



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

**Haslan José Gonçalves Pedro**

**Equalização do Desvio Padrão do Campo Elétrico em uma  
Câmara de Reverberação Compacta**

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Dezembro de 2017

**Haslan José Gonçalves Pedro**

**Equalização do Desvio Padrão do Campo Elétrico em uma  
Câmara de Reverberação Compacta**

*Dissertação submetida à Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande (Campus I) como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.*

Área de Concentração: Micro-ondas e eletromagnetismo aplicados.

Prof. Glauco Fontgalland, D.Sc.

Orientador

Profa. Raquel Aline Araújo Rodrigues, D.Sc.

Orientadora

Campina Grande - Paraíba - Brasil

Dezembro de 2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

P372e

Pedro, Haslan José Gonçalves.

Equalização do desvio padrão do campo elétrico em uma câmara de reverberação compacta / Haslan José Gonçalves Pedro. – Campina Grande, 2017.

66 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2017.

"Orientação: Prof. D.Sc. Glauco Fontgalland, Profa. D.Sc. Raquel Aline Araújo Rodrigues".

Referências.

1. Agitadores. 2. Anisotropia. 3. Câmara de Reverberação. 4. Desvio Padrão. 5. Equalização. 6. Fator de Qualidade. 7. Não-homogeneidade. I. Fontgalland, Glauco. II. Rodrigues, Raquel Aline Araújo. III. Título.

CDU 621.318(043)

**"EQUALIZAÇÃO DA POLARIZAÇÃO DOS CAMPOS EM DENTRO DE UMA CÂMARA  
DE REVERBERAÇÃO COMPACTA"**

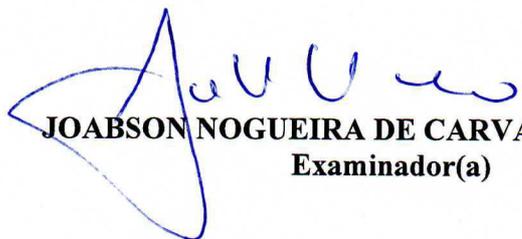
**HASLAN JOSÉ GONÇALVES PEDRO**

**DISSERTAÇÃO APROVADA EM 22/12/2017**

  
**GLAUCO FONTGALLAND, Dr., UFCG**  
Orientador(a)

  
**RAQUEL ALINE ARAÚJO RODRIGUES, D.Sc., UFCG**  
Orientador(a)

  
**WAMBERTO JOSÉ LIRA DE QUEIROZ, D.Sc., UFCG**  
Examinador(a)

  
**JOABSON NOGUEIRA DE CARVALHO, Dr, IFPB**  
Examinador(a)

**CAMPINA GRANDE - PB**

# Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus que me sustenta com Sua graça. Sem Ele não teria força para chegar até aqui.

A minha família, pelo total apoio e suporte durante as horas dedicadas a este trabalho.

Aos colegas, Raymundo de Amorim Junior pela importante colaboração no código do sistema de controle e contribuição no prolongamento do eixo do motor de passo. A João Rubens Alves Zacarias pelas sugestões, apoio e descontração durante horas de trabalho.

A Ricardo pelo esforço na procura de informações sobre os parâmetros do motor de passo.

Aos professores Glauco Fontgalland e Raquel Aline Araújo Rodrigues, fundamentais à minha formação. Exemplos de excelência como orientadores e professores.

Enfim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização deste trabalho.

*Haslan Pedro*

# Sumário

<b>Lista de Figuras</b>	<b>vi</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Abreviaturas</b>	<b>x</b>
<b>Lista de Símbolos</b>	<b>xi</b>
<b>Resumo</b>	<b>xii</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos . . . . .	3
1.2 Organização do Trabalho . . . . .	3
<b>2 Fundamentação Teórica</b>	<b>5</b>
2.1 Equações de Maxwell . . . . .	5
2.2 Cavidade Retangular Ressonante . . . . .	7
<b>3 Câmara de Reverberação</b>	<b>10</b>
3.1 Efeitos do Agitador de Modos . . . . .	11
3.2 Usos e Aplicações . . . . .	11
<b>4 Métricas de Desempenho</b>	<b>14</b>
4.1 Métricas de Uniformidade do Campo . . . . .	14
4.1.1 Anisotropia do Campo Elétrico . . . . .	15
4.1.2 Não-Homogeneidade do Campo Elétrico . . . . .	16

---

4.1.3	Uniformidade do Campo . . . . .	17
4.2	Fator de Qualidade . . . . .	19
4.2.1	Fator de Qualidade Teórico . . . . .	19
4.2.2	Fator de Qualidade Experimental . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Material Utilizado</b>	<b>24</b>
5.1	Câmara de Reverberação . . . . .	24
5.2	Agitador de Modos . . . . .	25
5.3	Refletor . . . . .	28
5.4	Antenas . . . . .	29
<b>6</b>	<b>Técnica de Agitação Utilizada</b>	<b>34</b>
6.1	Sistema de Movimentação . . . . .	34
6.2	Motor de Passo . . . . .	35
6.3	Ponte H . . . . .	37
6.4	Módulos de Ponte H . . . . .	38
6.5	Controle do Motor de Passo pela Placa Arduíno . . . . .	42
6.6	Interface de controle do motor de passo . . . . .	42
<b>7</b>	<b>Metodologia</b>	<b>44</b>
7.1	Medição do Coeficiente de Anisotropia Total . . . . .	45
7.2	Medição do Coeficiente Total de Não-Homogeneidade . . . . .	47
7.3	Medição do Desvio Padrão Global . . . . .	47
7.4	Medição do Fator de Qualidade . . . . .	48
<b>8</b>	<b>Resultados</b>	<b>49</b>
<b>9</b>	<b>Conclusões</b>	<b>55</b>
<b>A</b>	<b>Programa RFEX</b>	<b>56</b>
<b>B</b>	<b>Circuito Integrado L298N</b>	<b>61</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>63</b>

# Lista de Figuras

2.1	Componentes de campo dos modos $TE_{mnp}$ e $TM_{mnp}$ em um cavidade retangular ressonante. . . . .	7
4.1	Cubo metálico no interior da câmara de reverberação. . . . .	19
4.2	Contribuição de cada parede de uma cavidade retangular. . . . .	21
5.1	Dimensões da CR disponível no LEMA. As dimensões estão indicadas pelas letras $a$ , $b$ e $d$ . . . . .	25
5.2	Dimensões do AGM 1. . . . .	26
5.3	AGM 2 coberto com duas camadas de papel alumínio. Em destaque o AGM 1 (em branco) e as dimensões do AGM 2. . . . .	27
5.4	Efeito da reflexão em superfícies rugosas e lisas. . . . .	27
5.5	Vista frontal do AGM 3 com ângulos de abertura em destaque. . . . .	28
5.6	Vista lateral de uma das pás do AGM 3. Sua espessura, largura e ângulo de abertura estão indicados. . . . .	28
5.7	Dimensões do refletor retangular. . . . .	29
5.8	Antena isotrópica receptora TS-EMF da R&S <sup>©</sup> . . . . .	30
5.9	Conectores coaxial e serial da antena TS-EMF. . . . .	31
5.10	Abertura para passagem dos cabos da antena TS-EMF: (a) Interior da CR; (b) Exterior da CR. . . . .	31
5.11	Isolação da abertura de passagem dos cabos da antena TS-EMF. . . . .	32
5.12	Hastes de fixação da antena TS-EMF. . . . .	32
5.13	Dimensões do dipolo impresso utilizado como antena transmissora. . . . .	33
5.14	Coeficiente de reflexão medido antena do tipo dipolo impresso. . . . .	33
6.1	Sistema de movimentação contínua. . . . .	35

---

6.2	Diagrama de blocos do sistema de controle. . . . .	35
6.3	Motor de passo disponível no LEMA. . . . .	36
6.4	Configuração bipolar do motor de passo de quatro fios. . . . .	37
6.5	Suporte para fixação do motor de passo na câmara de reverberação. . . . .	38
6.6	Motor de passo fixado na câmara de reverberação: (a) Vista externa; (b) Vista interna. . . . .	38
6.7	Prolongamento do eixo do motor de passo. . . . .	39
6.8	Circuito da Ponte H: (a) Motor parado; (b) Motor gira no sentido horário e (c) Motor gira no sentido anti-horário. . . . .	39
6.9	Módulo Ponte H com o circuito integrado L298N. . . . .	40
6.10	Entradas e saídas do módulo utilizado. . . . .	41
6.11	Placa Arduíno UNO. . . . .	42
6.12	Interface de controle do motor de passo. . . . .	43
7.1	Sistema de aquisição de dados. . . . .	44
7.2	Marcações de referência para posicionamento da antena RX. . . . .	45
7.3	Marcações de referência dos eixos $x$ , $y$ e $z$ para orientação da antena RX. . . . .	46
7.4	Marcações de referência das polarizações $x$ , $y$ e $z$ na antena RX. . . . .	47
7.5	Vértices da zona de campo uniforme no interior da câmara de reverberação. . . . .	48
8.1	Coeficiente de anisotropia para os agitadores AGM1, AGM2 e AGM3. . . . .	49
8.2	Coeficiente de não-homogeneidade média para os agitadores AGM1, AGM2 e AGM3. . . . .	51
8.3	Desvio padrão das componentes $x$ , $y$ e $z$ do campo elétrico para o AGM1. . . . .	51
8.4	Desvio padrão das componentes $x$ , $y$ e $z$ do campo elétrico para o AGM2. . . . .	52
8.5	Desvio padrão das componentes $x$ , $y$ e $z$ do campo elétrico para o AGM3. . . . .	53
8.6	Fator de qualidade para os agitadores AGM1, AGM2 e AGM3 na faixa de 700 MHz a 3 GHz. . . . .	54
A.1	Interface do programa RFEX. . . . .	56
A.2	Tabelas contendo os fatores de correção da antena TS-EMF. . . . .	57
A.3	Configuração de pacotes. . . . .	57
A.4	Algumas opções disponíveis na configuração dos pacotes. . . . .	58
A.5	Opção que permite verificar a conexão do analisador de espectro . . . . .	58

---

A.6	Teste do chaveamento das pontas de prova da antena TS-EMF. . . . .	58
A.7	Dados fornecidos pela antena TS-EMF. . . . .	60
A.8	Conteúdo de um arquivo <i>.raw</i> . . . . .	60
B.1	Esquema interno do circuito integrado L298N. . . . .	61

# Lista de Tabelas

4.1	Valores típicos do coeficiente de anisotropia total ( $A_{tot}$ ) para desempenho “bom” e “médio” (ARNAUT; WEST, 1999; ARNAUT; WEST, 1998). . . .	16
B.1	Funções dos principais pinos do circuito integrado L298N ((MICROELECTRONICS, 2000)). . . . .	62

# Lista de Abreviatura e Siglas

AGM	Agitador de Modos
CA	Câmara Anecóica
CEM	Compatibilidade Eletromagnética
CI	Circuito Integrado
CPW	<i>Coplanar Waveguide</i>
CR	Câmara de Reverberação
CTEM	Célula Transversal Eletromagnética
EM	Eletromagnético
EST	Equipamento Sob Teste
LEMA	Laboratório de Eletromagnetismo e Micro-ondas Aplicados
IEC	<i>International Electrotechnical</i>
MFU	Menor Frequência Utilizável
RFEX	<i>Radio Frequency Exposure</i>
TE	Transversal Elétrico
TM	Transversal Magnético
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
UFMG	Universidade Federal de Campina Grande
VCU	Volume de Campo Uniforme
VT	Volume de Trabalho
VU	Volume Útil
ZCU	Zona de Campo Uniforme

# Lista de Símbolos

$\vec{E}$	Vetor intensidade de campo elétrico
$\vec{B}$	Vetor densidade de fluxo magnético
$\vec{D}$	Vetor densidade de fluxo elétrico
$\vec{H}$	Vetor intensidade de campo magnético
$\epsilon_0$	Permissividade elétrica no vácuo
$\mu_0$	Permeabilidade magnética no vácuo
$\nabla$	Operador nabla
$\omega$	Frequência angular
$\rho$	Densidade volumétrica de carga
$\vec{J}$	Vetor densidade de corrente de condução
$\sigma$	Condutividade elétrica do material
$f_c$	Frequência de corte
$c$	Velocidade da luz
$\langle \rangle$	Média aritmética
$A$	Coefficiente de anisotropia
$I$	Coefficiente de não-homogeneidade
$\lambda_{MFU}$	Comprimento de onda da menor frequência utilizável
$\phi$	Posição angular do agitador de modos
$Q$	Fator de qualidade

# Resumo

A câmara de reverberação é um ambiente de testes utilizado para avaliar a compatibilidade eletromagnética de um equipamento eletrônico. No interior da câmara de reverberação há um volume chamado de zona de campo uniforme, onde o equipamento sob teste é posicionado. Nesse volume, o valor do desvio padrão do campo elétrico não pode ultrapassar 3 dB. A posição do equipamento sob teste pode elevar desvio padrão do campo elétrico no interior da zona de campo uniforme. Nesse sentido, é importante verificar, equalizar e reduzir os valores do desvio padrão de cada componente do campo elétrico. O desvio padrão pode ser utilizado como métrica de desempenho, porém para avaliar o desempenho da câmara de reverberação e dos agitadores é necessário escolher um conjunto de métricas que possam caracterizar diferentes aspectos do campo elétrico no interior da câmara, permitindo investigar a convergência dos resultados. Cada métrica de desempenho é obtida por meio da medição do campo elétrico em um ou mais vértices da zona de campo uniforme. Neste trabalho, foi empregado um conjunto de métricas de desempenho mais comuns na literatura, como: coeficiente de anisotropia, coeficiente de não-homogeneidade, desvio padrão e fator de qualidade. Os resultados foram obtidos na faixa de 700 MHz a 3 GHz, permitindo comprovar que a redução da área útil, a introdução de rugosidade e o emprego de ângulos de abertura nas pás do agitador contribuem para o aumento da faixa de operação (em 150 MHz) da câmara de reverberação, redução e equalização do desvio padrão (na faixa de frequências de 1,35 GHz a 3 GHz) no interior da zona de campo uniforme, permitindo que o equipamento sob teste possa ser testado independente de sua posição.

