda, pois não é viável a conexão definitiva da antena com a câmara, visto que a corneta é usada em vários experimentos do laboratório (LEMA).

Quanto à antena dipolo, só é possível sua utilização no interior da câmara, pois é totalmente inviável sua colocação fora da câmara na tentativa de radiação através de uma fenda, como inicialmente pensado para a antena corneta.

Dentro destas e de outras dificuldades optou-se por colocar as antenas de emissão de campo dentro da CREM, pois a câmara, apesar de ter dimensões reduzidas diante das encontradas para baixas frequências, apresenta um espaço razoável e possível de se colocar qualquer uma das duas antenas disponíveis no laboratório.

3.7 Construção de um Objeto de Teste

Nesta seção mostra-se como construir um objeto para testes na câmara. De forma bem simples, o dispositivo de teste nada mais é do que um circuito formado por uma bobina de uma espira dentro de uma caixa metálica [2].

A superfície metálica de aproximadamente 25 cm é usada para dar certa blindagem ao circuito, simulando os efeitos de, por exemplo, um gabinete de computador. O loop dentro da carcaça metálica funciona como o circuito o qual se quer medir a susceptância à interferência eletromagnética. Essa bobina será alimentada por uma fonte de tensão através de dois cabos condutores. O sinal pode ser visualizado na tela de um osciloscópio, através de uma ponta de prova inserida no interior da câmara e da caixa metálica.

A espira do loop deve estar afastada das paredes metálicas da caixa entre 2 e 5 cm [2].

Um outro teste pode ser feito retirando-se a parte superior da carcaça metálica, onde o circuito fica exposto à radiação da antena sem qualquer proteção.

Para funcionar como objeto de teste, pode-se usar uma antena, onde esta receberá toda a radiação nela incidida e informará como está disposto o campo naquela posição da câmara. Uma antena dipolo seria recomendada.

3.8 Inserção de Cabos e Fios para Medição e Alimentação no Interior da Câmara de Reverberação

Um detalhe de muita importância, que foi de certa forma comentado na seção 3.6.1, diz respeito à inserção de condutores (cabos e fios) no interior da câmara para a alimentação de circuitos em teste, antenas, sistemas de medição, etc. Pois para esta introdução é necessário se fazer um orifício em uma das paredes da CREM.

Uma ou mais fendas em uma ou mais paredes da câmara, que trabalhará com comprimentos de onda muito pequenos, pode se tornar uma fonte de irradiação para o meio externo. Esse problema pode ser resolvido com uma blindagem bem projetada ou com outros métodos de blindagem de microondas, que não são de conhecimento pleno e por isso não serão citados.

Em [2] é sugerida a inserção de cabos no dispositivo sob teste através de um orifício em uma das paredes deste, com uma proteção de borracha em torno da fenda circular, como é mostrada na Figura 3.3. Usando desta mesma idéia propõe-se este mesmo artifício para a introdução de cabos e fios no interior da CREM.

Este assunto requer muito cuidado, pois como já mencionado este orifício pode se tornar uma antena. Esta recomendação de se colocar um material de borracha na abertura pode não ser uma solução para o problema. Não ficará a cargo deste projeto o estudo aprofundado das formas de blindagem de uma fenda numa câmara de reverberação, pois é interessante nesse documento apenas especificar o conhecimento básico para a construção de uma CREM.

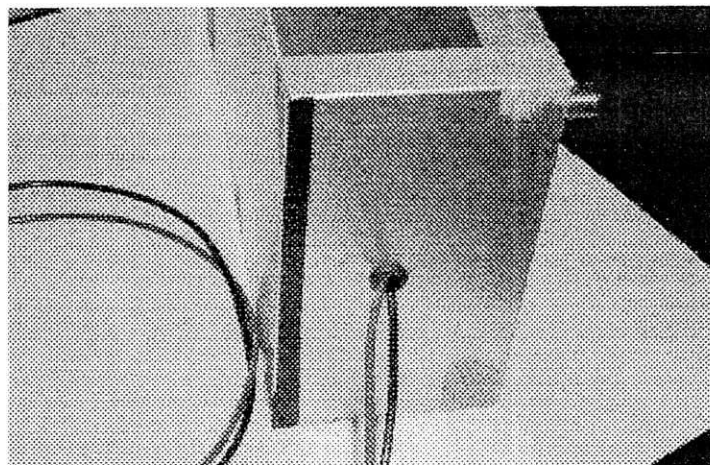


Figura 3.3: Método de inserção de cabos e fios condutores na CREM e no objeto sob teste

3.9 Especificação da Forma da Porta da Câmara

A fim de se ter uma câmara de reverberação com bastante facilidade de introdução de dispositivos de teste, antenas e sistema de medição, fica determinado a forma da porta como sendo retangular.

As dimensões da porta da CREM são exatamente aquelas correspondentes aos eixos x e y , já especificados. Ou seja, a porta para entrada e saída de objetos e aparelhos da câmara corresponderá a toda uma parede desta. Assim se torna mais fácil a movimentação de dispositivos no interior da estrutura.

3.9.1 Sistema de Dobradiças

Como este projeto ficou limitado a apresentação apenas do básico sobre a construção de uma CREM, fica a cargo do projetista ou de um pesquisador determinar a melhor forma para o movimento de abre e fecha da câmara.

Esse sistema de dobradiças da porta deve ser assistido por um profissional capaz de construir a câmara, visto que ele deve fornecer orientações quanto à facilidade e possibilidade de executar o sistema determinado e escolhido pelo projetista no material escolhido para as paredes da câmara (no caso alumínio).

