



CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA



Universidade Federal  
de Campina Grande

PEDRO PAULO FERREIRA DO NASCIMENTO



Centro de Engenharia  
Elétrica e Informática

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO  
PROJETO DE EXPANSÃO DE UMA CÂMARA DE REVERBERAÇÃO PARA TESTES DE  
COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA



Departamento de  
Engenharia Elétrica



Campina Grande, Paraíba  
2018

PEDRO PAULO FERREIRA DO NASCIMENTO

PROJETO DE EXPANSÃO DE UMA CÂMARA DE REVERBERAÇÃO PARA TESTES DE  
COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
Elétrica.*

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Micro-ondas Aplicados

Orientador:

Professor Glauco Fontgalland, PhD.

Campina Grande  
2018

PEDRO PAULO FERREIRA DO NASCIMENTO

PROJETO DE EXPANSÃO DE UMA CÂMARA DE REVERBERAÇÃO PARA TESTES DE  
COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA

*Trabalho de Conclusão de Curso submetido à  
Coordenação do Curso de Engenharia Elétrica  
da Universidade Federal de Campina Grande  
como parte dos requisitos necessários para a  
obtenção do grau de Bacharel em Engenharia  
Elétrica.*

Área de Concentração: Eletromagnetismo e Micro-ondas Aplicados

Aprovado em        /        /

**Professor Rômulo Raimundo Maranhão do Valle**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Avaliador

**Professor Glauco Fontgalland, PhD.**  
Universidade Federal de Campina Grande  
Orientador, UFCG

# AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por todo carinho e apoio dado, os quais foram essenciais para todas as conquistas de minha vida.

Agradeço aos professores do LEMA, ao Prof. Rômulo e a Prof. Raquel e em especial ao Prof. Glauco Fontgalland pela orientação, paciência e dedicação em ajudar sempre quando foi necessário.

Agradeço aos colegas e amigos do Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado (LEMA) pela convivência no meu último ano de curso e pelas experiências e conhecimentos passados.

Agradeço a Erik Farias da Silva, pois a motivação desse trabalho surgiu de sua Dissertação de Mestrado e, ainda que não o conheça, seu trabalho foi imprescindível para a realização deste.

Agradeço a todos os amigos e colegas que fiz e conheci na Universidade, pelos momentos vivenciados, de diversão, alegria e tristeza e pelas conversas no Quiosque, a beira do lago da UFCG.

E agradeço ao contribuinte brasileiro pelo investimento na Educação Superior.

*“Grace to be born and live as variously as possible”*

Epitáfio de Frank O’Hara.

## RESUMO

O estudo de Compatibilidade Eletromagnética é cada vez mais relevante, sendo esta uma das etapas essenciais a qualquer projeto eletrônico, por conseguinte o exame de conformidade às normas reguladoras e o domínio dos mecanismos de testes é de extrema importância. Esses testes e essas análises devem ser realizados em ambientes específicos regidos por regulamentação internacional. A Câmara de Reverberação é um desses ambientes e tem se tornado extremamente popular para uso em estudos de Compatibilidade Eletromagnética. O presente trabalho objetiva desenvolver esse ambiente de testes, respeitando os limites impostos pela norma IEC 61000-4-21, para operações na frequência de 350 MHz. É apresentada a fundamentação teórica das Câmaras de Reverberação e se discute as particularidades do projeto da mesma, é apresentado um modelo computacional simulado pelo Método das Diferenças Finitas e os resultados obtidos são analisados face às recomendações da norma supracitada.

**Palavras-chave:** Câmara de Reverberação, Desvio Padrão, IEC-61000-4-21, Projeto.

# ABSTRACT

The study of Electromagnetic Compatibility gains relevance each year, it is already one of the essential stages when developing an electronic project, therefore the exam of the conformity to the regulation standards and the knowledge of the measurement procedures has vital importance. These analyses and measurements are realized in specific environments, which are regulated by international standards. The Reverberation Chamber is one of these environments and its use has gained popularity in Electromagnetic Compatibility. This work aims to develop such environment, following the IEC 6100-4-21 standard considerations, for the frequency of 350 MHz. The theoretical considerations of the Reverberation Chamber as well as the particularities of its project is show. Finally, a computational model is presented and simulated through the Finite Difference Method and the gathered results are analyzed following the recommendations of the aforementioned standard.

**Keywords:** Reverberation Chamber, Standard Deviation, IEC-61000-4-21, Project.

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Guia de onda retangular .....	17
Figura 2 – Componentes de campos dos modos TE e TM em uma cavidade ressonante .....	18
Figura 3 - Limite do desvio padrão na frequência pela Norma IEC 61000-4-21 .....	22
Figura 4 – Pontos de Medição na ZCU .....	23
Figura 5 – Modelo de Câmara de Reverberação com Agitador de Modos .....	24
Figura 6 – Número de Modos Suportados na CR Calculada .....	26
Figura 7 – Modelo Desenhado no software <i>CST Microwave Studio</i> .....	27
Figura 8 – Diagramas de Irradiação .....	27
Figura 9 – Parâmetro S11 da Antena .....	27
Figura 10 – Agitador de Modos proposto com dimensões discriminadas em milímetros .....	28
Figura 11 – Posições discretizadas para o AGM proposto .....	30
Figura 12 – Modelo da CR com detalhes dos elementos essenciais e com as dimensões indicadas .....	31
Figura 13 – Detalhes da CR com as sondas posicionadas nos vértices da ZCU 3 .....	32
Figura 14 – Campo Elétrico (XY) sem agitador .....	33
Figura 15– Campo Elétrico (YZ) sem agitador .....	33
Figura 16– Campo Elétrico (ZX) sem agitador .....	34
Figura 17 – Resultados de verificação de conformidade com a norma IEC 61000-4-21 .....	35

# LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dimensões da Câmara de Reverberação.....	26
Tabela 2 – Dimensões do Agitador de Modos.....	28
Tabela 3 – Dimensões das ZCUs analisadas .....	32
Tabela 4 – Desvio Padrão para cada eixo, na frequência de 350 MHz, sem AGM .....	34
Tabela 5 – Desvio Padrão para cada eixo, na frequência de 350 MHz, com AGM .....	34

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGM	Agitadores de Modos
CA	Câmara Anecoica
CEM	Compatibilidade Eletromagnética
CISPR	<i>Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques</i>
CR	Câmara de Reverberação
EUT	Equipamento Sob Teste
FDTD	Método das Diferenças Finitas
MoM	Método dos Momentos
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
OE	Ondas Eletromagnéticas
VT	Volume de Trabalho
VU	Volume Útil
ZCU	Zona de Campo Uniforme

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\vec{E}$	Vetor intensidade de campo elétrico
$\vec{H}$	Vetor intensidade de campo magnético
$\vec{D}$	Vetor densidade de fluxo elétrico
$\vec{B}$	Vetor intensidade de fluxo magnético
$\vec{j}$	Vetor densidade de corrente de condução
$\nabla$	Operador Nabla
$\sim$	Valor máximo
$\langle \rangle$	Média aritmética
$\zeta$	Eixo cartesiano (x, y ou z)
$\rho$	Densidade volumétrica da carga
$\epsilon_0$	Permissividade elétrica do vácuo
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do vácuo
$c$	Velocidade da luz no vácuo
$\sigma$	Condutividade elétrica do material
$\omega$	Frequência angular
$f_{mnp}$	Frequência de ressonância para os modos m, n e p
$f_{MFU}$	Menor frequência utilizável
$N$	Número de modos

# SUMÁRIO

Agradecimentos .....	iv
Resumo .....	vi
Abstract .....	vii
Lista de Ilustrações .....	viii
Lista de Tabelas .....	ix
Lista de Abreviaturas e Siglas .....	x
Lista de Símbolos .....	xi
Sumário .....	xii
1 Introdução.....	14
2 Fundamentação Teórica.....	15
2.1 Equações de Maxwell .....	15
2.2 Cavityde Retangular Ressonante.....	17
2.2.1 Campos Eletromagnéticos no Interior de uma Cavityde Retangular Ressonante .....	17
2.2.2 Densidade de Modos .....	19
3 Câmara de Reverberação.....	20
3.1 Zona de Campo Uniforme e Norma IEC 61000-4-21 .....	21
3.2 Tipos de Câmara de Reverberação.....	23
3.3 Usos e Aplicações .....	24
4 Projeto da Câmara de Reverberação.....	25
4.1 Projeto da Cavityde Retangular Ressonante.....	25
4.2 Projeto das Antenas.....	26
4.2.1 Antena Receptora .....	26
4.2.2 Antena Transmissora .....	28
4.3 Projeto dos Agitadores de Modos .....	28
5 Modelo Computacional da Câmara de Reverberação.....	29
5.1 Rotação do Agitador de Modos .....	29
6 Resultados e Discussão.....	31
7 Conclusão .....	36
Referências .....	37

# 1 INTRODUÇÃO

Das necessidades tecnológicas do mundo contemporâneo surge uma proliferação de equipamentos eletrônicos e de equipamentos sem fio os quais operam em frequências cada vez mais elevadas. Esse aumento da frequência, que pode ser observado sobretudo nos sistemas digitais, é responsável pela emissão de Ondas Eletromagnéticas (OE) com rico conteúdo espectral, os quais podem causar interferência em outros equipamentos elétricos ou eletrônicos (PAUL, 2006). Além disso, os esforços de inovação tecnológica buscam o funcionamento destes equipamentos em seus limites físicos, de modo que há uma incessante busca pela miniaturização dos mesmos, o que por sua vez eleva o nível de emissão de OE (SILVA, 2008), tendo em vista a redução das distâncias físicas entre os diferentes circuitos presentes nos dispositivos eletrônicos.