**Palavras-Chaves:** Agitadores, Anisotropia, Câmara de Reverberação, Desvio Padrão, Equalização, Fator de Qualidade, Não-homogeneidade.

# Abstract

A reverberation chamber is a test environment used to evaluate the electromagnetic compatibility of electronic equipment. Inside the Reverb chamber there is a volume called the uniform field zone where the equipment under test is positioned. In this volume the value of the standard deviation of the electric field can not exceed 3 dB. The position of the equipment under test may raise the standard deviation of the electric field within the uniform field zone. In this sense, it is important to verify, equalize and reduce the values of the electric field component standard. The standard deviation can be used as a performance metric, but to evaluate the performance of the reverberation chamber and the stirrers it is necessary to choose a set of metrics that can characterize different aspects of the electric field without interior of the chamber, allowing to investigate a convergence of the results. Each performance metric is obtained by measuring the electric field at one or more vertices of the uniform field zone. In this work, we used a set of performance metrics more common in the literature as: coefficient of anisotropy, coefficient of non-homogeneity, standard pattern and quality factor. The results were obtained in the range of 700 MHz to 3 GHz, allowing to prove that the reduction of the working area, the introduction of roughness and the use of opening angles in the blades of the agitator contribute to the increase of the operating range (in 150 MHz) of the reverberation chamber, reduction and equalization of the standard deviation (from 1.35 GHz to 3 GHz) within the uniform field zone, allowing the equipment under test to be tested regardless of its position.

**Keywords:** Stirrers, Anisotropy, Reverberation Chamber, Standard Deviation, Equalization, Quality Factor, Non-homogeneity..

# Capítulo 1

## Introdução

Atualmente dispositivos eletrônicos devem ser projetados de maneira que sua operação não perturbe a operação de outros dispositivos, além de suportarem radiação eletromagnética emitida por outros equipamentos. Uma característica desejável no desenvolvimento de um equipamento eletrônico é ser rápido, eficaz e eficiente nos testes de compatibilidade eletromagnética. A compatibilidade eletromagnética (CEM) 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, 1992). A CEM envolve duas partes: a fonte de interferência e o equipamento ou dispositivo susceptível. Muitos equipamentos são simultaneamente, fontes de interferências e susceptíveis a interferências, isto é, eles emitem sinais que têm efeitos diversos em outros dispositivos no ambiente eletromagnético ao redor deles, e são ao mesmo tempo susceptíveis ao ruído gerado por outros dispositivos no ambiente. Um sistema considerado eletromagneticamente compatível é capaz de não interferir em outros sistemas, além de não ser susceptível a emissões de outros sistemas e não causar interferência nele mesmo. Interferências podem ser transmitidas via cabo (“interferência conduzida”) ou irradiada pelo ambiente ao redor (“interferência irradiada”).

As câmaras de reverberação vêm se popularizando como complemento ou alternativa aos métodos bem estabelecidos para interferências irradiadas, tais como câmaras anecoicas (CA) ou célula transversais eletromagnéticas (CTEM). A importância de testes de CEM em câmaras de reverberação como uma técnica de medição alternativa têm sido reconhecida pela norma internacional IEC 61000-4-21 (COMPATIBILITY, 2011).

A câmara de reverberação (CR) é definida como uma cavidade eletricamente grande, de alta qualidade, cujas condições de contorno são variadas por meio da rotação de agitadores de modos, de modo a produzir um campo estatisticamente uniforme. A escolha da geometria e dimensões do agitador de modos, influenciam no número de reflexões e conseqüentemente nos níveis de uniformidade do campo eletromagnético (ARNAUT, 2006). Dentro da câmara de reverberação há um volume usualmente chamado de zona de campo uniforme (ZCU), em que o campo eletromagnético é estatisticamente homogêneo, isotrópico e aleatoriamente polarizado.

Frequentemente, ao utilizar câmaras de reverberação em testes de CEM, é necessário determinar previamente o desempenho e as limitações. Ao longo dos anos foram estabelecidos métricas de desempenho que permitem analisar características específicas da CR. Uma das métricas de desempenho largamente utilizada como métrica de desempenho de câmaras de reverberação e agitadores é o desvio padrão (HUI *et al.*, 2016), que requer medições do campo elétrico nos vértices da ZCU. De acordo com a norma IEC 61000-4-21 o campo elétrico no interior da ZCU é considerado estatisticamente homogêneo, isotrópico e aleatoriamente polarizado se o valor do desvio padrão não exceder 3 dB.

Nos trabalhos de Petit (2002), é investigado a influência de uma carga metálica dentro de uma câmara de reverberação. Cantalice *et al.* (2009) constatou que o posicionamento de um cubo metálico (representando um equipamento sob teste) no interior da ZCU, pode diminuir a uniformidade do campo eletromagnético (EM). A diminuição da uniformidade equivale ao aumento dos valores do desvio padrão de pelo menos uma das componentes de campo elétrico. Dessa forma, torna-se necessário reduzir e equalizar os valores do desvio padrão das componente do campo elétrico no interior da ZCU.

Serra (2016) recomenda o uso de um conjunto de métricas de desempenho para melhor avaliar o desempenho da câmara de reverberação e agitadores. As métricas de desempenho frequentemente utilizadas (além do desvio padrão) na literatura são: coeficiente de anisotropia (ARNAUT; SERRA; WEST, 2017), coeficiente de não-homogeneidade (SERRA, 2016) e Fator de Qualidade (WEST *et al.*, 2017).

Neste trabalho, algumas das principais métricas e metodologias de avaliação do desempenho de uma câmara de reverberação e de agitadores de modos são avaliadas.

O uso de tais métricas é essencial para qualquer pesquisa com câmaras de reverberação, em que resultados quantitativos são necessários para executar algum processo de otimização, comparar técnicas ou estratégias, etc. Muitos usuários e pesquisadores que trabalham com câmaras de reverberação ao longo dos anos, têm usado uma família de diferentes indicadores de desempenho com pouca ou nenhuma justificativa em suas escolhas. Isso potencialmente impõe algumas dificuldades aos usuários da CR sobre qual indicador de desempenho deve ser usado para uma aplicação específica.

## 1.1 Objetivos

Um dos objetivos deste trabalho é apresentar algumas metodologias utilizadas para medição experimental das principais métricas de desempenho empregados na literatura (coeficiente de anisotropia, coeficiente de não-homogeneidade, desvio padrão e fator de qualidade), bem como fornecer um breve desenvolvimento matemático de cada uma das métricas utilizadas neste trabalho.

O sistema de movimentação mecânica desempenha um papel importante na medição das métricas de desempenho, devido a metodologia utilizada durante as medições depender da posição angular do agitador. Dessa forma, é indispensável desenvolver uma interface de controle para o sistema de movimentação mecânica.

Agitadores de modos com diferentes características (redução da área útil, introdução de rugosidade, emprego de ângulos de abertura nas pás) foram empregadas neste trabalho, deste modo, é importante verificar como essas características influenciam na equalização do desvio padrão.

## 1.2 Organização do Trabalho

No Capítulo 2 é apresentado a teoria eletromagnética que dá suporte ao trabalho. Um resumo das equações de Maxwell é apresentado, bem como as equações que regem cavidades ressonantes. No Capítulo 3 é apresentado o conceito da câmara de reverberação, suas características e principais aplicações. No Capítulo 4 são apresentados as principais métricas de desempenho. No Capítulo 5 são apresentados os materiais utilizados, como a câmara de reverberação, agitadores, refletor e antenas. No Capítulo 6 é apresentado os componentes do sistema de agitação mecânica. No Capítulo 7 é

---

apresentado a metodologia utilizada na medição das métricas de desempenho. No Capítulo 8 os resultados são apresentados e alguns comentários são desenvolvidos. Finalmente, no Capítulo 9 são apresentados as conclusões do trabalho.

# Capítulo 2

## Fundamentação Teórica

A câmara de reverberação pode ser considerada uma cavidade ressonante com agitadores em seu interior. As equações de Maxwell são a base para compreender o comportamento dos campo eletromagnéticos no interior de cavidades ressonantes. Assim, é apresentado neste capítulo um resumo das equações de Maxwell e da teoria das cavidades ressonantes.

### 2.1 Equações de Maxwell

As equações de Maxwell descrevem de maneira completa o comportamento macroscópico do campo elétrico ( $\vec{E}$ ) e da densidade de fluxo magnético ( $\vec{B}$ ), que são campos vetoriais espaço-temporais.

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

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B}, \quad (2.1)$$

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E}, \quad (2.2)$$

em que,  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética no vácuo e  $\epsilon_0$  é a permissividade elétrica no vácuo. Uma das leis básicas do eletromagnetismo é a lei de Faraday, que afirma que um campo magnético variável no tempo gera uma circulação do campo elétrico com

o tempo. A Equação (2.3) descreve o caso em que os campos elétrico e magnético são harmônicos no tempo, em um meio isotrópico.

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\mu_0\vec{H}. \quad (2.3)$$

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

$$\nabla \cdot \epsilon_0\vec{E} = \rho. \quad (2.4)$$

Conforme o teorema de Helmholtz, um vetor é completamente descrito quando seu rotacional e seu divergente são definidos (COLLIN, 2007). É importante relacionar o rotacional e o divergente do campo magnético às suas fontes. A fonte que cria a circulação ou rotacional do campo  $\vec{H}$  é a corrente, essa é composta pela densidade de corrente de condução ( $\vec{J} = \sigma\vec{E}$ ), a densidade de corrente de deslocamento ( $j\omega\epsilon_0\vec{E}$ ) e a corrente de convecção (não considerada). Pode-se assim obter a equação correspondente a Lei de Ampere

$$\nabla \times \vec{H} = \sigma\vec{E} + j\omega\epsilon_0\vec{E}, \quad (2.5)$$

em que,  $\sigma$  é a condutividade elétrica do material.

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

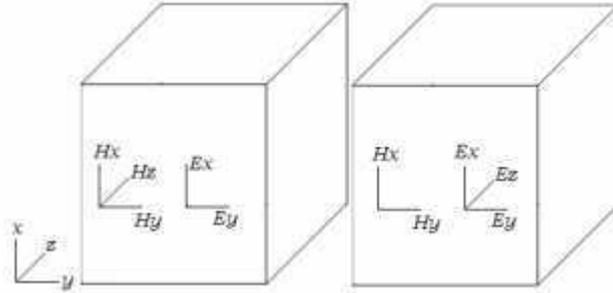
$$\nabla \cdot \mu_0\vec{H} = 0. \quad (2.6)$$

As Equações (2.3) a (2.6) formam o conjunto básico para qualquer desenvolvimento a ser realizado em eletromagnetismo e são utilizadas para justificar o comportamento do campo eletromagnético no interior de uma cavidade de ressonância.

## 2.2 Cavidade Retangular Ressonante

Uma cavidade retangular ressonante pode ser considerada como um guia de onda terminado em curto-circuito. A solução dos campos em seu interior pode ser obtida partindo das equações do guia de onda (COLLIN, 2007). Aplicando as equações de Maxwell a uma cavidade retangular de paredes metálicas e respeitando as condições de contorno, pode-se separar as equações de campo em modos  $TE_{mnp}$  e  $TM_{mnp}$ , como ilustrado na Figura 2.1.