3.9.2 Sistema de Encaixe da Porta com as Paredes

Teoricamente não deve-se ter fuga alguma de radiação através da conexão porta parede da câmara. Isso para um acoplamento perfeito entre a porta e as paredes da CREM. Também não foi alvo principal do estudo esse aspecto construtivo da estrutura.

3.9.3 Sistema de Tranca da Porta

Este sistema de tranca da porta fica à disposição do projetista e das possibilidades permitidas pelo material constituinte da câmara.

3.10 Medição e Determinação da Distribuição de Campo na CREM

Para a tarefa de medição e determinação da distribuição dos campos no interior da Câmara de Reverberação, é necessário o uso de uma ponta de prova com um medidor de radiação.

De posse deste sistema de medição de campo (ponta de prova e medidor), pode-se fazer uma varredura dentro da CREM com a ponta de prova e traçar um gráfico contendo toda a distribuição do campo eletromagnético. Assim, pode-se obter uma imagem completa do comportamento do campo e todo o interior da câmara.

Atualmente o Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados possui um medidor de radiação para frequências superiores às usadas neste projeto.

Capítulo 4

Recomendações e Conclusões

4.1 Introdução

Este capítulo traz as conclusões sobre o estágio supervisionado desenvolvido na Universidade Federal de Campina Grande, e algumas sugestões para futuros trabalhos ligados ao assunto abordado neste texto.

4.2 Conclusão

O projeto de construção de uma Câmara de Reverberação Eletromagnética foi uma idéia nova para o Laboratório de Eletromagnetismo e Microondas Aplicados, visto que neste ambiente ainda não se têm tal equipamento. O projeto em si trouxe muitos conceitos novos, onde grande parte deles não pôde ser estudado por questões práticas e pelo aprofundamento teórico ainda não obtido.

O atual projeto de construção de uma CREM fica sendo uma base para a concretização deste equipamento, que necessita de mais estudo e pesquisa, já que ele é de grande importância nos dias atuais para testes de susceptibilidade e CEM dos dispositivos usados no mundo.

Levando em consideração que, inicialmente, o estágio obrigatório para conclusão do curso em Engenharia Elétrica consistia no projeto e construção da Câmara de Reverberação, onde a implementação foi suspensa pela quantidade de tempo disponível, foi de grande aproveitamento prático e teórico na área de microondas.

4.3 Sugestões para Futuros Trabalhos

Como já mencionado, o projeto de construção de uma Câmara de Reverberação Eletromagnética mostrado neste trabalho, não atendeu a todas as especificações necessárias

para a inteira construção do aparelho. Muitas pendências foram registradas, tais como o sistema de dobradiças da porta, o sistema de acoplamento entre porta e parede da câmara, melhores espalhadores, exatas dimensões dos espalhadores, etc.

Por conta dessas deficiências neste trabalho é que vem-se a citar algumas sugestões para continuação e melhoramento deste projeto com o intuito de ser concretizada a implementação de uma CREM de mais alto nível de confiabilidade. Exemplos de indicações para futuras pesquisas são:

- Determinação exata das dimensões dos espalhadores a serem empregados, assim como a determinação dos melhores espalhadores e suas posições;
- Construção de um dispositivo de testes com maior complexidade e sistema de medição mais completo, com informações de potência, levantamento de gráficos, etc;
- Desenvolvimento de softwares para determinação da blindagem para a câmara e suas fendas, e modelagem do campo distribuído no interior da CREM.

Referências Bibliográficas

- [1] Arnaut, Luk R., "Compromizing and Optimizing the Desing of Special-Purpose Reverberation Chambers for HIRF Testing", Center for Electromagnetic and Time Metrology, National Physical Laboratory, Reino Unido.
- [2] Borgstrom, Erik J., "A Comparison of Methods and Results Using Semi-Anechoic and Reverberation Chamber Radiated RF Susceptibility Test Procedures in RTCA/DO-160D, Change One", Environ Laboratories, Girard Avenue South, Bloomington.
- [3] Bruns, Christian, Leuchtmann, Pascal, e Vahldieck, Ruediger, "Simulation and Comparison of Diferent Stirrer Types inside a Reverberation Chamber", Laboratory for Electromagnetic Fields and Microwave Electronics (IFH), Zurich, Suíça.
- [4] Collin, Robert E.: "Engenharia de Microondas", Editora Guanabara Dois S. A., Rio de Janeiro-RJ, 1979.
- [5] Hatfield, Mike O., Clegg, J., Arnaut, Luk, Eulig, Nils, Hoad, Richard, e Carter, Nigel, "Reverberation (Mode-Stirred) Chambers for Electromagnetic Compatibility", 2003.
- [6] Hoëppe, Frédéric, Gineste, Pierre-Nicolas, e Demoulin, Bernard, "Numerical Modeling for Mode-Stirred Reverberation Chambers", Laboratoire de Radiopropagation et Electronique (LRPE), Université des Sciences et Technologies de Lille, Villeneuve d'Ascq, França.
- [7] Kraus, John D., e Craver, Keith R., "Eletromagnetismo", Editora Guanabara Dois S. A., 2ª Edição, Rio de Janeiro-RJ, 1978.
- [8] Leferink, Frank B. J., e Etten, Wim C. van, "Practical Paper: Generating an EMC Test Field Using a Vibrating Intrinsic Reverberation Chamber", agosto de 2003.