É importante observar que os equipamentos eletrônicos são, simultaneamente, fonte de OE, i.e. fonte de interferência, e suscetíveis às OE, i.e. suscetíveis à interferência, de outros equipamentos, portanto esses devem ser projetados de modo que sua operação não perturbe a operação de outros equipamentos e de modo que exista um nível de tolerância às emissões as quais eles estão suscetíveis. Ou seja, no desenvolvimento de um equipamento eletrônico, objetiva-se não só rapidez e eficiência, mas também Compatibilidade Eletromagnética (CEM) (PEDRO, 2017), e esta pode ser definida como “a habilidade de um equipamento, subsistema ou sistema, de compartilhar o espectro eletromagnético e executar ao mesmo tempo sua função sem interferir no seu funcionamento” (PAUL, 2006). Outrossim, deve-se observar que as OE emitidas pelos equipamentos podem ser conduzidas pelo ar, i.e. interferência irradiada, ou pelos cabos aos quais o equipamento está conectado, i.e. interferência conduzida.

Os níveis de emissão e de tolerância de OE aceitáveis em cada país, assim como as maneiras de mensurar estes níveis, são regidos por diversas normas, como as internacionais, oriundas, por exemplo, da *International Electrotechnical Commission* (IEC) e *Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques* (CISPR).

As medições desses níveis podem ser realizadas em diversos ambientes, cada um com suas diretrizes e particularidades, tais como a Câmara de Reverberação (CR) e as Câmaras Anecoicas (CA).

Desde a década de 1970, esforços para a realização de testes de CEM em CR são empenhados (CRAWFORD e KOEPKE, 1986), os quais foram consolidados quando do reconhecimento pela norma internacional IEC 61000-4-21 (COMPATIBILITY, 2011), além dessa diretriz, diversos usuários e pesquisadores das CRs sugeriram métricas de desempenho para melhor avaliar o ambiente da CR (PEDRO, 2017), entretanto o presente trabalho se limitará à análise pela norma internacional supracitada.

Para o caso de testes de CEM, a CR é utilizada para realizar testes de conformidade com interferência irradiada e isolamento efetiva (BÄCKSTRÖM, LUNDÉN e KILDAL, 2003), mas nas últimas décadas houve desenvolvimento de diversas aplicações para as CRs, sobretudo em testes *over-the-air* (em tradução livre, testes *pelo ar*), tais quais medições de eficiência de antenas, diagrama de irradiação e capacidade de antenas passivas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (CHEN, TANG, *et al.*, 2018). Porém o foco desse trabalho é o projeto da CR para testes de CEM.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Todo estudo que envolve campos eletromagnéticos deve partir das Equações de Maxwell, pois estas são a base para compreensão do comportamento de OE e resumem as leis do eletromagnetismo (SADIKU, 2004). Além disso, as equações são importantes para a compreensão de cavidades ressonantes, as quais são particularmente relevantes ao estudo de CRs, pois a CR pode ser considerada como uma cavidade ressonante (HILL, 1998). Por conseguinte, um breve resumo das Equações de Maxwell e da Teoria de Cavidades Eletromagnéticas Ressonantes é feito.

### 2.1 EQUAÇÕES DE MAXWELL

As Equações de Maxwell descrevem o comportamento macroscópico do campo elétrico ( $\vec{E}$ ) e da densidade de fluxo magnético ( $\vec{B}$ ), os quais são vetores ditos espaço-temporais.

Por razões de simplicidade à apresentação das equações, introduz-se dois vetores auxiliares, a densidade de fluxo elétrico ( $\vec{D}$ ) e a intensidade de campo eletromagnético

( $\vec{H}$ ), que são relacionados, respectivamente, aos vetores  $\vec{E}$  e  $\vec{B}$  de acordo com as equações (1) e (2). Em suma, são dependentes da polarização elétrica e magnética dos meios.

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} \quad (1)$$

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} \quad (2)$$

Em que  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do vácuo e  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica do vácuo.

Dois equações importantes são as da lei de Gauss e a lei de Gauss para o magnetismo, respectivamente, equações (3) e (4).

$$\nabla \cdot \epsilon_0 \vec{E} = \rho \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mu_0 \vec{H} = 0 \quad (4)$$

Em que  $\rho$  é a densidade de carga volumétrica em coulomb por metro cúbico.

A equação (3) descreve que o fluxo elétrico total,  $\vec{D}$ , que atravessa um determinado volume, é igual à carga líquida contida nesse volume. A equação (4) descreve que a densidade de fluxo magnético,  $\vec{B}$ , através de uma superfície fechada é nula, isso se sucede pois as linhas de fluxo de  $\vec{B}$  são linhas fechadas, isto é, não há cargas nas quais elas terminem ou comecem.

Outras duas equações importantes são a lei de Faraday e a lei de Ampere, respectivamente, equações (5) e (6).

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu_0 \vec{H} \quad (5)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma \vec{E} + j\omega\epsilon_0 \vec{E} \quad (6)$$

Em que  $\sigma$  é a condutividade elétrica do material.

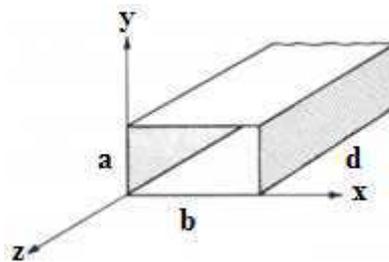
A equação (5) relaciona os campos elétrico ao magnético, descrevendo que um campo magnético variante no tempo gera uma circulação de campo elétrico, e vice-versa. A equação (6) relaciona o campo magnético em uma curva com a corrente que percorre

essa curva, sendo a corrente composta pela densidade de corrente de condução ( $\vec{J} = \sigma \vec{E}$ ) e densidade de corrente de deslocamento ( $\vec{J} = j\omega\epsilon_0 \vec{E}$ ).

## 2.2 CAVIDADE RETANGULAR RESSONANTE

Uma cavidade retangular ressonante pode ser considerada como um guia de onda retangular, tal qual ilustrado na Figura 1, porém terminado em um curto-circuito.

Figura 1 – Guia de onda retangular



Fonte: Adaptado de (COLLIN, 2001)

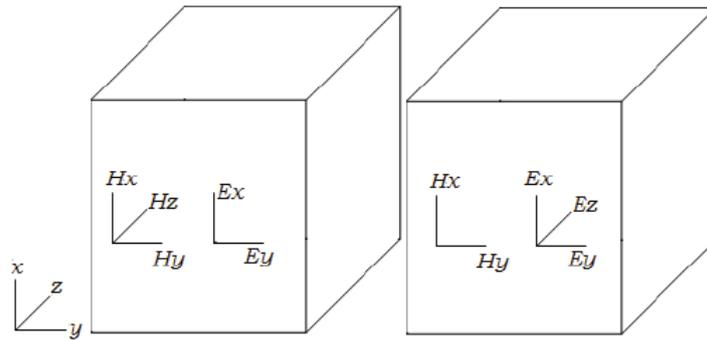
A teoria de cavidades eletromagnéticas ressonantes é bem documentada, (ARGENCE e KAHAN, 1968) (HILL, 1998) e diversos exemplos da teoria de cavidades sendo aplicadas no projeto da CR podem ser encontrados na literatura, (BÄCKSTRÖM, LUNDÉN e KILDAL, 2003), (BRUNS e R. VAHLDIECK, 2005). Porém a aplicação dessa teoria para a CR não é livre de problemas, ainda que ela seja extremamente útil em prever características importantes da CR.

Dada a existência de mecanismos de agitação de modos de uma CR, ela é em realidade, uma combinação de cavidades ressonantes (HILL, 1998).

### 2.2.1 CAMPOS ELETROMAGNÉTICOS NO INTERIOR DE UMA CAVIDADE RETANGULAR RESSONANTE

A solução dos campos eletromagnéticos no interior de uma cavidade retangular ressonante pode ser obtida partindo das equações do guia de onda (COLLIN, 2001). Aplicando-se as equações de Maxwell, mais especificamente as equações (5) e (6), a uma cavidade retangular de paredes metálicas, pode-se separar as equações de campo nos modos  $TE_{mnp}$  e  $TM_{mnp}$ , tal qual ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Componentes de campos dos modos TE e TM em uma cavidade ressonante



Fonte: (COLLIN, 2007) apud (SILVA, 2008)

De acordo com a geometria da Figura 2, os modos  $TE_{mnp}$  são dados pelas equações (7)-(12):

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

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

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

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

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

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

Com

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

E os modos  $TM_{mnp}$  são dados pelas equações (14)-(19):

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

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

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

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

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

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

Em que  $a$ ,  $b$  e  $d$  são, respectivamente, a altura, o comprimento e a largura da cavidade. E  $m$ ,  $n$  e  $p$  são os modos de ressonância nos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente.