**Figura 2.1** – Componentes de campo dos modos  $TE_{mnp}$  e  $TM_{mnp}$  em um cavidade retangular ressonante.



Fonte: (COLLIN, 2007)

Os modos  $TE_{mnp}$  são dados por

$$E_x = \left( \frac{j\omega\mu_0}{h^2} \right) \left( \frac{n\pi}{b} \right) H_0 \cos\left( \frac{m\pi x}{a} \right) \text{sen}\left( \frac{n\pi y}{b} \right) \text{sen}\left( \frac{p\pi z}{d} \right), \quad (2.7)$$

$$E_y = - \left( \frac{j\omega\mu_0}{h^2} \right) \left( \frac{n\pi}{a} \right) H_0 \text{sen}\left( \frac{m\pi x}{a} \right) \cos\left( \frac{n\pi y}{b} \right) \text{sen}\left( \frac{p\pi z}{d} \right), \quad (2.8)$$

$$E_z = 0, \quad (2.9)$$

$$H_x = - \left( \frac{1}{h^2} \right) \left( \frac{m\pi}{a} \right) \left( \frac{p\pi}{d} \right) H_0 \text{sen}\left( \frac{m\pi x}{a} \right) \cos\left( \frac{n\pi y}{b} \right) \cos\left( \frac{p\pi z}{d} \right), \quad (2.10)$$

$$H_y = -\left(\frac{1}{h^2}\right)\left(\frac{n\pi}{a}\right)\left(\frac{p\pi}{d}\right)H_0\cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sen\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right), \quad (2.11)$$

$$H_z = H_0\cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\sen\left(\frac{p\pi z}{d}\right), \quad (2.12)$$

$$h^2 = \left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{p\pi}{d}\right)^2. \quad (2.13)$$

Enquanto os modos  $TM_{mnp}$  são dados por

$$E_x = -\left(\frac{1}{h^2}\right)\left(\frac{m\pi}{a}\right)\left(\frac{p\pi}{d}\right)E_0\cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sen\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\sen\left(\frac{p\pi z}{d}\right), \quad (2.14)$$

$$E_y = -\left(\frac{1}{h^2}\right)\left(\frac{n\pi}{b}\right)\left(\frac{p\pi}{d}\right)E_0\sen\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\sen\left(\frac{p\pi z}{d}\right), \quad (2.15)$$

$$E_z = E_0\sen\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sen\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right), \quad (2.16)$$

$$H_x = \left(\frac{j\omega\epsilon_0}{h^2}\right)\left(\frac{n\pi}{b}\right)E_0\sen\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\cos\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right), \quad (2.17)$$

$$H_y = -\left(\frac{j\omega\epsilon_0}{h^2}\right)\left(\frac{m\pi}{a}\right)E_0\cos\left(\frac{m\pi x}{a}\right)\sen\left(\frac{n\pi y}{b}\right)\cos\left(\frac{p\pi z}{d}\right), \quad (2.18)$$

$$H_z = 0, \quad (2.19)$$

em que  $a$  é a altura,  $b$  o comprimento,  $d$  é a largura da cavidade,  $h$  é o número de onda,  $m$ ,  $n$  e  $p$  são inteiros positivos.

A equação que permite calcular a frequência de corte da cavidade retangular ressonante é dada por

$$f_c = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{d}\right)^2}, \quad (2.20)$$

em que  $c$  é a velocidade da luz no vácuo.

A menor frequência utilizável (MFU) é definida como três vezes a frequência de corte da cavidade, ou seja,  $3f_c$  (ZHANG; SONG, 2000).

## Capítulo 3

# Câmara de Reverberação

A câmara de reverberação (CR) pode ser considerada uma cavidade ressonante eletricamente grande, blindada e construída com paredes condutoras. Em seu interior são posicionados elementos agitadores (HUANG; ZHANG; LIU, 2005). O campo no interior da CR é a soma de ondas resultantes de várias reflexões. No interior de tal estrutura existe uma região na qual o valor médio do campo eletromagnético é uniforme em qualquer polarização. Para alcançar tal uniformidade é necessário que a câmara excite um número mínimo de modos ressonantes que devem ser constantemente “deslocados”, o que é obtido pelo auxílio de agitadores (ARNAUT, 2001).

A região no interior da câmara de reverberação no qual o campo eletromagnético é estatisticamente uniforme é chamada de zona de campo uniforme (ZCU), volume útil (VU) ou volume de trabalho (VT) que é disponibilizado para uso em testes. Esse volume deve apresentar um campo eletromagnético com as seguintes características (ARNAUT, 2001):

- Estatisticamente isotrópico: uniformidade estatística do fluxo de energia local em qualquer ponto no interior da ZCU;
- Aleatoriamente polarizado: elevada aleatoriedade da polarização dos campos EM no interior da ZCU;
- Homogêneo: uniformidade estatística do campo EM em relação a localização no interior da ZCU.

### 3.1 Efeitos do Agitador de Modos

O agitador de modos pode ser definido como uma superfície metálica utilizada para perturbar o campo no interior de uma CR (CHAN; READER, 2000). Cada modo do campo eletromagnético (EM) é uma solução da equação de onda, cuja forma tridimensional é dada por

$$\nabla^2 \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0. \quad (3.1)$$

Cada posição do agitador altera a geometria interna e os modos ressonantes da CR, reduzindo a formação de ondas estacionárias. Assim, é importante considerar o tamanho, o número de agitadores, posição dentro da câmara (BAI *et al.*, 1999), geometria (HONG; HUH, 2010) e superfície (LEFERINK; BOUDENOT; ETTEN, 2000).

### 3.2 Usos e Aplicações

Câmaras de reverberação têm sido usadas em testes de CEM há mais de quatro décadas (SERRA *et al.*, 2016). Seu uso é amplamente disseminado pela sua excelente característica de uniformidade do campo, baixo custo, alta precisão, repetibilidade e reprodutibilidade, além de obter elevada intensidade do campo com potência relativamente modesta, quando comparado a outros ambiente de testes.

Em 2003, uma força tarefa conjunta de diferentes comitês internacionais publicaram a norma internacional IEC 61000-4-21 (COMPATIBILITY, 2011), em que foi estabelecida uma referência internacional para o uso de RCs em testes de CEM. Dessa forma, as câmaras de reverberação tornaram-se um meio padronizado de testes para: 1) Imunidade irradiada; 2) Emissões irradiadas; 3) Eficácia de blindagem, e; 4) Medições de eficiência de antenas. Em 2011, a segunda edição da norma IEC 61000-4-21 foi publicada após uma revisão da versão de 2003. Espera-se em breve uma terceira versão da norma (SERRA, 2016).

Além dos quatro usos citados, têm sido propostos na literatura vários usos alternativos e aplicações para câmaras de reverberação como, por exemplo:

- Aplicações em sistemas de comunicação (GENENDER *et al.*, 2010). Câmaras de reverberação têm provado com sucesso a capacidade de emular ambientes

realísticos de multi-percurso, fornecendo um ambiente para caracterização de diferentes aspectos de um sistema de comunicação.

- Aplicações aeroespaciais. O interesse na resposta do sistema eletrônico de uma aeronave para campos de alta intensidade está crescendo consideravelmente. Este interesse tem crescido não apenas pelo aumento da densidade e intensidade dos campos eletromagnéticos no ambiente, mas também pelo fato de que sistemas eletrônicos estão substituindo o tradicional sistema mecânico, e mais recentemente sistemas sem fio estão sendo empregados no lugar de alguns desses sistemas eletrônicos. Além disso, materiais compostos estão substituindo toda a estrutura metálica da aeronave, e portanto, modificando as propriedades de blindagem (SERRA *et al.*, 2016). A principal vantagem das CRs é gerar um campo de alta intensidade com potência relativamente modesta, junto com sua habilidade de reproduzir um ambiente real eletromagneticamente complexo, fazendo das CRs uma atraente solução para muitas aplicações aeroespaciais não-padronizados,. Por exemplo, vários estudos têm sido realizados por Hatfield *et al.* (1994) e por Hill *et al.* (1994a) usando aeronaves como estruturas reverberantes.
- Aplicações automotivas. A indústria automotiva conta com muitas normas internas descrevendo testes de CEM usando CRs. A General Motors, por exemplo, foi a primeira companhia a desenvolver uma norma interna (STANDARD, 1993). Na Europa, as companhias automotivas adotam a norma IEC 61000-4-21. Como no caso de aplicações aeroespaciais, a necessidade de aumentar cada vez mais os níveis de campo para testes de imunidade no domínio automotivo tem tornado as CRs a ser uma escolha atrativa (MUSSO, 2003).
- Predição de campos eletromagnéticos em ambientes semi-reverberantes. Produtos eletrônicos compartilham o mesmo ambiente e espectro eletromagnético. Este ambiente pode ser quase que completamente metálico (por exemplo, um trem, um carro, um escritório, etc.). Considerando, por exemplo, um escritório com muitas pessoas, aparelhos celulares, computadores e redes sem fio compartilhando o mesmo ambiente fechado, ressonâncias devem ocorrer, e diferentes fatores como o movimento de pessoas, movimento de dispositivos ou alterações no arranjo do escritório, produzirão modos agitados. Em tal cenário, a predição do máximo

campo que pode ser induzido devido a essas alterações na estrutura modal é de grande utilidade. Sob condições especiais, um escritório pode ser considerado uma câmara reverberante e a teoria utilizada para câmaras de reverberação pode ser aplicada para a predição de campos eletromagnéticos.

Esta lista de aplicações representa uma pequena amostra de um grande número de aplicações com câmaras de reverberação. Esta lista está em constante evolução, principalmente devido à dedicação e interesse de muitos pesquisadores ao redor do mundo.

Considerando o desempenho de câmaras de reverberação, não há indicadores gerais de desempenho, o que há são indicadores que melhor se adequam à aplicação. Para uma determinada aplicação, um indicador específico pode ser significativo, enquanto que para outra aplicação, esta mesma métrica pode ser irrelevante ou incompleta. Estas medidas respondem a necessidade de garantir uma referência na avaliação do desempenho de uma câmara de reverberação para propósitos específicos e em diferentes contextos. Por exemplo, alguns indicadores são usados para monitorar localmente as características do campo, enquanto outros indicadores descrevem globalmente o comportamento geral dos campos dentro da câmara. É importante conhecer uma larga variedade de indicadores de desempenho, conhecendo suas vantagens e desvantagens. São apresentados a seguir os indicadores de desempenho de CRs mais relevantes propostos na literatura.

# Capítulo 4

## Métricas de Desempenho

O domínio de validade das medições em uma CR é basicamente dado por um volume limitado (ZCU) distante das paredes, agitador(es), antenas e qualquer outro componente eletromagneticamente relevante.

Há um amplo número de métricas que podem ajudar o usuário de uma câmara de reverberação a entender se o seu desempenho é satisfatório ou não. Frequentemente, esses indicadores são usados para estimar a menor frequência de operação de uma CR. A menor frequência utilizável (MFU) de uma CR é constantemente definida como a frequência na qual um certo indicador de desempenho é igual ou maior a um limitante considerado adequado. Esses indicadores não são todos da mesma natureza e servem como uma métrica de diferentes aspectos, ou características da dinâmica do campo dentro de uma CR.

### 4.1 Métricas de Uniformidade do Campo

Uma das mais poderosas propriedades de CRs para testes de CEM é que a média do conjunto de campo (média sobre todas as posições do agitador) é igual a média sobre a incidência e polarização do espectro da onda plana. Consequentemente, a resposta média de antenas receptoras e objetos de teste são independentes da localização e orientação dentro do volume de trabalho da câmara (HILL, 1998b):

$$\langle |E_x|^2 \rangle = \langle |E_y|^2 \rangle = \langle |E_z|^2 \rangle = \frac{E_0^2}{3}, \quad (4.1)$$

em que  $\langle \rangle$  indica a média do conjunto (média aritmética sobre todas as posições do

agitador) e  $E_0$  é a amplitude constante do campo elétrico na câmara. A Equação (4.1) mostra que a média (elétrica) da densidade de energia é igual e constante para uma dada câmara. Isto é, que o campo é uniforme com relação a localização e orientação em qualquer ponto no interior da ZCU. Estes dois aspectos da uniformidade estatística do campo implicam:

- **Isotropia:** Uniformidade em relação a orientação dos campos EM no interior da ZCU (uniformidade da polarização).
- **Homogeneidade:** Uniformidade em relação a localização no interior da ZCU (uniformidade espacial).

Para avaliar a isotropia e homogeneidade do campo dentro de uma câmara de reverberação Arnaut e West (2000) introduziu coeficientes anisotrópicos e não-homogêneos para os campos. Estes coeficientes produzem medidas de desempenho específicas para homogeneidade dos campos e aleatoriedade da polarização dentro da CR.

### 4.1.1 Anisotropia do Campo Elétrico

Os coeficientes de anisotropia do campo ( $A_{\alpha,\beta}$ ) são definidos por

$$\langle A_{\alpha\beta} \rangle = \left\langle \frac{\frac{|E_\alpha|^2}{P_i} - \frac{|E_\beta|^2}{P_i}}{\frac{|E_\alpha|^2}{P_i} + \frac{|E_\beta|^2}{P_i}} \right\rangle, \quad (4.2)$$

em que  $P_i$  é a potência injetada na câmara de reverberação,  $|E_\alpha|$  e  $|E_\beta|$  representam a intensidade máxima de campo elétrico medido na direção  $\alpha$  ( $x$ ,  $y$  ou  $z$ ) e  $\beta$  ( $x$ ,  $y$  ou  $z$ ) com  $\alpha \neq \beta$ . O operador  $\langle \rangle$  representa a média aritmética dos valores conjunto considerando todas as posições do agitador. Se as diferentes componentes de campo  $|E_\alpha|$  e  $|E_\beta|$  são medidas simultaneamente (usando um sensor 3-D)  $P_i$  pode ser considerado constante e a Equação (4.2) pode ser simplificada, resultando na Equação (4.3). Portanto,  $P_i$  é usado em (4.2) para casos em que a medida é realizada em uma única polarização linear ( $x$ ,  $y$  ou  $z$ ) durante uma rotação do agitador. Quando a antena receptora é re-orientada nas duas polarizações restantes, a antena transmissora “vê” uma configuração ligeiramente diferente, assim  $P_i$  muda de uma polarização para outra.

$$\langle A_{\alpha\beta} \rangle = \left\langle \frac{|E_\alpha|^2 - |E_\beta|^2}{|E_\alpha|^2 + |E_\beta|^2} \right\rangle, \quad (4.3)$$

Os coeficientes anisotrópicos são quantidades normalizadas, seus valores variam entre -1 e 1 para cada posição do agitador. Nos casos em que  $A_{\alpha\beta} = \pm 1$  a polarização do campo é estatisticamente linear em um ponto (no qual a medição é realizada) do plano  $\alpha\beta$ , e no caso de  $A_{\alpha\beta} = 0$  a polarização do campo é estatisticamente isotrópica (ARNAUT, 1998). O coeficiente total de anisotropia ( $A_{tot}$ ) fornece uma métrica geral ao calcular o valor normalizado dos três coeficientes de anisotropia, sendo definido por

$$\langle A_{tot} \rangle = \left\langle \sqrt{\frac{A_{xy}^2 + A_{yz}^2 + A_{zx}^2}{3}} \right\rangle, \quad (4.4)$$

seu valor varia entre +1 (estatisticamente linearmente polarizado) e 0 (estatisticamente isotrópico). A vantagem de utilizar as Equações (4.3) e (4.4) está na simplicidade experimental de obtenção dos dados.