### 2.2.2 DENSIDADE DE MODOS

Uma propriedade fundamental das cavidades ressonantes é a quantidade considerável de modos. Entende-se por modos, fisicamente, o número de possíveis caminhos de propagação da onda eletromagnética no interior da cavidade (SCHMITT, 2002) e, das equações (7)-(12) e (14)-(19), é possível perceber que cada modo é uma solução particular das equações e retorna diferentes valores para os vetores campos elétrico  $\vec{E}$  e intensidade do campo magnético  $\vec{H}$ .

Para uma cavidade retangular vazia, tem-se que a frequência de ressonância é dada pela equação (20) (HARRINGTON, 1961).

$$f_{mnp} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2} \quad (20)$$

Em que  $c$  é a velocidade da luz no vácuo, isto é, assume-se que no interior da CR tem-se  $\mu_0 = 1$  e  $\epsilon_0 = 1$ .

A menor frequência de ressonância, denominada de frequência de corte, é dada pelo modo dominante, isto é,  $f_{011}$  (BÄCKSTRÖM, LUNDÉN e KILDAL, 2003). É importante observar que, quando  $m, n, p \neq 0$ , há uma degeneração de modos entre  $TE_{mnp}$  e  $TM_{mnp}$  (HARRINGTON, 1961), ainda, se dois lados forem iguais, há também degeneração. E por degeneração, entende-se quando há uma mesma frequência de ressonância para diferentes valores de  $m, n, p$  ou  $a, b, d$  (BÄCKSTRÖM, LUNDÉN e KILDAL, 2003).

Para o caso da CR, a menor frequência utilizável,  $f_{MFU}$ , será aproximadamente o triplo da frequência de ressonância do modo dominante, vide equação (21) (COMPATIBILITY, 2011) (YI, KONG, *et al.*, 2012).

$$f_{MFU} \approx 3f_{011} \quad (21)$$

O número de modos excitados em uma determinada frequência é dado, aproximadamente pela equação (22) (BÄCKSTRÖM, LUNDÉN e KILDAL, 2003).

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

Entretanto, os resultados obtidos para a  $f_{MFU}$  e  $N(f)$  podem ser melhorados com base em técnicas que serão discutidas no tópico 3 Câmara de Reverberação.

### 3 CÂMARA DE REVERBERAÇÃO

A CR pode ser considerada como uma cavidade de ressonância eletricamente grande, blindada e construída com material condutor. Em seu interior são posicionados elementos que devem agitar os modos (YI, KONG, *et al.*, 2012), os quais são denominados Agitadores de Modos (AGM), cujos objetivos são atingidos por meio da revolução em torno de seu eixo a fim de alterar a geometria da CR e, por conseguinte, excitar novos modos, isto é, a CR se torna uma combinação de cavidades ressonantes.

O campo elétrico no interior da CR é composto pela soma vetorial das diversas ondas estacionárias geradas pelas múltiplas reflexões que ocorrem devido à característica

ressonante da CR (SILVA, 2008). No interior da estrutura, existe uma zona na qual o valor médio do campo eletromagnético é uniforme em qualquer polarização e essa uniformidade é obtida quando há uma excitação de um número mínimo de modos dentro da Câmara, os quais devem ser constantemente deslocados por mecanismos de agitação de modos (ARNAUT, 2001). Segundo (PEDRO, 2017), na literatura encontram-se referências a essa zona sendo denominada de Zona de Campo Uniforme (ZCU), Volume Útil (VU) ou Volume de Trabalho (VT), sendo ZCU a denominação mais usual.

Essa zona ou volume deve apresentar um campo eletromagnético com as seguintes características (ARNAUT, 2001) (BÄCKSTRÖM, LUNDÉN e KILDAL, 2003):

- Estatisticamente Isotrópico: “*Uniformidade estatística do fluxo de energia local em qualquer ponto no interior da ZCU*” (PEDRO, 2017);
- Homogêneo: Uniformidade estatística dos valores de campo elétrico em diferentes localidades da ZCU;
- Aleatoriamente Polarizado: Aleatoriedade das polarizações de campos eletromagnéticos no interior da ZCU;

Por *uniformidade estatística*, entende-se que as variações de valores, máximos ou médios, obtidos para as grandezas analisados estão prescritos dentro de intervalos pré-definidos, em geral, regidos por normas internacionais. (BÄCKSTRÖM, LUNDÉN e KILDAL, 2003).

### 3.1 ZONA DE CAMPO UNIFORME E NORMA IEC 61000-4-21

A norma IEC 61000-4-21 estabelece os limites do valor de desvio padrão do campo elétrico para os quais é possível considerar que o campo elétrico no interior da CR seja uniforme. Essa uniformidade é importante, pois os Equipamentos sob Teste (EUT) devem ser posicionados nas zonas em que há uniformidade, ou seja, os testes são realizados no volume dessa zona. Define-se, então, a Zona de Campo Uniforme (ZCU), como a zona ou volume no interior da CR em que os limites de desvio padrão estabelecidos na norma sejam respeitados. Esses limites dependem da frequência de operação e seus valores estão ilustrados na Figura 3.

O procedimento para a medição prescrito pela norma é estabelecer 8 (oito) pontos de medição, os quais estão posicionados nas arestas do cubo que delimita a ZCU, vide

Figura 4, e medir o valor máximo de campo elétrico em cada ponto. Em seguida calcula-se o valor médio dos valores máximos de campo obtidos para cada uma das 8 (oito) posições de medição, vide equação (23), e o valor médio do campo elétrico em todas as 24 (vinte e quatro) medições, isto é, medições em  $x$ ,  $y$  e  $z$ , para cada um dos pontos que compõe os vértices da ZCU, vide equação (24).

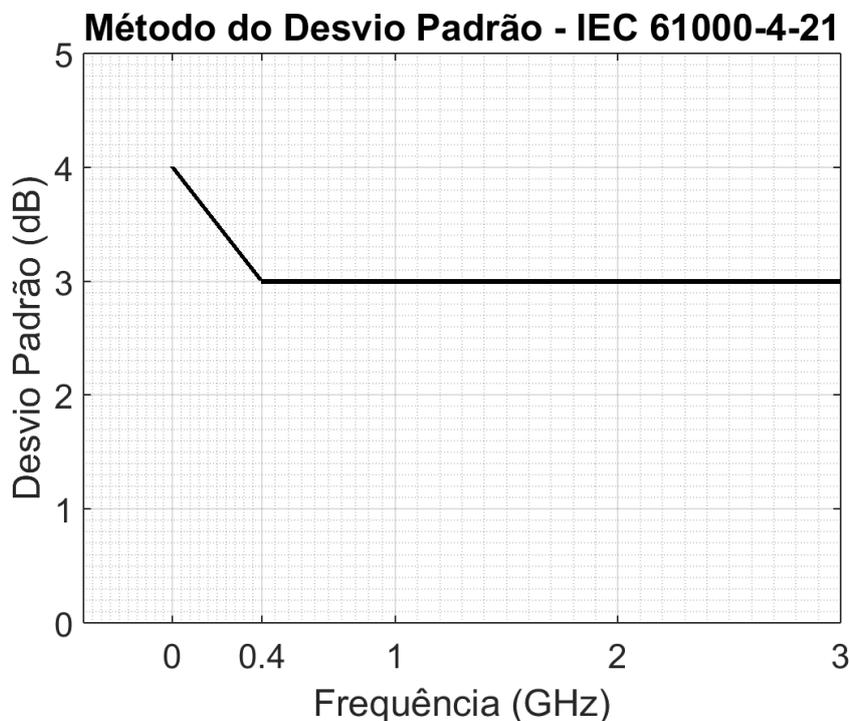
Munidos dos valores médios dos campos elétricos máximos, é possível calcular o desvio padrão para cada eixo e o desvio padrão total, também nomeado desvio padrão global, segundo as equações (25) e (26).

$$\langle \tilde{E}_\zeta \rangle = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \tilde{E}_{\zeta,i} \quad (23)$$

Em que  $\zeta$  diz respeito aos eixos cartesianos ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ), e  $i$  diz respeito ao número de amostra da medição realizada.

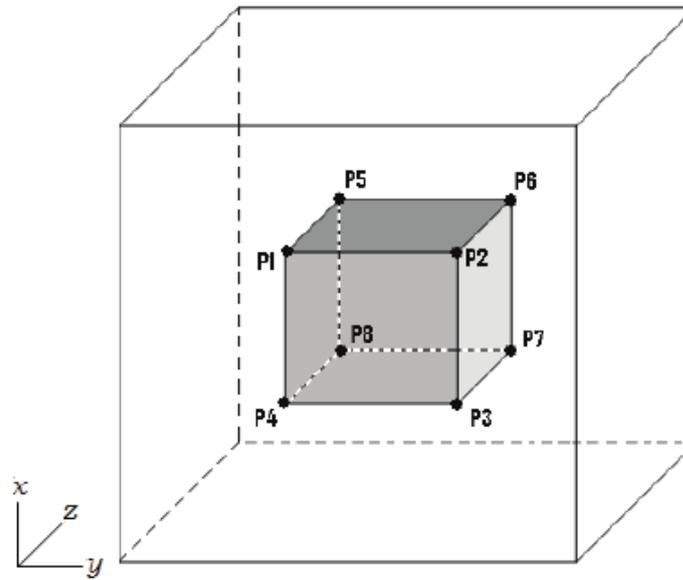
$$\langle \tilde{E}_{xyz} \rangle = \frac{1}{3} \sum_{\zeta=x,y,z} \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \tilde{E}_{\zeta,i} = \frac{1}{3} \sum_{\zeta=x,y,z} \langle \tilde{E}_\zeta \rangle \quad (24)$$

Figura 3 - Limite do desvio padrão na frequência pela Norma IEC 61000-4-21



Fonte: O autor

Figura 4 – Pontos de Medição na ZCU



Fonte: Adaptado de (SILVA, 2008)

$$\sigma_{\zeta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (\tilde{E}_i - \langle \tilde{E}_{\zeta} \rangle)^2}{8 - 1}} \quad (25)$$

$$\sigma_{xyz} = \sqrt{\frac{\sum_{\zeta=\{x,y,z\}} \sum_{i=1}^8 (\tilde{E}_{\zeta,i} - \langle \tilde{E}_{xyz} \rangle)^2}{24 - 1}} \quad (26)$$

Dado que a norma discute os valores em termos de decibéis, faz-se necessário a conversão dos valores de desvio padrão obtidos utilizando a expressão da equação (27).

$$\sigma_{\zeta_{dB}} = 20 \log \left( \frac{\sigma + \langle \tilde{E}_{\zeta} \rangle}{\langle \tilde{E}_{\zeta} \rangle} \right) \quad (27)$$

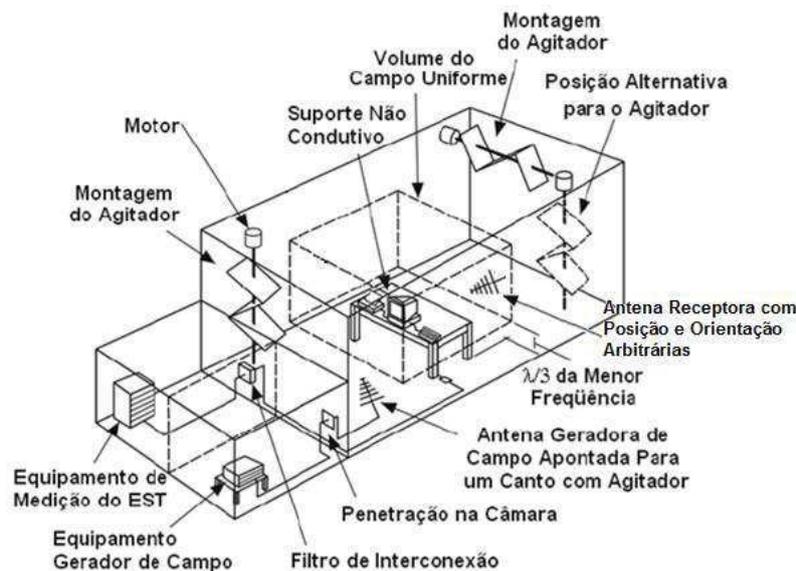
### 3.2 TIPOS DE CÂMARA DE REVERBERAÇÃO

Segundo (LEHMAN, 1993) apud (BÄCKSTRÖM, LUNDÉN e KILDAL, 2003), uma CR deve satisfazer duas condições, a primeira é ter uma forma complexa, o que pode ser atingido utilizando-se de AGMs. E a segunda condição é que os números de modos existentes na CR sejam muito elevados.

A fim de satisfazer essas condições e aumentar a uniformidade de campo, diversas propostas de construção de CR foram apresentadas, as quais em menor ou maior grau dizem respeito a alteração da geometria e aumento da complexidade da CR, a saber, CRs com paredes irregulares, com paredes vibratórias, com pás giratórias, ou combinações destes, dentre outras.

O modelo mais estudado é, provavelmente, o de pás giratórias, o qual pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 – Modelo de Câmara de Reverberação com Agitador de Modos



Fonte: (GARBE, 1999-2002) apud (SILVA, 2008)

As pás giratórias têm o objetivo de agitar os modos no interior da Câmara e, portanto, podem ser chamados de Agitadores de Modos. É importante observar que não há uma geometria exclusiva para os mesmos, podem ser tridimensionais (UBIN, VOGT-ARDATJEW, *et al.*, 2015) ou planares (SILVA, SANTOS, *et al.*, 2006) e resultados experimentais mostram que os melhores agitadores são os que possuem geometrias mais complexas (CLEGG, MARVIN, *et al.*, 2005).

### 3.3 USOS E APLICAÇÕES

As aplicações de Câmaras de Reverberação são tradicionalmente para testes de Compatibilidade Eletromagnética (CRAWFORD e KOEPKE, 1986) e seu uso é permitido por diversos padrões militares e comerciais (COMPATIBILITY, 2011)

objetivando diversas aplicações. Segundo (LEO e PRIMIANI, 2005) essas aplicações percorrem desde a aviação, à indústria automobilística e testes de produtos para consumidores.

## 4 PROJETO DA CÂMARA DE REVERBERAÇÃO

O projeto da CR se baseará no modelo de Câmara com agitadores, ilustrado na Figura 5, como essencialmente a CR é composta por Cavidade Retangular, Antena Transmissora, Antena Receptora e Agitador de Modos, estes elementos serão simulados no software *CST Design Studio*®.

A metodologia adotada e as diretrizes do desenvolvimento do projeto serão feitos de acordo com os procedimentos adotados na Dissertação de Mestrado de Erik Farias da Silva, cujo trabalho foi projetar, simular, construir e validar o modelo de uma CR de menor frequência utilizável,  $f_{MFU}$ , igual a 700 MHz (SILVA, 2008),

O desenvolvimento do projeto pode ser dividido em três etapas, (i) projeto da cavidade retangular ressonante; (ii) projeto das antenas e (iii) projeto dos agitadores de modos, estes serão discutidas, respectivamente em 4.1, 4.2 e 4.3.

### 4.1 PROJETO DA CAVIDADE RETANGULAR RESSONANTE

É nesta etapa que se realiza o dimensionamento físico da CR. O ponto de partida se dá com a definição da menor frequência utilizável,  $f_{MFU}$ , isto é, a menor frequência para a qual os testes poderão ser realizados. Escolheu-se a frequência de 350 MHz.

Como (LEHMAN, 1993) apud (BÄCKSTRÖM, LUNDÉN e KILDAL, 2003), observa, o número de modos da CR deve ser tão alto quanto possível. Entretanto, resultados empíricos indicam que para a  $f_{MFU}$ , o número de modos deve ser superior a 60 (SILVA, 2008).

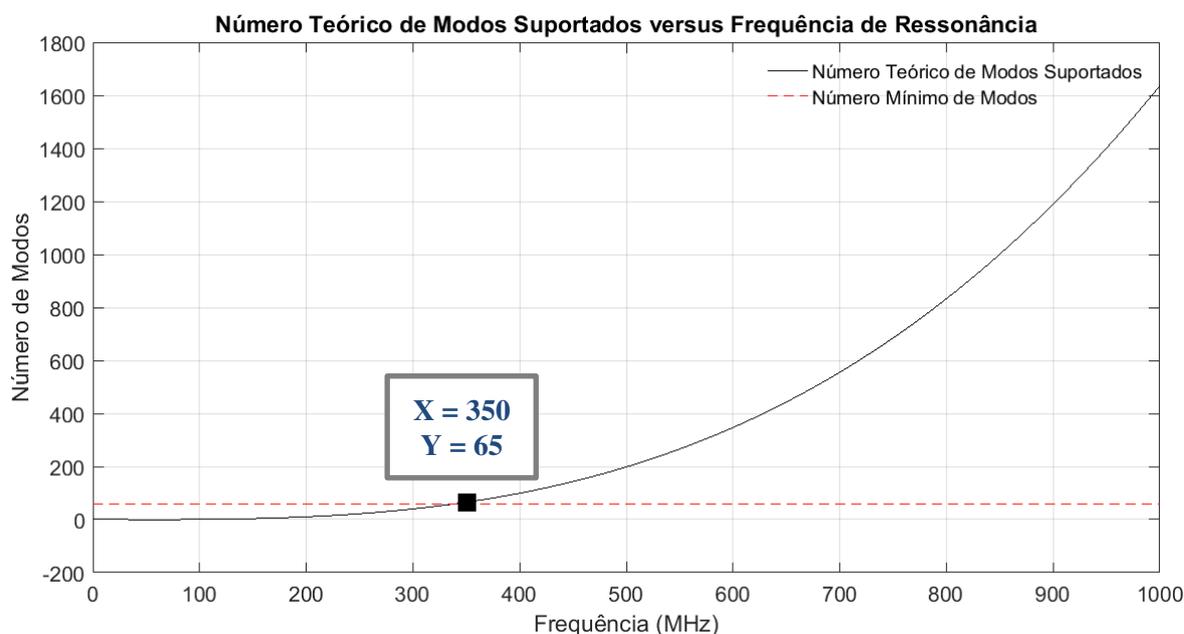
Com auxílio das equações (20), (21) e (22) é possível obter valores de altura, largura e comprimento da cavidade ressonante que satisfazem as condições supracitadas. A Tabela 1 contém um resumo das dimensões calculadas, as quais resultam em valores da menor Frequência Utilizável,  $f_{MFU} = 348,81 \text{ MHz}$  e do Número de Modos,  $N(350\text{MHz}) = 65 \text{ modos}$ . Como o número de modos é uma função da frequência,

obteve-se os valores para frequências de até 1 GHz, cujos resultados podem ser observados na Figura 6.