Indiretamente o coeficiente de anisotropia total fornece um parâmetro de avaliação do agitador, valores típicos (em dB) obtidos por meio de medições para agitadores de desempenho “médio” e “bom” são mostrados na Tabela 4.1.

**Tabela 4.1** – Valores típicos do coeficiente de anisotropia total  $\langle A_{tot} \rangle$  para desempenho “bom” e “médio” (ARNAUT; WEST, 1999; ARNAUT; WEST, 1998).

Qualidade do agitador	Número de passos do agitador (N)			
	N = 10	N = 20	N = 100	N = 300
“Médio”	- 2.5 dB	- 5.0 dB	- 7.5 dB	- 10.0 dB
“Bom”	- 5.0 dB	- 10.0 dB	- 12.5 dB	- 15.0 dB

Estes coeficientes de anisotropia foram estendidos por (ARNAUT; SERRA; WEST, 2017) para representar a anisotropia estatística em câmaras de reverberação funcionando em condições não ideais.

### 4.1.2 Não-Homogeneidade do Campo Elétrico

A não-homogeneidade dos campos refere-se a não uniformidade do campo em relação a localização dentro da câmara, enquanto que a anisotropia é a não uniformidade do fluxo de energia local. A não-homogeneidade pode ser avaliada em termos da

potência total medida em diferentes pontos ou em termos de energia transportada ao longo de uma direção arbitrária  $\alpha$ .

Os coeficientes de não-homogeneidade do campo são definidos como

$$\langle I_{\alpha}(r_j, r_k) \rangle = \left\langle \frac{\frac{|E_{\alpha}(r_j)|^2}{P_i} - \frac{|E_{\alpha}(r_k)|^2}{P_i}}{\frac{|E_{\alpha}(r_j)|^2}{P_i} + \frac{|E_{\alpha}(r_k)|^2}{P_i}} \right\rangle, \quad (4.5)$$

em que  $r_j$  e  $r_k$  representam duas coordenadas distintas da ZCU.

O coeficiente de não-homogeneidade total do campo é composto pelos coeficiente de não-homogeneidade em  $x$ ,  $y$  e  $z$ , sendo calculado por

$$\langle I_{tot} \rangle = \left\langle \sqrt{\frac{I_x^2 + I_y^2 + I_z^2}{3}} \right\rangle. \quad (4.6)$$

Ao avaliar (4.5) deve-se evitar selecionar coordenadas  $r_i$  separados por distâncias muito abaixo do comprimento de onda (da menor frequência utilizável) para o qual os campos são altamente correlacionados. Uma distância mínima de meio comprimento de onda é recomendada (COMPATIBILITY, 2011).

O fato da não-homogeneidade do campo ser analisada de forma similar a anisotropia é consequência de que ambos os fenômenos fazem parte de um fenômeno em comum, isto é, a não uniformidade dos campos.

### 4.1.3 Uniformidade do Campo

Talvez a medida mais comum de uniformidade do campo é a especificada pela norma internacional IEC 61000-4-21. O método sugerido pela norma requer medições nos vértices do volume de trabalho para avaliação direta da uniformidade do campo. O indicador do padrão de uniformidade combina a homogeneidade e a anisotropia do campo.

Para avaliar a uniformidade do campo, o valor máximo do campo elétrico deve ser medido em oito vértices da ZCU. O volume de trabalho deve estar a uma distância de  $\frac{\lambda_{MFU}}{4}$  das paredes da câmara, agitadores, antenas e qualquer outro objeto eletromagneticamente relevante.

O valor máximo de cada componente de campo elétrico durante uma rotação completa do agitador ( $\phi_j = \phi_1, \dots, \phi_N$ ) é normalizado pelo valor da potência de entrada

$P_i$ .

$$\tilde{E}_{\xi,i} = \frac{\phi_j = \phi_1, \dots, \phi_N \left| E_{\xi}(r_i) \right|_{\phi_j}}{\sqrt{P_i}}, \quad (4.7)$$

em que  $\xi = x, y, z$ ,  $j$  é a posição do agitador e  $i$  é um dos vértices do volume de trabalho  $i = 1, \dots, 8$ .

O desvio padrão é calculado para as três componentes lineares do campo elétrico ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ) para uma rotação do agitador e considerando os oito pontos do volume de trabalho.

O desvio padrão de cada componente é dado por

$$\sigma_{\alpha} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (\tilde{E}_{\alpha,i} - \langle \tilde{E}_{\alpha} \rangle)}{8 - 1}}. \quad (4.8)$$

O desvio padrão do campo total é

$$\sigma_{tot} = \sqrt{\frac{\sum_{\alpha=x,y,z} \sum_{i=1}^8 (\tilde{E}_{\alpha,i} - \langle \tilde{E}_{tot} \rangle)}{24 - 1}}. \quad (4.9)$$

Por conveniência, o desvio padrão é expressado (em dB) por

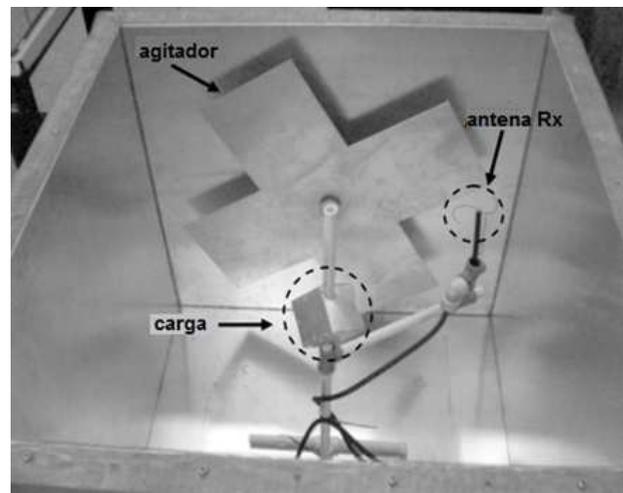
$$\sigma_{\xi, dB} = 20 \log_{10} \left( \frac{\sigma_{\xi} + \langle \tilde{E}_{\xi} \rangle}{\langle \tilde{E}_{\xi} \rangle} \right). \quad (4.10)$$

Quando aplicado de acordo com a norma IEC 61000-4-21, o procedimento para avaliação da uniformidade do campo também fornece como resultado parâmetros como, por exemplo, a menor frequência utilizável, a máxima carga tolerável de uma câmara, etc.

Nos trabalhos de Cantalice *et al.* (2009), o desvio padrão do campo elétrico foi medido e calculado para um cubo metálico no interior da ZCU. Inicialmente, o cubo metálico foi posicionado simetricamente as paredes da câmara de reverberação, verificou-se que os valores do desvio padrão não ultrapassaram o limite estabelecido pelo norma IEC 61000-4-21 (3 dB). Posteriormente, o cubo metálico foi posicionado de forma assimétrica (Figura 4.1) às paredes da CR, verificando valores do desvio padrão maiores que o limite estabelecido em norma. Dessa forma, o desvio padrão mostra-se dependente da posição do equipamento sob teste (EST). É importante adotar estratégias que busquem

reduzir e equalizar os valores do desvio padrão, para que os valores do desvio padrão continuem abaixo de 3 dB independente da posição do EST.

**Figura 4.1** – Cubo metálico no interior da câmara de reverberação.



Fonte: O Autor

## 4.2 Fator de Qualidade

O fator de qualidade ( $Q$ ) é um indicador da capacidade de um sistema (como uma CR por exemplo) em armazenar energia. Um alto valor de  $Q$  indica que uma CR possui baixas perdas, sendo muito eficiente em armazenar energia. O fator de qualidade é um parâmetro importante, pois permite prever a intensidade média do campo resultante para uma dada potência de entrada.

A seguir, é apresentada uma análise teórica do fator de qualidade, com a expressão de cada termo que compõe o fator de qualidade total.

### 4.2.1 Fator de Qualidade Teórico

O fator de qualidade teórico é definido como

$$Q = \frac{\omega(W_m + W_e)}{P_c + P_d}, \quad (4.11)$$

em que,  $\omega = 2\pi f$  é a frequência angular,  $W_m$  é a energia média armazenada pelo campo magnético,  $W_e$  é a energia média armazenada pelo campo elétrico,  $P_c$  é a potência

dissipada nas paredes condutoras e  $P_d$  é a potência dissipada no dielétrico (HILL, 1998a).

Na frequência de ressonância a energia média armazenada pelo campo magnético é igual a energia média armazenada pelo campo elétrico ( $W_m = W_e$ ). A energia armazenada pelo campo elétrico para o modo dominante  $TE_{101}$  é dado por

$$W_e = \frac{\epsilon}{4} \iiint_V E_y E_y^* dv = \frac{\epsilon}{4} \iiint_V |E_y|^2 dv, \quad (4.12)$$

sendo,

$$E_y = E_0 \text{sen} \left( \frac{\pi x}{a} \right) \text{sen} \left( \frac{\pi z}{d} \right). \quad (4.13)$$

Substituindo (4.13) em (4.12), obtêm-se

$$W_e = \frac{\epsilon}{4} \int_0^d \int_0^b \int_0^a E_0^2 \text{sen}^2 \left( \frac{\pi x}{a} \right) \text{sen}^2 \left( \frac{\pi z}{d} \right) dx dy dz. \quad (4.14)$$

Substituindo a identidade trigonométrica  $\text{sen}^2(x) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos(2x)$  na Equação (4.14), chega-se a

$$W_e = \frac{\epsilon abd}{16} E_0^2. \quad (4.15)$$

A energia média armazenada pelo campo magnético é obtida de forma análoga, resultando em

$$W_m = \frac{\epsilon abd}{16} E_0^2, \quad (4.16)$$

ou seja  $W_e = W_m$ .

A perda nas paredes condutoras ( $P_c$ ) é calculado por

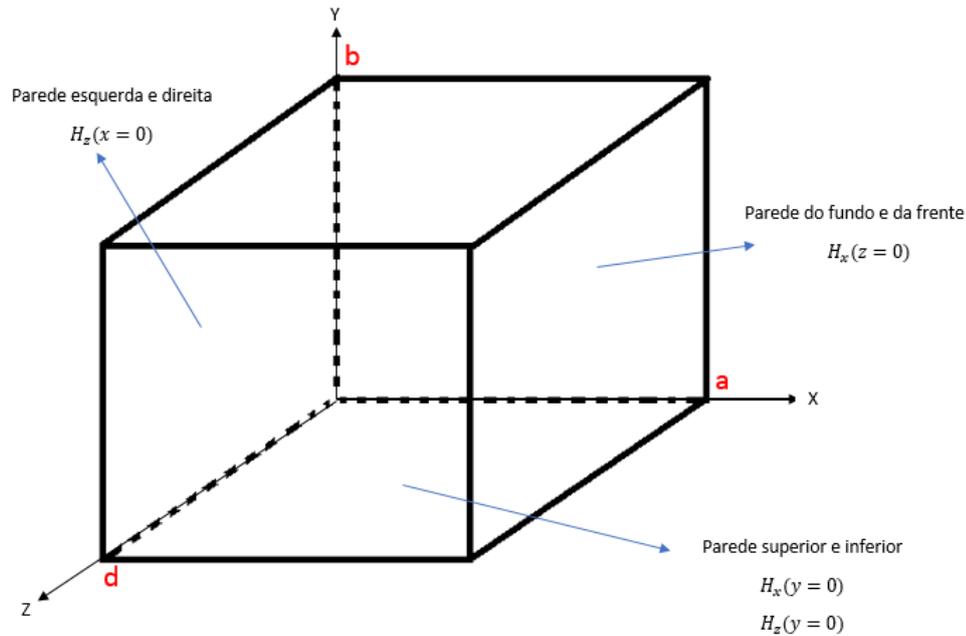
$$P_c = \frac{R_s}{2} \iint_S |H_t|^2 ds, \quad (4.17)$$

em que  $R_s$  é a resistência superficial das paredes metálicas dada por

$$R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu}{2\sigma_c}}, \quad (4.18)$$

em que  $\sigma_c$  é a condutividade das paredes metálicas e  $H_t$  é o campo magnético tangencial as superfícies das paredes metálicas. A contribuição devida à parede superior é igual a contribuição da parede inferior, o mesmo acontece com as contribuições da parede lateral direita e esquerda e da parede frontal e posterior, como ilustrado na Figura 4.2.