Tabela 1 – Dimensões da Câmara de Reverberação

<b>CÂMARA DE REVERBERAÇÃO - DIMENSÕES</b>			
	Altura (cm)	Largura (cm)	Comprimento (cm)
CR Total	160	180	185

Figura 6 – Número de Modos Suportados na CR Calculada



Fonte: O autor

## 4.2 PROJETO DAS ANTENAS

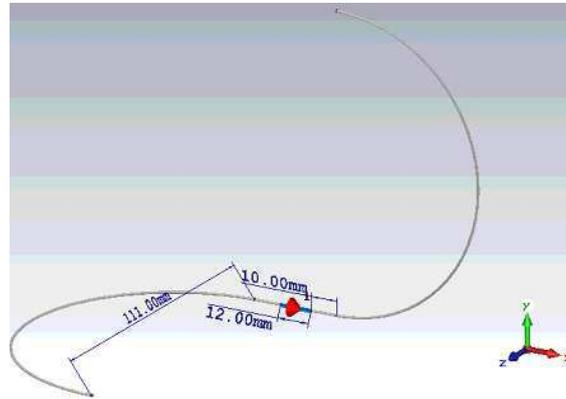
### 4.2.1 ANTENA RECEPTORA

A antena receptora deve, idealmente, funcionar como um sensor de campo isotrópico, para tanto utilizou-se o modelo de irradiador quase-isotrópico proposto por (PIRES, FONTGALLAND, *et al.*, 2006) e modificações foram feitas de modo a obter a frequência de ressonância em 350 MHz.

Após análises paramétricas, o modelo final foi obtido por meio do software *CST Design Studio* e está ilustrado na Figura 7.

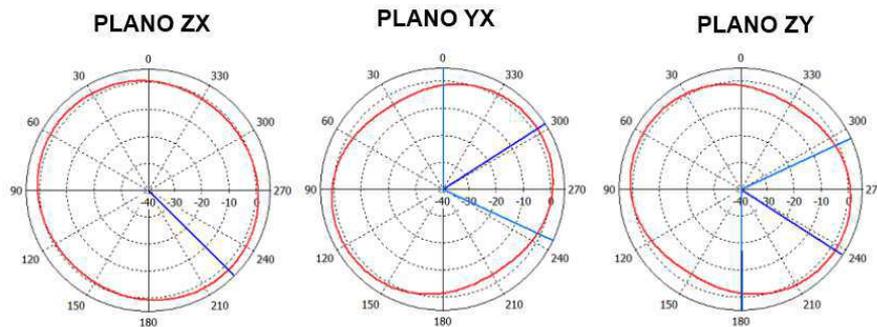
Analisou-se, também os Diagramas de irradiação, Figura 8 e os Parâmetros S11, Figura 9, para a faixa de 300 MHz – 1000 MHz pois para as simulações da CR que foram realizadas escolheu-se essa faixa.

Figura 7 – Modelo Desenhado no software *CST Microwave Studio*



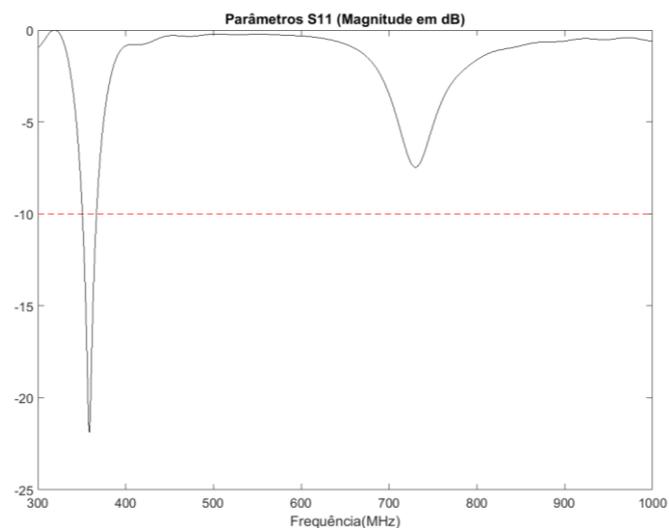
Fonte: O autor

Figura 8 – Diagramas de Irradiação



Fonte: O autor

Figura 9 – Parâmetro S11 da Antena



Fonte: O autor

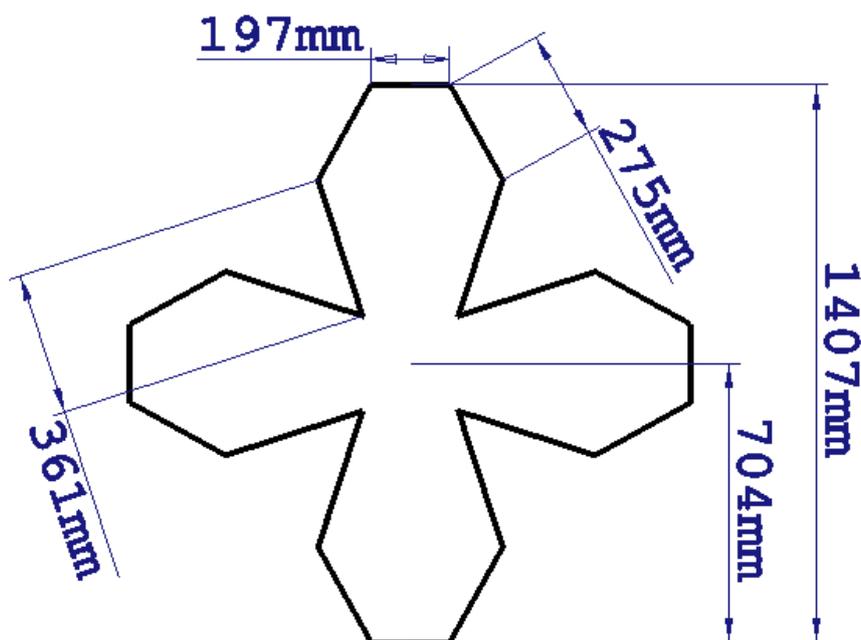
#### 4.2.2 ANTENA TRANSMISSORA

A frequência de ressonância da antena transmissora dependerá, sobretudo, das frequências relevantes às medições. Como o presente trabalho objetiva validar a CR para a frequência de 350 MHz, utilizou-se para a antena transmissora o mesmo projeto da antena receptora.

#### 4.3 PROJETO DOS AGITADORES DE MODOS

O AGM pode ser tridimensional ou planar. Por razões de esforço computacional optou-se por desenvolver um modelo planar afixado a uma das paredes da CR. Ele está ilustrado na Figura 10 com os detalhes de suas dimensões, as quais foram dadas em milímetros e em termos do comprimento de onda  $\lambda$ , vide Tabela 2.

Figura 10 – Agitador de Modos proposto com dimensões discriminadas em milímetros



Fonte: O autor

Tabela 2 – Dimensões do Agitador de Modos

AGITADOR DE MODOS - DIMENSÕES					
Em milímetros	197	275	361	704	1407
Em termos de $\lambda$ ( $f = 350\text{MHz}$ )	$0,23 \lambda$	$0,32 \lambda$	$0,42 \lambda$	$0,82 \lambda$	$1,64 \lambda$

## 5 MODELO COMPUTACIONAL DA CÂMARA DE REVERBERAÇÃO

Diversos são os desafios quando do projeto de uma CR. Não existe uma fórmula ou um procedimento cabal para seu desenvolvimento (SILVA, 2008). Normas, tais quais a IEC 61000-4-21 apenas apresentam diretrizes gerais para que uma Cavidade de Ressonância Retangular seja considerada uma CR (COMPATIBILITY, 2011). Entretanto, muitos são os estudos científicos que propõe diretrizes para o projeto de uma CR (BONNET, VERNET, *et al.*, 2005) (YI, KONG, *et al.*, 2012) , os quais são justificados por abordagens computacionais e abordagens empíricas.

Vários estudos realizaram simulações de CR utilizando-se de métodos no domínio do tempo, tal qual o das Diferenças Finitas (FDTD) (BONNET, VERNET, *et al.*, 2005), porém métodos com outras abordagens, como análise no domínio da frequência também largamente utilizados (BRUNS e R. VAHLDIECK, 2005).

O presente trabalho optou por realizar simulações utilizando-se do método da FDTD, pois com ele é possível representar o comportamento do campo no interior da CR no domínio do tempo, permitindo uma visualização mais intuitiva para quando se insere um AGM. Entretanto, quanto maior o tempo simulado, maior será o esforço computacional exigido e, a depender do tamanho da CR, e do tamanho e complexidade do AGM, simulações com duração elevada são frequentes. Exemplos na literatura excedendo 40 horas de simulação podem ser encontrados (CLEGG, MARVIN, *et al.*, 2005).

Portanto, é dever do projetista analisar as limitações do hardware para a simulação, e com base em seu conhecimento dos campos no interior de uma CR, desenvolver um modelo computacional capaz de representar a CR adequadamente.

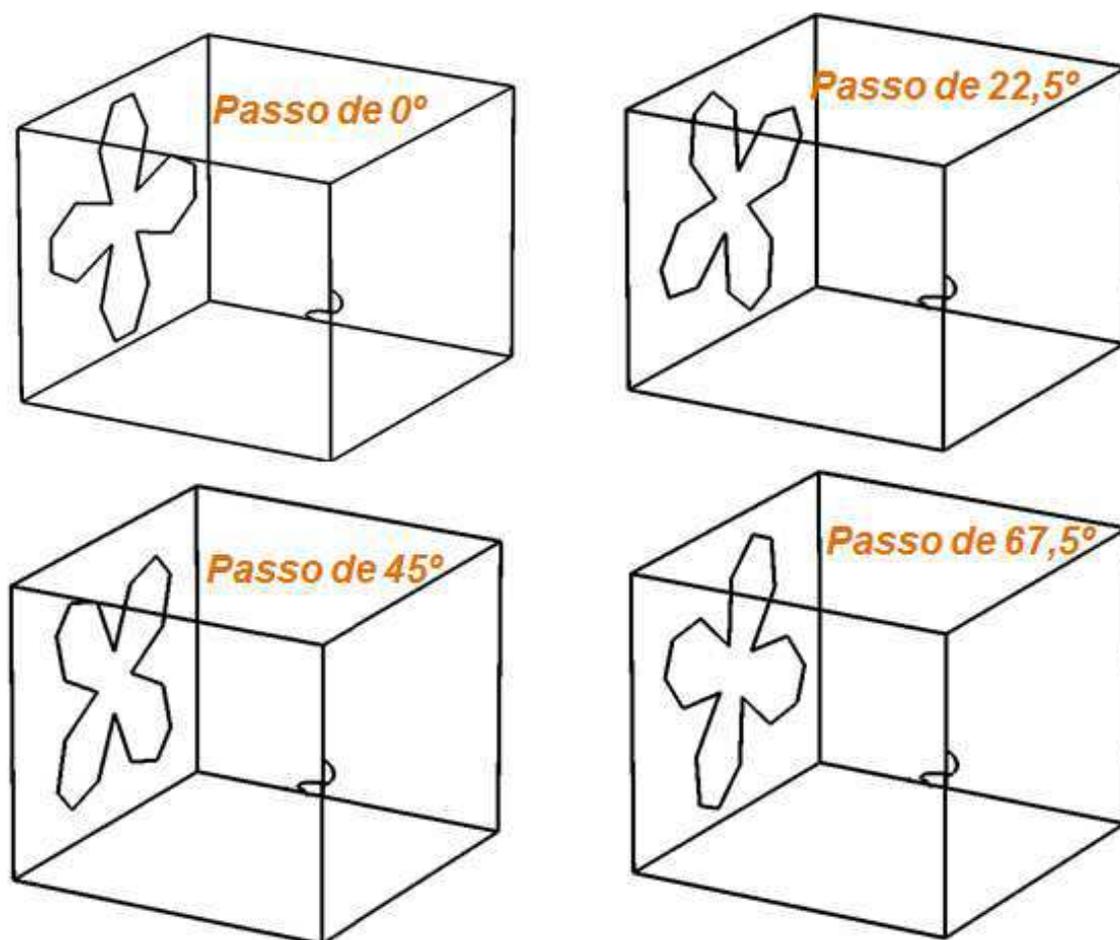
### 5.1 ROTAÇÃO DO AGITADOR DE MODOS

Para o caso em que o AGM roda continuamente, há desafios de representação das posições de rotação do AGM tendo em vista a necessidade de amostras em tempo

discreto. Entretanto, dada a necessidade de um esforço computacional elevado para realizar esse tipo simulação, e dada a simetria do AGM proposto, decidiu-se por discretizar a rotação do mesmo em 4 (quatro) passos, a saber,  $0^\circ$ ;  $22,5^\circ$ ;  $45^\circ$  e  $67,5^\circ$ , a amostra seguinte,  $90^\circ$ , tem a mesma posição da amostra de  $0^\circ$ . Essa mesma solução foi utilizada por (HUANG, ZHANG e LIU, 2005) e por (SILVA, 2008). Os diferentes passos e suas posições na CR podem ser observados na Figura 11.

A cada nova posição assumida pelo AGM, realiza-se uma simulação independente da anterior e os dados são coletados. Findada as simulações, tem-se, para cada ZCU,  $8 * n$  pontos, em que  $n$  é o número de passos, portanto no caso analisado existem 32 (trinta e dois) pontos. Em cada ponto são obtidos valores para o campo elétrico nas três direções ( $x, y$  e  $z$ ) e com base neles é possível calcular os valores de desvio padrão seguindo as equações (23)-(27).

Figura 11 – Posições discretizadas para o AGM proposto



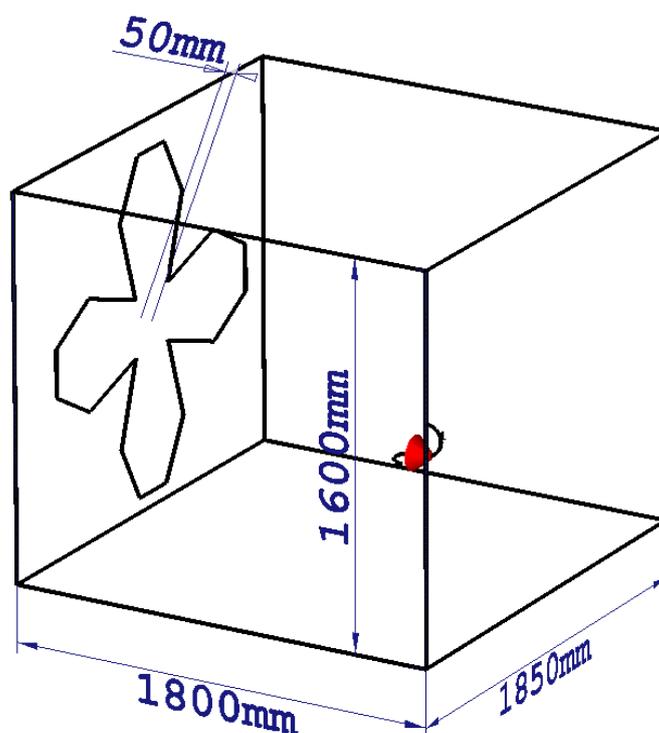
Fonte: O autor

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A CR foi simulada no software *CST Design Studio*®, tal qual o modelo ilustrado na Figura 12, o qual contém o AGM e a Antena Transmissora. O papel da Antena Receptora é feito por sondas de campo elétrico inseridas no interior da CR.

Em relação ao AGM, ele está posicionado a 50mm de distância da parede da CR, distância esta relativa ao eixo do motor que deve ser utilizado para realizar a rotação do AGM.

Figura 12 – Modelo da CR com detalhes dos elementos essenciais e com as dimensões indicadas



Fonte: O autor

Analisou-se os campos elétricos para 3 (três) ZCU por meio das sondas de campo elétrico em cinco simulações independentes da CR: (i) Sem Agitador; (ii) Com Agitador em 0°; (iii) Com Agitador em 22,5°; (iv) Com Agitador em 45° e (v) Com Agitador em 67,5°. Essas sondas foram posicionadas em cada um dos vértices das ZCUs analisadas e com isso se obtém os valores do vetor campo elétrico em cada eixo para cada ponto.

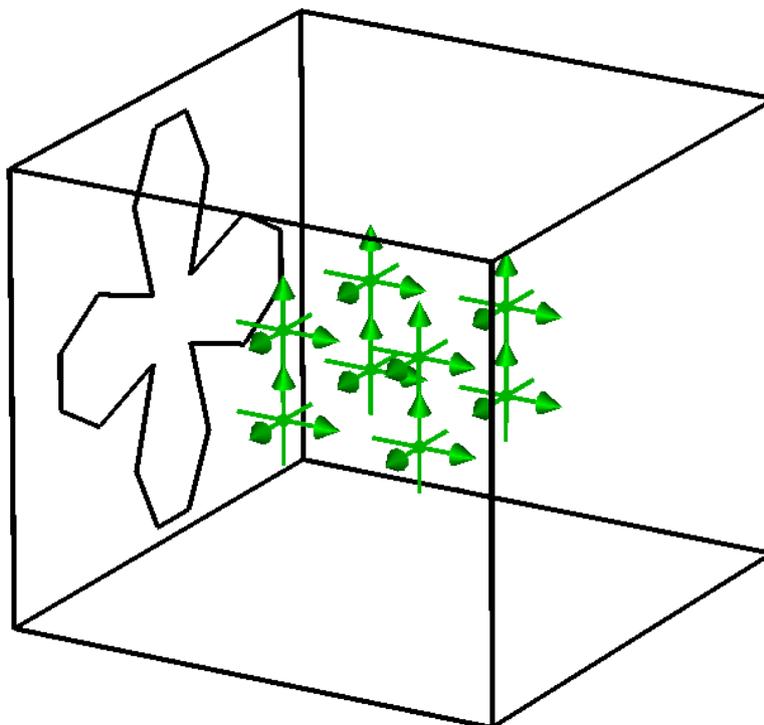
As dimensões das ZCUs foram discriminadas na Tabela 3, em termos de altura, largura e comprimento e em termos da distância da ZCU à parede da CR.

Para fins de ilustração, identificou-se na Figura 13 as sondas posicionadas nos vértices da menor ZCU analisada, ZCU 3.