**Figura 4.2** – Contribuição de cada parede de uma cavidade retangular.



Fonte: O Autor

Desenvolvendo (4.17),

$$P_c = \frac{R_s}{2} \left\{ 2 \int_0^b \int_0^a |H_x(0)|^2 dx dy + 2 \int_0^d \int_0^b |H_z(x=0)|^2 dy dz + \right. \\ \left. 2 \int_0^d \int_0^a \left[ |H_x(y=0)|^2 + |H_z(y=0)|^2 \right] dx dz, \right. \quad (4.19)$$

resultando em

$$P_c = \frac{R_s E_0^2 \lambda^2}{8 \eta'^2} \left( \frac{ab}{d^2} + \frac{bd}{a^2} + \frac{a}{2d} + \frac{d}{2a} \right), \quad (4.20)$$

em que,  $\lambda$  é o comprimento de onda e  $\eta'$  é a impedância intrínseca do meio.

A perda no dielétrico é dada pela seguinte equação

$$P_d = \frac{\omega\epsilon''}{2} \iiint_V |\vec{E}|^2 dx dy dz = \frac{abd\omega\epsilon'' E_0^2}{8}, \quad (4.21)$$

em que  $\epsilon''$  é a componente complexa da permissividade do meio.

O fator de qualidade considerando apenas as perdas nas paredes condutoras ( $Q_c$ ) é calculado substituindo (4.20), (4.16) e (4.15) em (4.11), obtendo-se (4.22). Já o fator de qualidade considerando apenas as perdas no dielétrico ( $Q_d$ ) é obtido substituindo (4.21), (4.16) e (4.15) em (4.11), resultando na Equação (4.23), no qual  $\tan(\delta)$  é a tangente de perdas do dielétrico.

$$Q_c = \frac{(had)^3 b \eta'}{2\pi^2 R_s (2a^3 b + 2bd^3 + a^3 d + ad^3)}, \quad (4.22)$$

$$Q_d = \frac{1}{\tan(\delta)}. \quad (4.23)$$

O fator de qualidade total ( $Q_t$ ) é dado pela soma das contribuições do fator de qualidade considerando as perdas do dielétrico e as perdas nas paredes condutoras, sendo definido pela seguinte equação

$$Q_t = \left( \frac{1}{Q_c} + \frac{1}{Q_d} \right)^{-1}. \quad (4.24)$$

Substituindo as Equações (4.22) e (4.23) na Equação (4.24), resulta em

$$Q_t = \frac{(kad)^3 b \eta'}{\tan(\delta) (kad)^3 b \eta' + 2\pi^2 R_s (2a^3 b + 2bd^3 + a^3 d + ad^3)}. \quad (4.25)$$

O limite teórico para o fator de qualidade é dado nos trabalhos de Holloway *et al.* (2006), sendo calculado por

$$Q_t = \left( \frac{4}{3} \pi \right)^{\frac{2}{3}} \frac{3V^{\frac{1}{3}}}{2\lambda}. \quad (4.26)$$

## 4.2.2 Fator de Qualidade Experimental

A medição do fator ( $Q$ ) é realizada considerando uma antena transmissora ( $T_x$ ) e uma receptora ( $R_x$ ) dentro da câmara de reverberação, e registrando a potência recebida ( $P_{R_x}$ ) e transmitida ( $P_{T_x}$ ) (HILL *et al.*, 1994b). O fator de qualidade pode ser estimado

por

$$Q = \frac{16\pi^2 V P_{Rx}}{\lambda^3 P_{Tx}}. \quad (4.27)$$

A Equação (4.27) representa uma estimativa do fator de qualidade de uma câmara. Nos trabalhos de Wang *et al.* (2013) é proposta uma nova aproximação para o fator de qualidade (considerando a câmara equipada com agitadores de alta eficiência), dada por

$$Q = \frac{1}{2} \epsilon \omega a b d |\bar{E}|^2, \quad (4.28)$$

em que,  $|\bar{E}|$  é a média do campo elétrico normalizado ( $\bar{E}$ ) calculado por

$$|\bar{E}| = \frac{|E|}{\sqrt{P_{Tx}}}. \quad (4.29)$$

A Equação (4.28) deve ser avaliada considerando todas as posições do agitador ( $\varphi_j = \varphi_1 \dots \varphi_N$ ), no qual pode-se calcular o fator de qualidade médio,

$$Q' = \langle Q \rangle_{\varphi_j = \varphi_1 \dots \varphi_N}. \quad (4.30)$$

Em Bruns (2005) é ressaltado que antenas geometricamente grandes podem resultar em um fator de qualidade não correspondente à câmara de reverberação.

O fator de qualidade experimental permite calcular previamente outros parâmetros da CR, como: intensidade média do campo elétrico, constante de tempo, número de modos excitados e largura de banda. Um fator de qualidade elevado, acarreta em maior número de modos excitados e consequentemente as características do campo elétrico no interior da ZCU são satisfeitas.

# Capítulo 5

## Material Utilizado

Neste capítulo, é apresentado um breve resumo sobre as características dos principais materiais empregados, justificando a escolha de cada um deles. Além disso, é destacado procedimentos de adaptação da câmara de reverberação para utilização da antena receptora e modificações realizadas nos agitadores de modos.

### 5.1 Câmara de Reverberação

A câmara de reverberação disponível no LEMA e utilizada neste trabalho é mostrada na Figura 5.1, possuindo as seguintes dimensões:

Altura:  $a = 80$  cm,

Largura:  $b = 85$  cm,

Comprimento:  $d = 90$  cm.

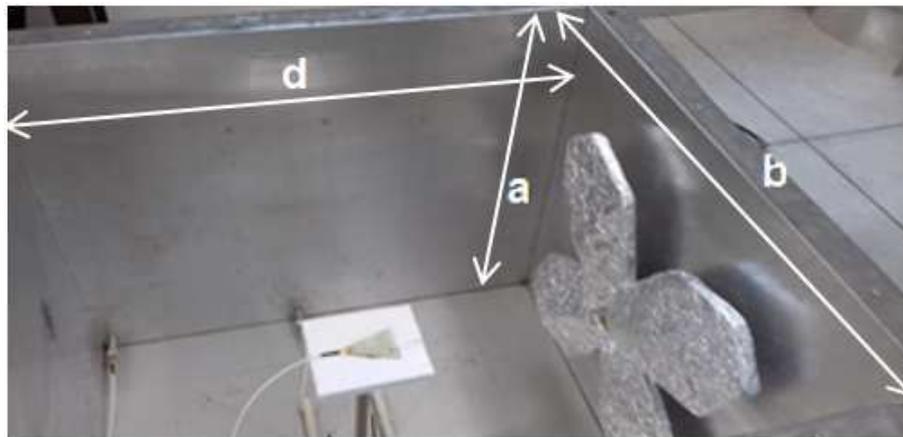
Segundo Silva *et al.* (2006) o volume de trabalho disponível para uma câmara com tais dimensões é  $55 \times 60 \times 65$  cm<sup>3</sup> (altura x largura x comprimento), que corresponde a aproximadamente 35% do volume total da câmara.

A frequência de corte é calculada pela Equação (2.20), em que considera-se o modo  $TE_{011}$ ,

$$f_c = \frac{3 \times 10^8}{2} \sqrt{\left(\frac{0}{0,8}\right)^2 + \left(\frac{1}{0,9}\right)^2 + \left(\frac{1}{0,85}\right)^2} = 242,4 \text{ MHz.} \quad (5.1)$$

A MFU é calculada multiplicando a frequência de corte por três, resultando em 728,2 MHz.

**Figura 5.1** – Dimensões da CR disponível no LEMA. As dimensões estão indicadas pelas letras *a*, *b* e *d*.



Fonte: O Autor

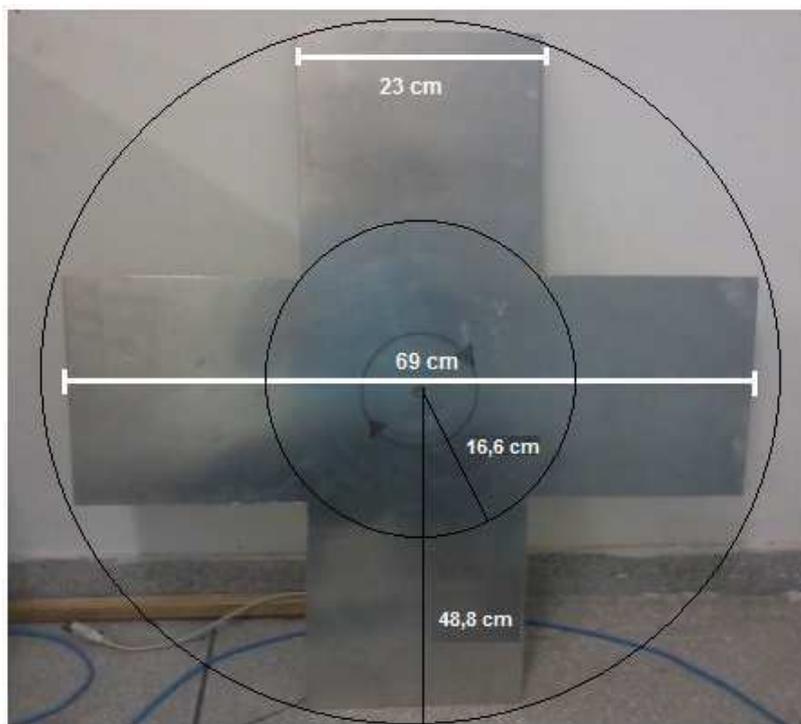
## 5.2 Agitador de Modos

Para escolher adequadamente o tamanho e a geometria do agitador, deve-se levar em conta o volume que o agitador ocupa (já que o volume dentro da CR é limitado). Bai *et al.* (1999) sugere que um agitador com dimensões entre 50% e 75% de uma das paredes da câmara é capaz de elevar a uniformidade do campo em seu interior. De acordo com Harima e Yamanaka (1999), um agitador deve ter dimensões entre um e três comprimentos de onda. Segundo Corona, Ferrara e Migliaccio (1996) agitadores com formato de cruz são mais eficientes que os agitadores em formato de pá retangular (comumente utilizado) e ocupam um menor volume.

Um dos agitadores disponíveis no LEMA (intitulado por AGM 1) possui dimensões menores ou iguais a  $1,8\lambda_0 = 69$  cm, em que,  $\lambda_0$  é o comprimento de onda da menor frequência utilizável. As dimensões deste agitador podem ser visualizadas na Figura 5.2.

Os dois círculos concêntricos em destaque na Figura 5.2, evidenciam duas condições de contorno distintas. O menor círculo indica a região em que as condições de contorno não se alteram durante a rotação do agitador. Dessa forma, essa região não contribui de forma na elevação dos níveis de uniformidade dentro do volume útil. Na região entre o maior e o menor círculo as condições de contorno são constantemente alteradas durante a movimentação do agitador, contribuindo na uniformidade dos campos.

Visando maximizar a eficiência em relação AGM 1, Silva *et al.* (2006) projetou um

**Figura 5.2** – Dimensões do AGM 1.

Fonte: O Autor

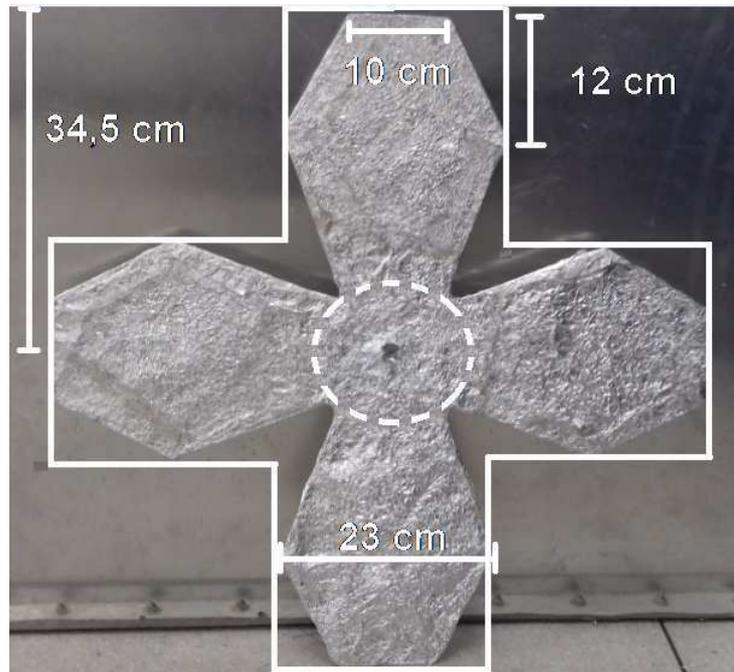
novo agitador (intitulado de AGM 2) em que a área central e a área útil foram reduzidas, conforme as dimensões destacadas na Figura 5.3.