Tabela 3 – Dimensões das ZCUs analisadas

<b>ZONAS DE CAMPO UNIFORME - DIMENSÕES</b>				
IDENTIFICAÇÃO	ALTURA (mm)	LARGURA (mm)	COMPRIMENTO (mm)	DISTÂNCIA À PAREDE DA CR
ZCU 1	1171	1371	1421	$\lambda/2$
ZCU 2	1028	1228	1278	$2\lambda/3$
ZCU 3	742	942	992	$\lambda$

Figura 13 – Detalhes da CR com as sondas posicionadas nos vértices da ZCU 3



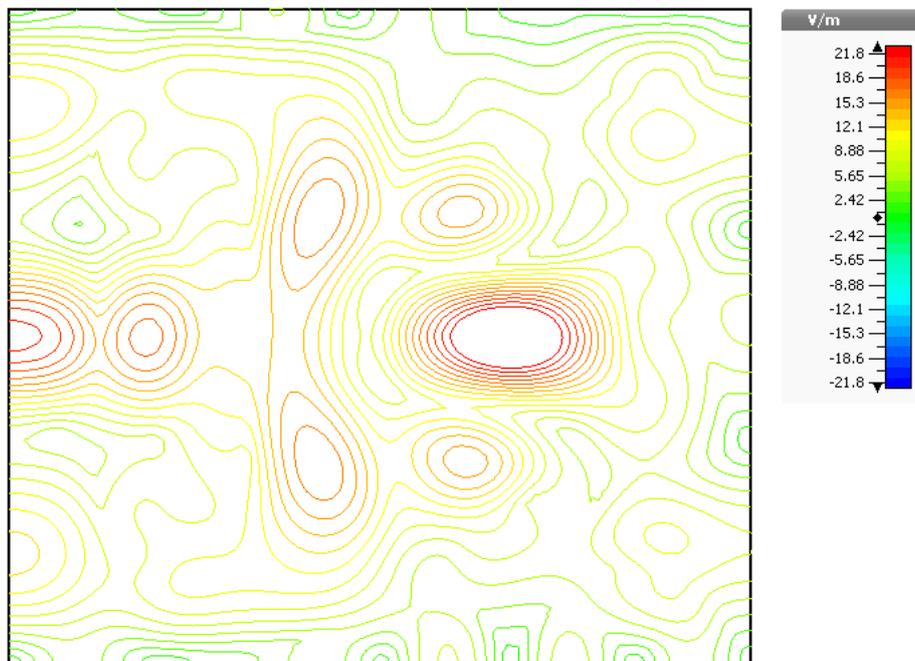
Fonte: O autor

Com auxílio dos Monitores de Campo do software, analisou-se o perfil do campo elétrico para a frequência de 350 MHz no caso sem agitador. Posicionou-se a sonda na metade da CR e o resultado do campo elétrico para os planos XY, YZ e ZX são ilustrados nas Figura 14, Figura 15 e

Figura 16, respectivamente. Destas figuras, é possível observar a variação da intensidade de campo elétrico no interior da CR, de modo que para o campo ser estatisticamente uniforme serão necessárias alterações no interior da CR e para tal se utilizará um AGM.

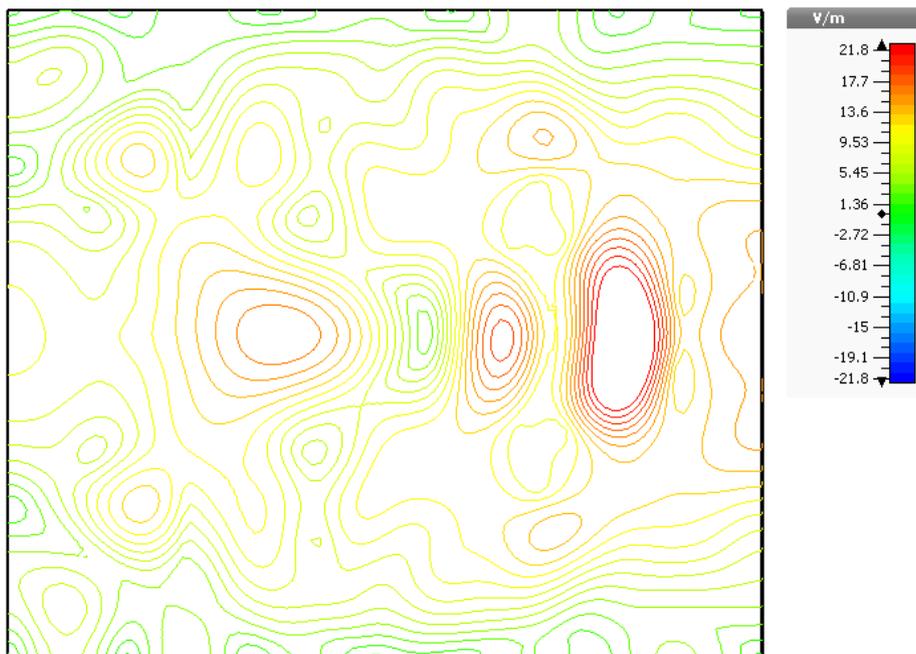
Com base nos valores de campo elétrico medidos e com auxílio das equações (23) a (27), calculou-se os valores de desvio padrão para cada um dos eixos e o desvio padrão total na frequência de 350 MHz, para o caso sem e com AGM, cujos resultados estão descritos, respectivamente, na Tabela 4 e Tabela 5.

Figura 14 – Campo Elétrico (XY) sem agitador



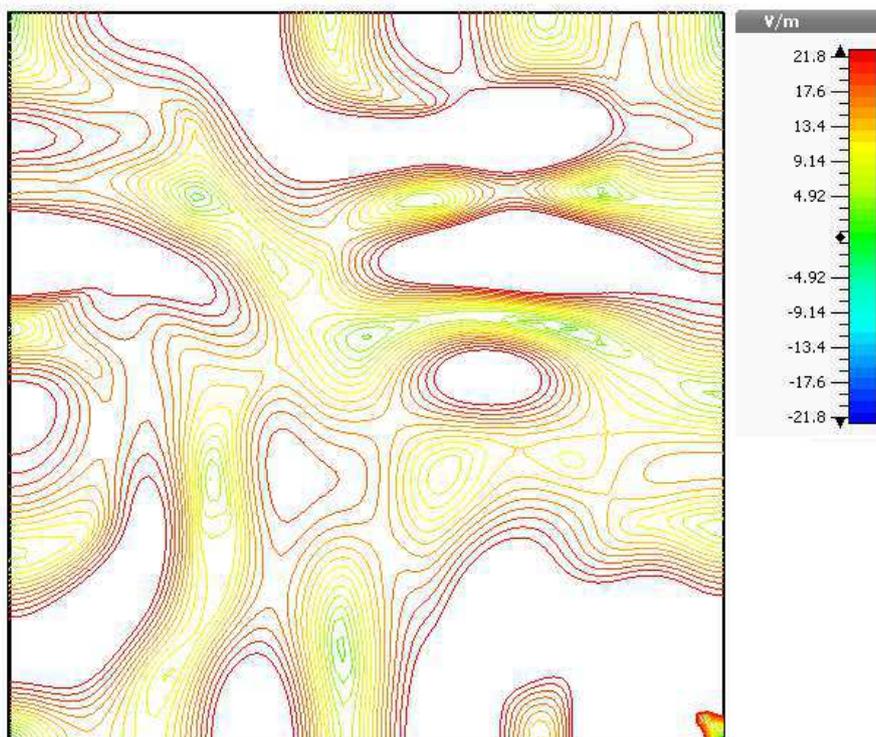
Fonte: O autor

Figura 15– Campo Elétrico (YZ) sem agitador



Fonte: O autor

Figura 16– Campo Elétrico (ZX) sem agitador



Fonte: O autor

Tabela 4 – Desvio Padrão para cada eixo, na frequência de 350 MHz, sem AGM

Desvio Padrão ( $f = 350 \text{ MHz}$ ) sem AGM				
IDENTIFICAÇÃO	$\sigma_x$ (dB)	$\sigma_y$ (dB)	$\sigma_z$ (dB)	$\sigma_{total}$ (dB)
ZCU 1	3,99	3,46	4,59	5,46
ZCU 2	2,84	4,76	4,05	4,35
ZCU 3	2,13	3,17	1,77	4,44

A análise de conformidade dos resultados é feita com base nos valores de desvio padrão calculados, que, segundo a norma IEC-61000-4-21, não deve exceder 3,125 dB em 350 MHz, vide Figura 3.

Como pode ser observado na Tabela 4, para o caso sem AGM, nenhuma das ZCUs definidas satisfaz a condição da norma supracitada.