Pode-se notar que a superfície do AGM 1 é lisa ou possui baixo grau de rugosidade. Se uma superfície é lisa, então as ondas refletidas a partir dessa superfície sofrem um deslocamento de fase. Porém, se existir uma diferença de altura média  $\Delta h$  entre dois pontos da superfície as ondas refletidas sofrem um deslocamento de fase (SALGADO, 2016), além disso, a onda refletida é dispersa em um grande número de direções na superfície (Figura 5.4), ampliando a energia dispersa.

Para aumentar a rugosidade da superfície do agitador, o AGM 2 foi coberto com duas camadas de papel alumínio, como mostra a Figura 5.3. Espera-se que essa modificação acentue as reflexões e os níveis de uniformidade dentro da CR.

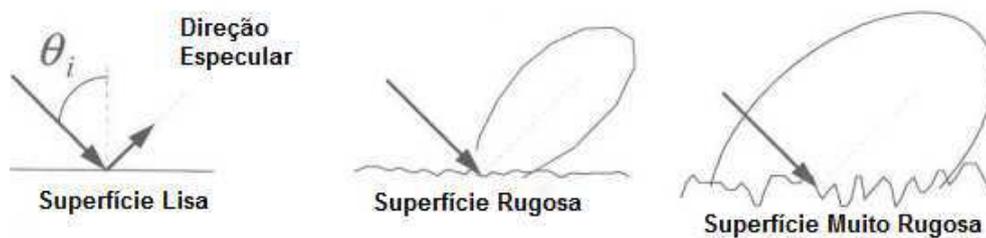
Em 2010, Hong e Huh (2010) conduziram um experimento em que a uniformidade do campo foi avaliada em função do ângulo de abertura do agitador de modos. Vários ângulos de abertura foram testados até encontrar uma faixa de ângulos (de  $120^\circ$  a  $180^\circ$ ) em que os níveis de uniformidade são aceitáveis. Levando em consideração esse efeito, projetou-se um novo agitador de modos (denominado de AGM 3) mostrado na Figura

**Figura 5.3** – AGM 2 coberto com duas camadas de papel alumínio. Em destaque o AGM 1 (em branco) e as dimensões do AGM 2.



Fonte: O Autor

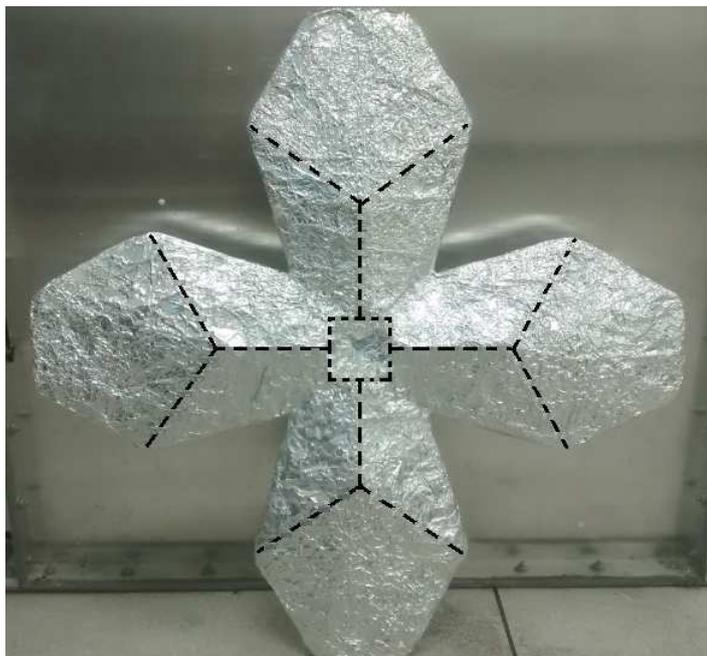
**Figura 5.4** – Efeito da reflexão em superfícies rugosas e lisas.



Fonte: O Autor

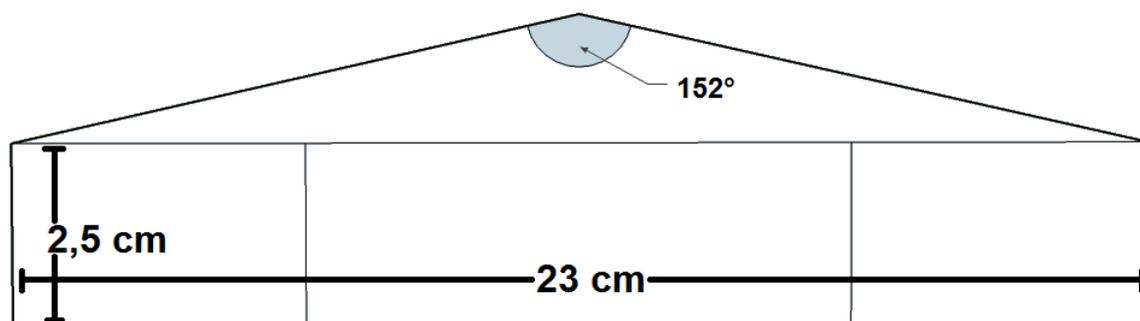
5.5. Este agitador possui as mesmas dimensões e características (superfície rugosa) do AGM 2. Na impossibilidade de construir um agitador com ângulo de abertura variável, foi escolhido um ângulo de abertura de  $152^\circ$  (entre  $120^\circ$  a  $180^\circ$  encontrados por Hong) para testes. Além disso, a região central foi reduzida, aumentando ainda mais a área útil do AGM, as dimensões de uma das pás deste agitador são mostradas na Figura 5.6.

**Figura 5.5** – Vista frontal do AGM 3 com ângulos de abertura em destaque.



Fonte: O Autor

**Figura 5.6** – Vista lateral de uma das pás do AGM 3. Sua espessura, largura e ângulo de abertura estão indicados.



Fonte: O Autor

### 5.3 Refletor

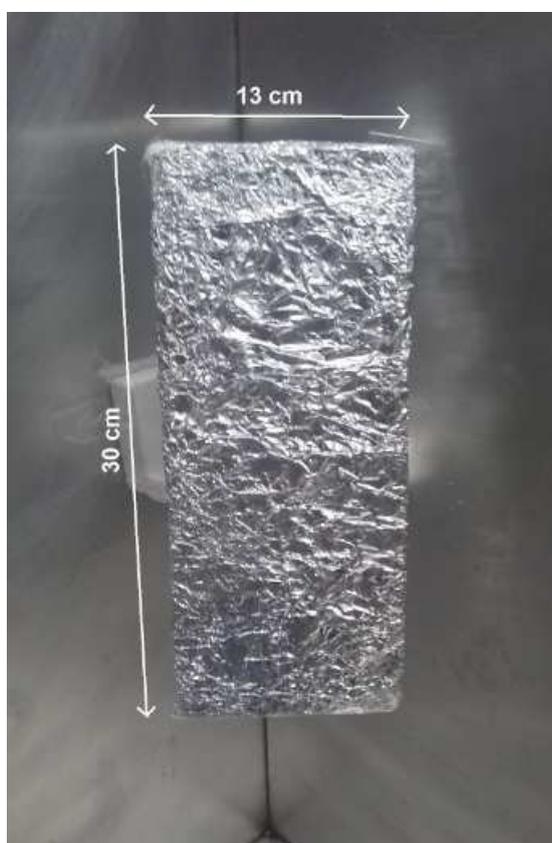
Refletores são largamente utilizados para modificar as características do diagrama de irradiação de uma antena. O uso mais comum é direcionar a potência irradiada.

Migliaccio *et al.* (2016) verificou que se a antena receptora (Rx) recebe diretamente o feixe irradiado pela antena transmissora (Tx), há uma degradação significativa nos indicadores de desempenho. Kostas e Boverie (1991) ressaltaram que ao bloquear o feixe direto entre a antena Tx e Rx, a média dos campos pode ser considerada nula,

sugerindo como alternativa posicionar a antena em um dos vértices da câmara.

A solução sugerida por Kostas e Boverie (1991) funciona bem com antenas muito diretivas, nas quais a relação frente-costas é alta. Dependendo do tipo de antena RX empregada, posicioná-la em um dos cantos da CR pode não ser o suficiente para garantir que boa parte da potência irradiada pela antena Tx seja recebida diretamente. Para evitar casos como este, projetou-se um refletor do tipo retangular, cujas dimensões são apresentadas na Figura 5.7. Espera-se que o emprego do refletor possa garantir que todo o campo recebido pela antena Rx seja devido às reflexões dentro da câmara.

**Figura 5.7** – Dimensões do refletor retangular.



Fonte: O Autor

## 5.4 Antenas

Para realizar medições de CEM de acordo com as normas internacionais, é necessário utilizar duas antenas, uma delas operando como receptora (Rx) e outra como transmissora (Tx). Para atuar como antena receptora foi escolhida uma antena isotró-

pica TS-EMF (fabricada pela Rohde & Schwarz<sup>©</sup>) que permite uma detecção rápida e relativamente fácil de campos EM independentes de sua direção e polarização em cenários eletromagneticamente complexos. A versão utilizada é a B2 (TS-EMF-B2), como mostrado na Figura 5.8, proporcionando medições entre 30 MHz e 3 GHz, além disso, é possível chavear via programa entre as polarizações  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

**Figura 5.8** – Antena isotrópica receptora TS-EMF da R&S<sup>©</sup>.



Fonte: O Autor

O programa utilizado para aquisição de dados é o RFEX (*Radio Frequency Exposure*), que fornece toda a configuração necessária para utilizar a antena. É importante manter o programa sempre atualizado para evitar incompatibilidade com sistemas operacionais mais recentes. A antena conta ainda com uma proteção contra impactos mecânicos/poluição ambiente, totalizando um peso (incluindo os cabos) de 1,3 quilogramas e um diâmetro de 17 centímetros.

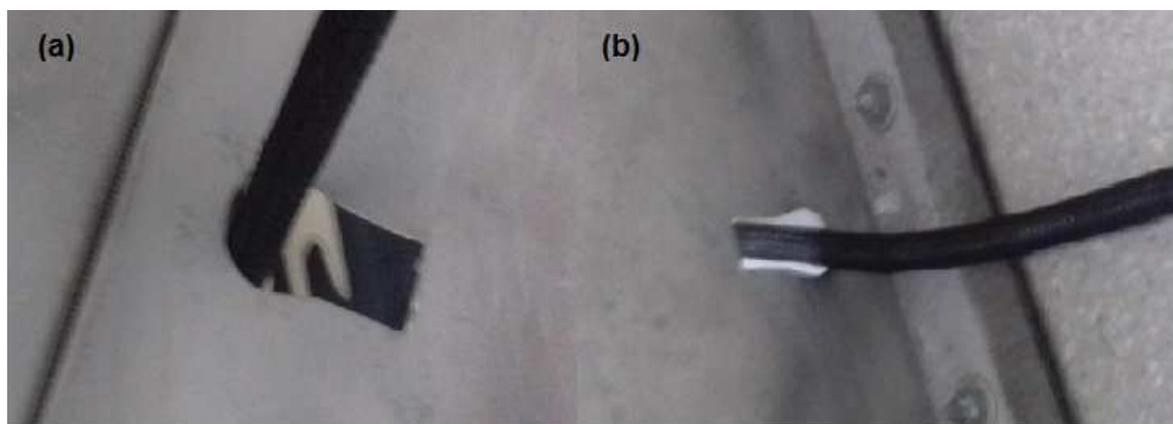
A antena TS-EMF possui um conector tipo N fêmea para conectar ao analisador de espectro e um conector do tipo RS-232 fêmea para conectar ao computador (Figura 5.9), além disso, o próprio *kit* da antena fornece um conversor Serial-USB, permitindo o uso em computadores modernos.

Para a passagem dos cabos da antena TS-EMF, uma abertura de passagem foi criada

**Figura 5.9** – Conectores coaxial e serial da antena TS-EMF.

Fonte: O Autor

em uma das paredes da câmara, como mostra a Figura 5.10. Depois da passagem dos cabos, a abertura foi fechada com papel alumínio, como pode ser visto na Figura 5.11.

**Figura 5.10** – Abertura para passagem dos cabos da antena TS-EMF: (a) Interior da CR; (b) Exterior da CR.

Fonte: O Autor

A fixação da antena TS-EMF foi realizada por meio da modificação do suporte já existente. A base do suporte anterior foi mantida, apenas a haste e o suporte de fixação na antena foram modificados. Duas hastes foram construídas, com dimensões de 25 cm e 60 cm, respectivamente (Figura 5.12), de forma que a antena receptora pode ser fixada no vértice inferior ou superior da ZCU apenas trocando as hastes.

A antena transmissora utilizada é do tipo dipolo impresso (Figura 5.13) de meio comprimento de onda operando em 2,45 GHz, uma das vantagens da utilização desta antena está em suas dimensões, ocupando um volume reduzido no interior da CR. A

**Figura 5.11** – Isolação da abertura de passagem dos cabos da antena TS-EMF.



Fonte: O Autor

**Figura 5.12** – Hastes de fixação da antena TS-EMF.



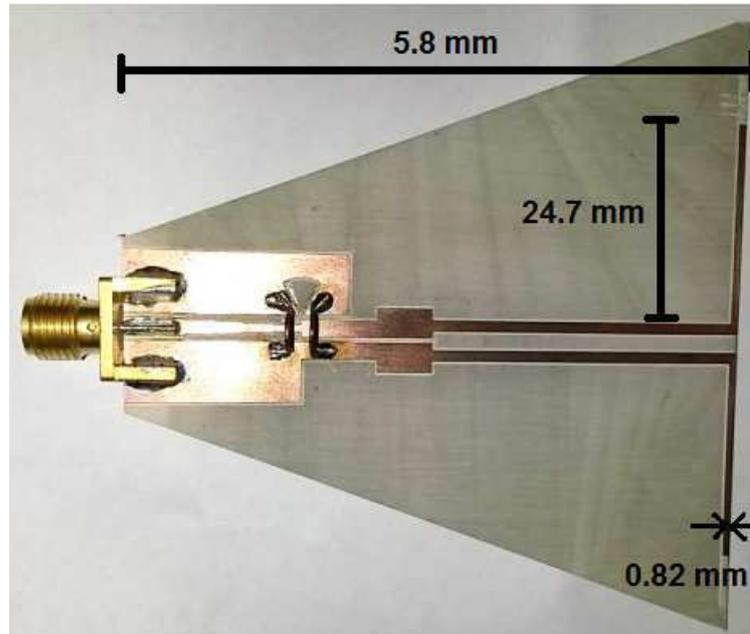
Fonte: O Autor

estrutura de casamento de impedância contém uma transição coaxial-bifilar para que seja possível sua conexão com o cabo coaxial de 50 Ohms. A transição possui, além de um toco radial <sup>1</sup> uma estrutura CPW (*Coplanar Waveguide*) para realizar a adaptação

<sup>1</sup>Estrutura utilizada para casamento de impedância

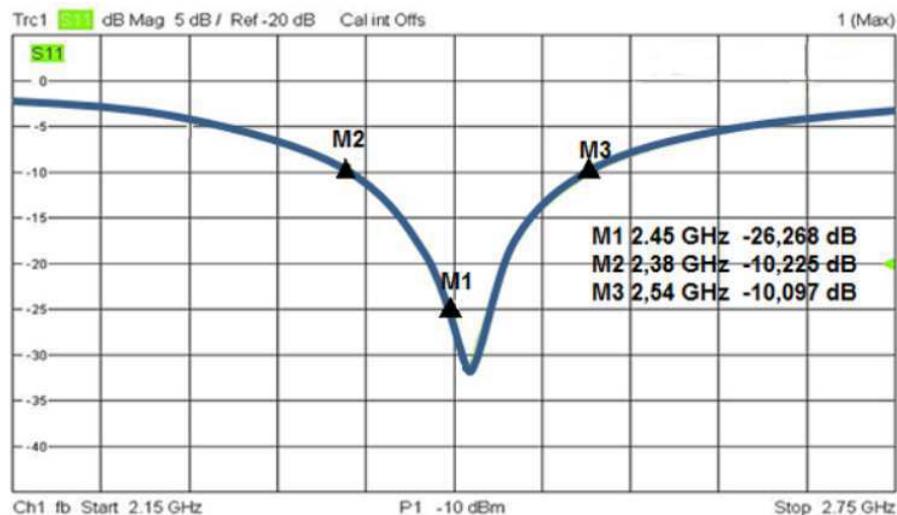
de impedância. A espessura da trilha da antena dipolo é de 1 mm. O coeficiente de reflexão ( $S_{11}$ ) medido é mostrado na Figura 5.14, os marcadores M2 e M3 indicam a largura de banda de 163 MHz, o marcador M1 indica a frequência de ressonância definida no projeto da antena (2.45 GHz), o valor do coeficiente ( $S_{11}$ ) nesta frequência é de -26,27 dB indicando boa eficiência.

**Figura 5.13** – Dimensões do dipolo impresso utilizado como antena transmissora.



Fonte: O Autor

**Figura 5.14** – Coeficiente de reflexão medido antena do tipo dipolo impresso.



Fonte: O Autor

# Capítulo 6

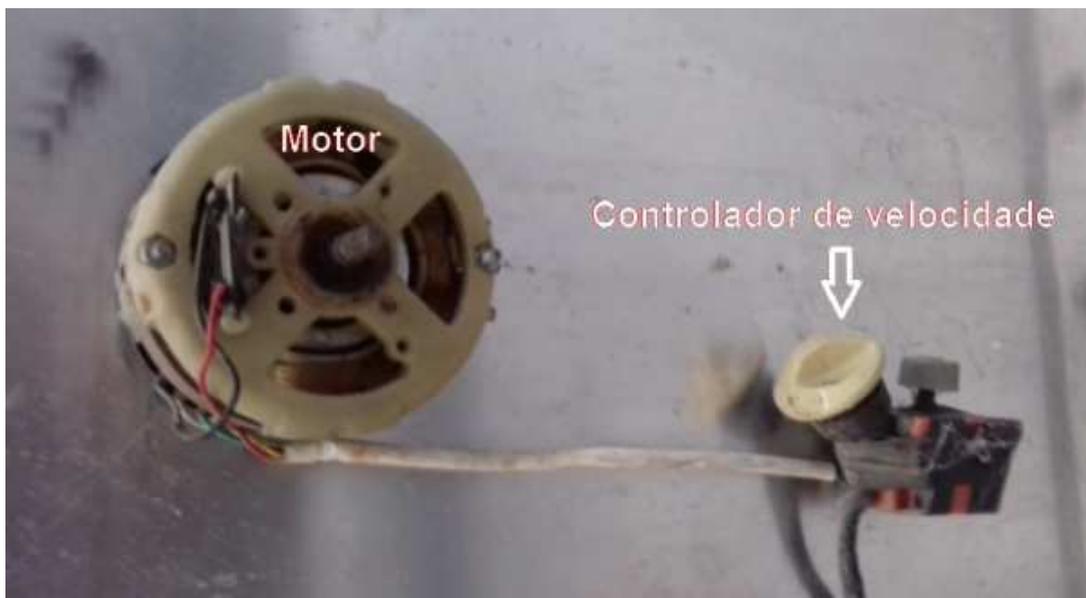
## Técnica de Agitação Utilizada

A técnica de agitação mecânica é considerada a técnica mais comum empregada para perturbar os campos dentro de uma câmara de reverberação. A ação de agitação mecânica é realizada pela rotação ou movimentação de agitadores, situados dentro dos limites da câmara. A finalidade dessa técnica é tornar a distribuição do campo estatisticamente uniforme e isotrópica em torno da média.

### 6.1 Sistema de Movimentação

A câmara de reverberação disponível no Laboratório de Micro-ondas Aplicados (LEMA) conta com um sistema de movimentação contínua do agitador, esse sistema é composto por um circuito de controle de velocidade projetado por Silva (2008) e um motor de indução como é mostrado na Figura 6.1. Devido a necessidade de uma corrente elevada para atingir o torque necessário, o motor aquece rapidamente podendo danificá-lo.

Os parâmetros de desempenho apresentados neste trabalho dependem da posição angular do agitador. O sistema de agitação contínua não permite avaliar tais parâmetros para cada posição angular do agitador. Dessa forma, foi projetado um sistema de movimentação em que a posição do agitador de modos pode ser controlada via programa. O sistema é composto por um computador, Arduíno UNO, Ponte H e motor de passo, como pode ser observado na diagrama da Figura 6.2.

**Figura 6.1** – Sistema de movimentação contínua.

Fonte: O Autor

**Figura 6.2** – Diagrama de blocos do sistema de controle.

Fonte: O Autor

## 6.2 Motor de Passo

Os motores de passo são dispositivos eletromecânicos que convertem pulsos elétricos em movimento mecânico, gerando variações angulares discretas. A velocidade em que o motor gira é dada pela frequência de pulsos recebidos e o deslocamento angular é diretamente relacionado ao número de pulsos.

As bobinas internas do motor de passo podem assumir duas configurações básicas: unipolar e bipolar. A forma como as bobinas estão conectadas determina a forma de controle do motor e o tipo de módulo que pode ser utilizado. O motor de passo disponível no LEMA (Figura 6.3) é utilizado na configuração bipolar (Figura 6.4). Na configuração bipolar, as bobinas internas são independentes (A+A- e B+B-). Para identificar os pares (A+A- e B+B-), utiliza-se um ohmímetro. A resistência elétrica apre-

sentada pelas bobinas é baixa (da ordem de alguns Ohms). Se ao medir for detectado algum valor de resistência, então uma bobina foi encontrada. A identificação de qual bobina é A e qual bobina é B é importante neste caso, pois não há nenhuma indicação no motor do seu modelo (ou número de série) nem de quais fios correspondem a cada bobina. Para saber os níveis de tensão e corrente que o motor opera em segurança, utiliza-se um fonte ajustável em que é possível monitorar a corrente drenada pela fonte. Ao realizar o monitoramento de tensão e de corrente, notou-se que o motor de passo disponível no LEMA funciona satisfatoriamente em 0,8 A e 6,4 V.

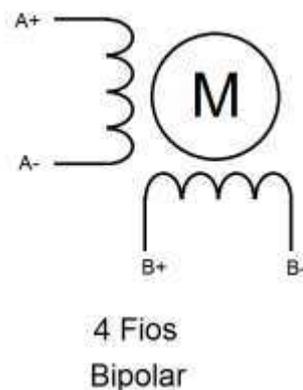
**Figura 6.3** – Motor de passo disponível no LEMA.



Fonte: O Autor

Motores bipolares necessitam de módulos capazes de fornecer a corrente apropriada para seu funcionamento, já que microcontroladores (como o Arduíno) não possuem tensão nem corrente suficiente para alimentar diretamente motores desse porte. Geralmente, módulos com Ponte H são largamente utilizados na companhia de motores de passo.

Ao substituir o motor de indução do sistema de movimentação contínua pelo motor

**Figura 6.4** – Configuração bipolar do motor de passo de quatro fios.

Fonte: O Autor

de passo, foi projetado um suporte para fixação do motor permitindo utilizar os furos de passagem dos parafusos do motor de indução anteriormente empregado (Figura 6.5). O motor fixado na câmara de reverberação é mostrado na Figura 6.6a. Observando a Figura 6.6b, nota-se que o comprimento do eixo do motor de passo é curto o bastante para tornar inviável a fixação de agitadores. Para contornar esse problema, foi projetado um prolongamento do eixo do motor (Figura 6.7) de forma que o agitador de modos fique 5 cm distante da parede da câmara de reverberação.

### 6.3 Ponte H

A Ponte H é um circuito utilizado para controlar um motor DC a partir de sinais gerados por um microcontrolador. Devido a disposição dos seus componentes, torna-se fácil selecionar o sentido de rotação de um motor, apenas invertendo a polaridade sobre seus terminais.

As Pontes H possuem este nome devido ao formato que é montado o circuito, semelhante a letra H. O circuito utiliza quatro chaves (S1, S2, S3 e S4) que são acionadas de forma alternada, ou seja, (S1-S3) ou (S2-S4). Dependendo da configuração entre as chaves a corrente percorre o motor em um sentido, hora por outro.

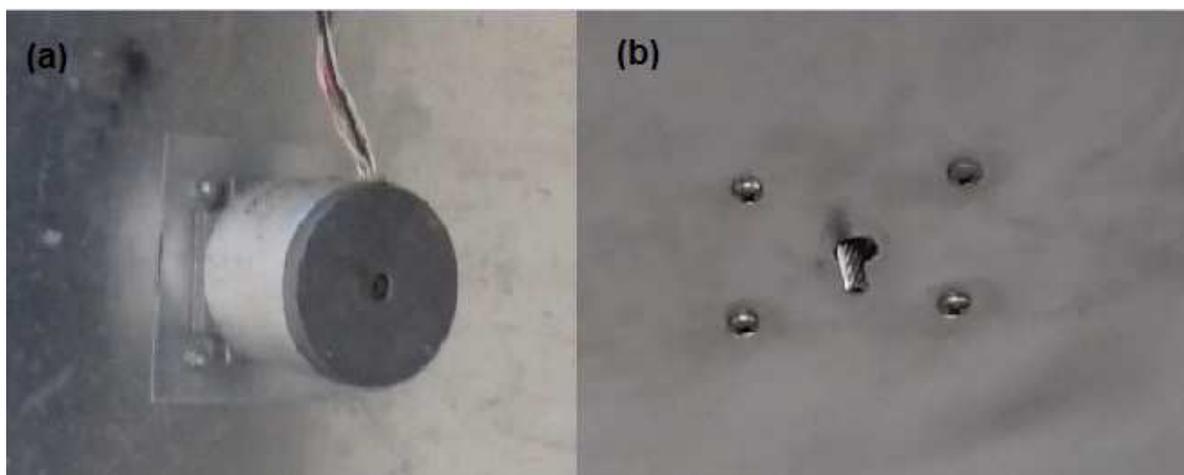
Quando nenhum par de chaves é acionado, o motor está desligado (Figura 6.8a). Ao acionar S1 e S3 a corrente percorre S1 e S3 fazendo com que o motor gire em um sentido (Figura 6.8b). Quando o par S2 e S4 é acionado, a polaridade de alimentação do motor é invertida fazendo com que gire em sentido contrário (Figura 6.8c).