Tabela 5 – Desvio Padrão para cada eixo, na frequência de 350 MHz, com AGM

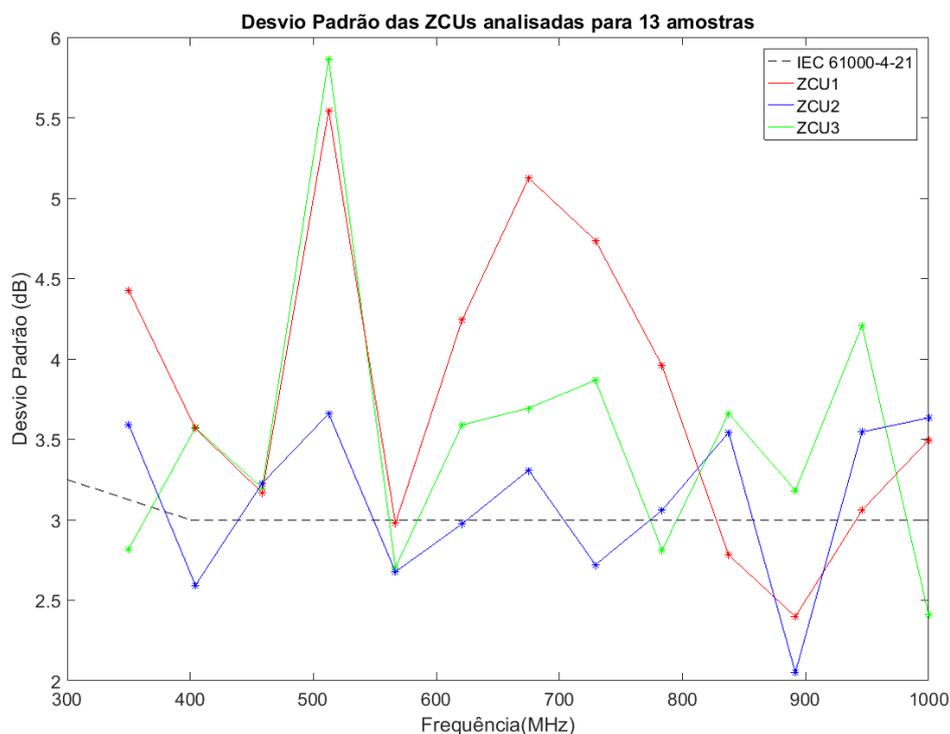
Desvio Padrão ( $f = 350 \text{ MHz}$ ) com AGM				
IDENTIFICAÇÃO	$\sigma_x$ (dB)	$\sigma_y$ (dB)	$\sigma_z$ (dB)	$\sigma_{total}$ (dB)
ZCU 1	2,96	2,18	4,67	4,43
ZCU 2	3,22	2,38	2,57	3,59
ZCU 3	1,61	2,93	1,69	2,82

Da Tabela 5 tem-se que, quando da inserção do AGM há uma melhora nos resultados de desvio padrão e estes se aproximam dos valores limites da norma, porém apenas a ZCU 3 satisfaz os limites impostos.

Como o foco do trabalho é obter uma CR que opere na frequência de 350 MHz, não se faz necessário analisar uma ampla largura de banda. Além disso, a faixa de operação da antena transmissora foi obtida para valores na periferia de 350 MHz. Não obstante, optou-se por analisar o comportamento dos campos elétricos nos vértices das ZCUs em 13 (treze) amostras uniformemente espaçadas na faixa de frequência de 350 MHz – 1 GHz a fim de obter maiores informações sobre a ação do AGM e, futuramente, realizar melhorias e expandir a gama de frequências em que a CR satisfaz as normas internacionais. A quantidade de frequências amostradas foi definida arbitrariamente, porém se considerou que quanto maior o número de frequências analisadas, maior o esforço computacional necessário e por conseguinte maior o tempo de simulação.

Os valores do desvio padrão total,  $\sigma_{total}$ , foram calculados para cada um dos 13 (treze) valores de frequência e os resultados foram confrontados com os limites impostos pela norma IEC-61000-4-21, vide Figura 17.

Figura 17 – Resultados de verificação de conformidade com a norma IEC 61000-4-21



Fonte: O autor

Como pode ser observado da Figura 17, a maior ZCU, ZCU 1, só obtém conformidade com a norma em um dos pontos analisados,  $f = 891,67 \text{ MHz}$ . E, ainda que a ZCU 3 tenha satisfeito a norma para a frequência de importância desse trabalho, a ZCU 2 possui conformidade em 4 (quatro) dos valores de frequência analisados, isto é, uma ponto de conformidade a mais.

Melhores resultados para as demais ZCUs podem ser obtidos com a inserção de outro AGM ou a partir de alterações da geometria do mesmo.

## 7 CONCLUSÃO

Findado o trabalho foi possível, com auxílio de software de FDTD, realizar os objetivos estabelecidos. O modelo computacional da CR foi feito e com base nas simulações se verificou a conformidade de uma ZCU, entre as 3 (três) analisadas, aos requerimentos da norma IEC-61000-4-21 para a frequência de 350 MHz.

Também se observou que os melhores resultados, isto é, os resultados com maior número de frequências em que houve conformidade com a norma, foram aqueles em que a ZCU tinha menores dimensões e a ZCU de maior dimensão obteve um resultado adequado apenas para uma frequência dentre as analisadas. Isso sugere que a ZCU ótima para a CR analisada tem uma distância à parede da ZCU maior que  $\lambda/2$ .

Com base no modelo desenvolvido é possível realizar novas abordagens e otimizações a fim de melhorar os resultados e obter conformidade à norma em frequências, ou faixas de frequências, que não foram analisadas. As sugestões de alterações dizem respeito a inserção de outro AGM ou a alteração da geometria do mesmo, pois do que fora exposto ao longo desse trabalho, o elemento que mais influencia para a distribuição uniforme do campo elétrico no interior da CR é o AGM.

Obtido a conformidade para a frequência originalmente objetivada, resta a validação dos resultados quando da construção da CR, assim esta poderá ser certificada e utilizada como ambiente de testes.

## REFERÊNCIAS

- ARGENCE, E.; KAHAN, T. *Theory of Waveguides and Cavity Resonators*. New York: Hart Publishing Co., 1968.
- ARNAUT, L. R. Effect of local stirrer and spatial averaging on measurement and testing in mode-tuned and mode-stirred reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 43, n. n. 3, 2001. 305-325.
- BÄCKSTRÖM, M.; LUNDÉN, O.; KILDAL, P.-S. Reverberation chambers for EMC susceptibility and emission analyses. *Review of Radio Science*, 2003. 492-452.
- BONNET, P. et al. FDTD Modelling of Reverberation Chamber. *Electronics Letters*, vol. 41, no.20, 29 Setembro 2005. 1101-1102.
- BRUNS, C.; R. VAHLDIECK. A closer look at reverberation Chambers - 3-D Simulation and experimental verification. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 47, n. 3, Agosto 2005. 612-626.
- CHEN, X. et al. Reverberation Chambers for Over-the-Air Tests: An Overview of Two Decades of Research. *IEEE Access*, Setembro 2018.
- CLEGG, J. et al. Optimization of Stirrer Designs in a Reverberation Chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 47, no. 4, Novembro 2005. 824-832.
- COLLIN, R. E. *Foundations for Microwave Engineering*. 2. ed. New York: Wiley Interscience, 2001.
- COLLIN, R. E. *Foundations for Microwave Engineering*. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.
- COMPATIBILITY, E. *Part 4-21: Testing and Measurement Techniques – Reverberation Chamber Test Methods*. IEC 61000-4-21, International Electrotechnical Commission. [S.l.]. 2011.
- CRAWFORD, M. L.; KOEPKE, G. H. *Design, Evaluation, and Use of a Reverberation Chamber for Performing Electromagnetic Susceptibility/Vulnerability Measurements*. U.S. Department of Commerce / National Bureau of Standards. Washington D.C., p. 139. 1986.
- GARBE, H. *New EMC Test Facilities for Radiation Measurements*. Hanover, Germany. 1999-2002.
- HARRINGTON, R. F. *Time-Harmonic Electromagnetic Fields*. New York: McGraw-Hill, Inc, 1961. 155-158 p.
- HILL, D. *Electromagnetic Theory of Reverberation Chambers*. U.S. Department of Commerce, National Institute of Standards and Technology. Boulder, Colorado, p. 55. 1998.
- HUANG, Y.; ZHANG, J.; LIU, P. *A Novel Method to Examine the Effectiveness of a Stirrer*. International Symposium on Electromagnetic Compatibility, EMC 2005. Chicago, IL: [s.n.]. 2005. p. 555-561.
- LEHMAN, T. H. *A Statistical Theory of Electromagnetic Fields in Complex Cavities*. USAF Phillips Laboratory Interaction Note 494. Kirtland AFB, USA. 1993.

LEO, R. D.; PRIMIANI, V. M. *Radiated Immunity Tests: Reverberation Chamber vs. Anechoic Chamber Results*. 2005 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings. Ottawa, Ontario: [s.n.]. 2005. p. 337-341.

PAUL, C. R. *Introduction to Eletromagnetic Compatibility*. 2. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2006.

PEDRO, H. J. G. *Equalização do Desvio Padrão do Campo Elétrico em uma Câmara de Reverberação Compacta*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2017.

PIRES, E. S. et al. *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: [s.n.]. 2006.

SADIKU, M. N. O. *Elementos do Eletromagnetismo*. 3. ed. [S.l.]: Bookman, 2004.

SCHMITT, R. *Electromagnetics explained: a handbook for wireless/RF, EMC, and high-speed electronics*. Boston: Newnes, 2002.

SILVA, E. F. *Uma proposta de Maximização da Região de Campo Uniforme para uma Câmara de Reverberação Compacta*. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande. 2008.

SILVA, E. F. et al. *Compact Electromagnetic Reverberation Chamber Design And Construction*. 12th IEEE International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics [ANTEM] and the Canadian Radio Sciences Conference. Montreal, QC: [s.n.]. 2006. p. 1-3.

UBIN, A. et al. *Statistical analysis of three different stirrer designs in a reverberation chamber*. 2015 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC). Taipei: [s.n.]. 2015. p. 604-607.

YI, S. G. et al. Modelling and performance analysis of reverberation chamber using finite-difference time-domain method. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, vol. 6, n. no. 9, 19 Junho 2012. 975-981.