**Figura 6.5** – Suporte para fixação do motor de passo na câmara de reverberação.



Fonte: O Autor

**Figura 6.6** – Motor de passo fixado na câmara de reverberação: (a) Vista externa; (b) Vista interna.



Fonte: O Autor

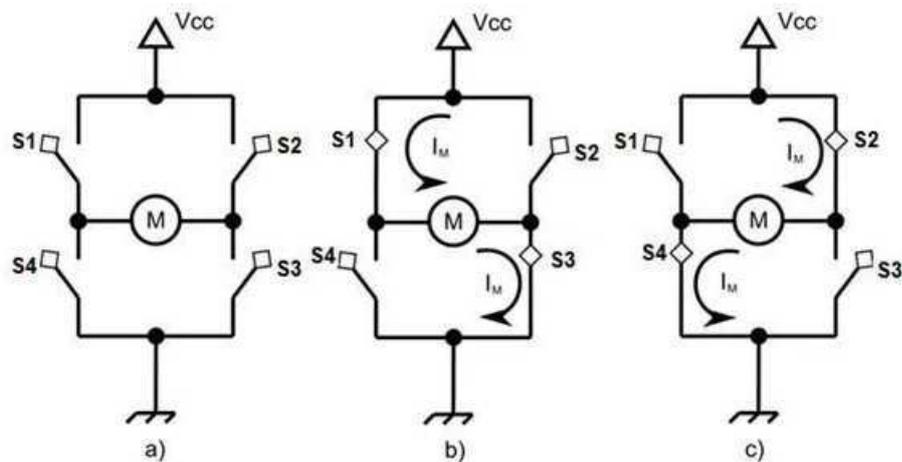
## 6.4 Módulos de Ponte H

Os módulos disponíveis no mercado possuem pequenas dimensões e já possuem o circuito básico para o uso do CI, o que facilita na acomodação e utilização no projeto.

Existem várias opções disponíveis no mercado, com dimensões e especificações

**Figura 6.7** – Prolongamento do eixo do motor de passo.

Fonte: O Autor

**Figura 6.8** – Circuito da Ponte H: (a) Motor parado; (b) Motor gira no sentido horário e (c) Motor gira no sentido anti-horário.

Fonte: O Autor

diferentes. Para escolher o módulo adequado à aplicação é necessário observar algumas especificações importantes do módulo. São elas:

- Potência máxima fornecida;
- Tensão de operação;

- Corrente máxima suportada;
- Tensão lógica;
- Corrente lógica;
- Dimensões;
- Peso.

Para o módulo com circuito integrado L298N (Apêndice B) (Figura 6.9), as especificações citadas são:

- Potência máxima de 25 W;
- Tensão de operação 6 - 35 V;
- Corrente máxima suportada 2 A;
- Tensão lógica 5 V;
- Corrente lógica 0 - 36 mA;
- Dimensões 43x43x27 mm;
- Peso 30 g.

**Figura 6.9** – Módulo Ponte H com o circuito integrado L298N.

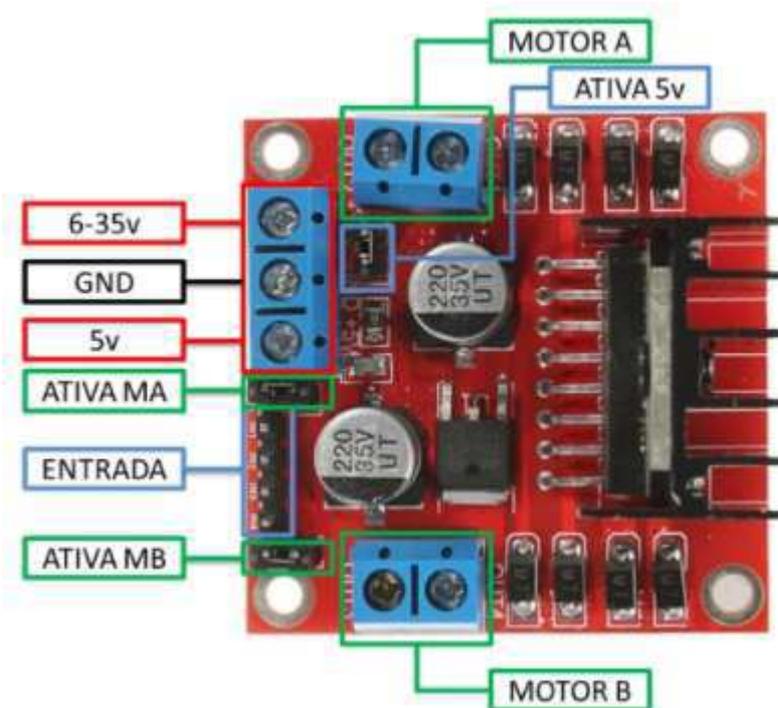


Fonte: O Autor

Para utilizar o módulo com o CI L298N é necessário entender a função de cada pino e como estes devem ser utilizados.

Na Figura 6.10 é mostrado o conjunto de entradas e saídas do módulo. Os conectores “Motor A” e “Motor B” são conectores de entrada para dois servo motores ou um motor de passo. A alimentação do módulo é realizada em dois pinos (6 - 35 V) e (GND). Para fazer com que o módulo forneça uma tensão externa de 5 V (por exemplo, para alimentar o Arduino) é necessário manter jampeado os pinos “Ativa 5 V”, lembrando que ao operar o módulo na tensão entre 6 volts e 35 volts, não se deve alimentar o pino 5 V, pois pode danificar os componentes. Em casos de não haver fonte de alimentação com mais de 6 V, pode-se alimentar o módulo com 5 V pelo pino “5 V”. Quando os pinos “Ativa MA” e “Ativa MB” são jampeados, o motor é acionado com velocidade máxima. Para controlar a velocidade do motor, basta remover os respectivos *jumpers* e alimentar os pinos com uma tensão entre 0 - 5 V. Os pinos “IN1” e “IN2” são utilizados para controlar o sentido do motor A, e “IN3” e “IN4” são utilizados para controlar o sentido do motor B. Para o motor de passo “IN1”, “IN2”, “IN3” e “IN4” controlam simultaneamente seu sentido.

Figura 6.10 – Entradas e saídas do módulo utilizado.

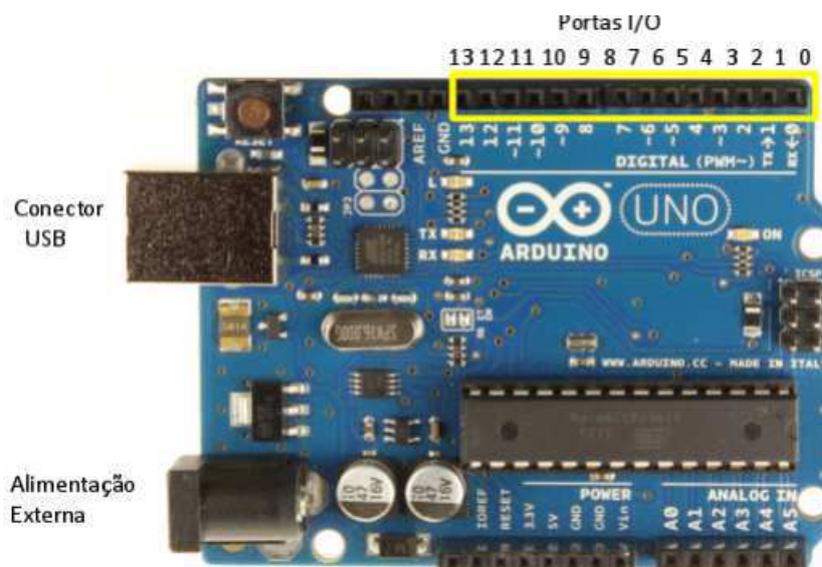


Fonte: O Autor

## 6.5 Controle do Motor de Passo pela Placa Arduino

O controle digital do motor de passo é constituído por uma placa Arduino UNO (Figura 6.11), permitindo comandar os transistores da Ponte H. É conveniente que o circuito digital seja programável, diminuindo sua complexidade e tornando o controle do motor muito mais flexível.

Figura 6.11 – Placa Arduino UNO.



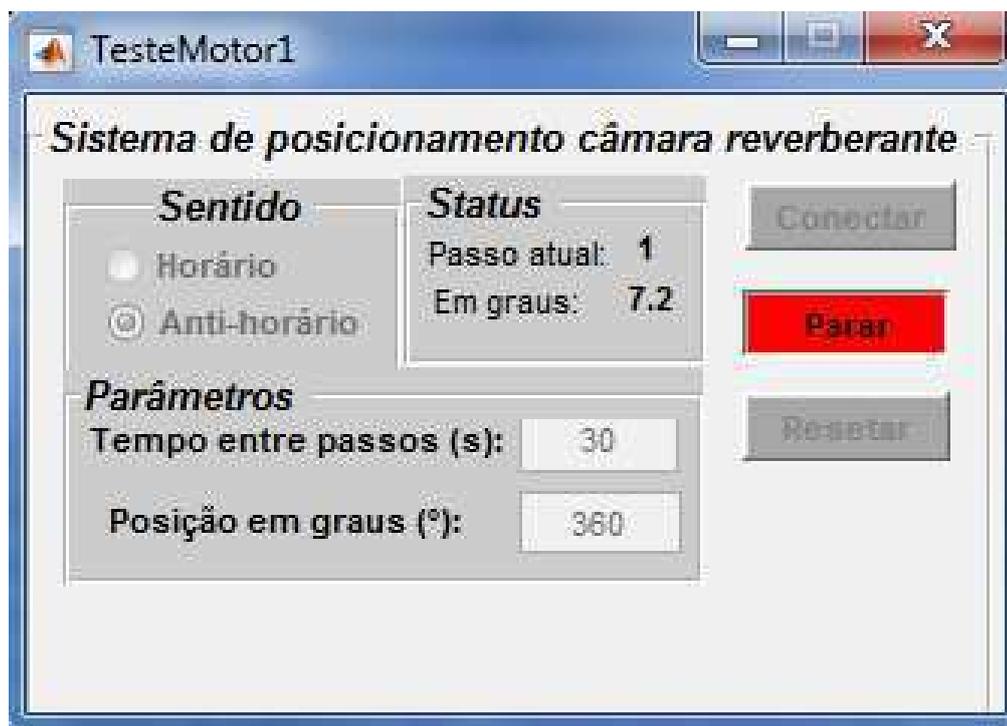
Fonte: O Autor

A placa Arduino contém treze portas de entrada/saída que podem ser definidas como entradas ou saídas, conforme a necessidade. No caso específico deste trabalho será necessário definir quatro portas como saídas para comandar as entradas do módulo L298N (Figura 6.10).

## 6.6 Interface de controle do motor de passo

A interface de controle do motor de passo é apresentada na Figura 6.12. Inicialmente, o programa faz uma conexão com a placa Arduino, quando a conexão é bem sucedida o usuário pode configurar o sentido de rotação, o tempo entre cada passo e o deslocamento angular total do agitador.

Figura 6.12 – Interface de controle do motor de passo.



Fonte: O Autor

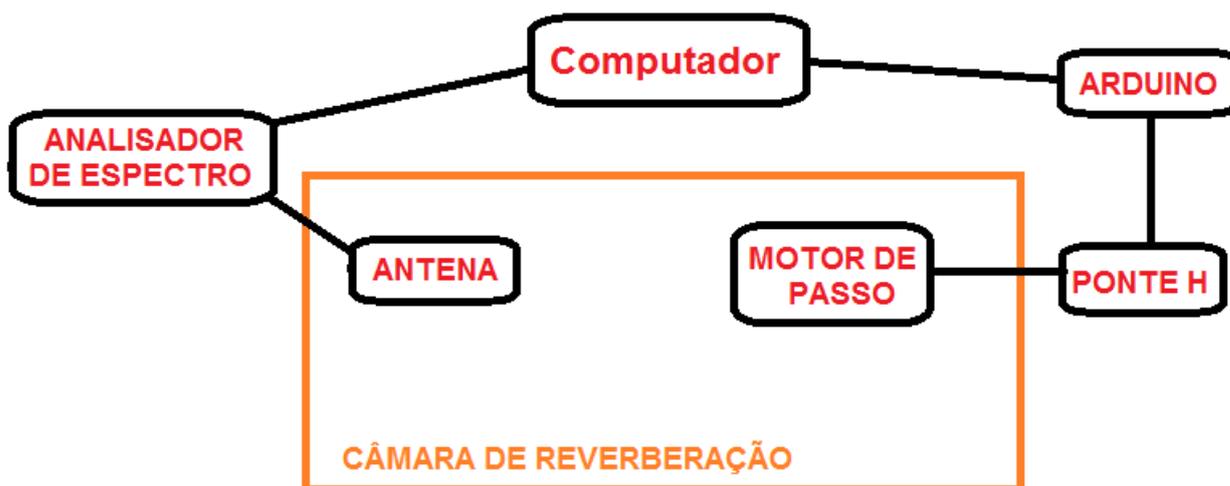
# Capítulo 7

## Metodologia

Neste capítulo é apresentada uma descrição dos procedimentos utilizados para obtenção dos dados para o cálculo dos principais índices de desempenho descritos neste trabalho.

Na Figura 7.1 é mostrado o sistema de aquisição de dados completo. O computador fornece ao usuário o controle sobre o chaveamento entre as polarizações  $x$ ,  $y$  e  $z$  da antena, bem como das configurações do analisador de espectro e movimentação do motor de passo. Todos os dados obtidos são armazenados no computador para análise posterior.

Figura 7.1 – Sistema de aquisição de dados.

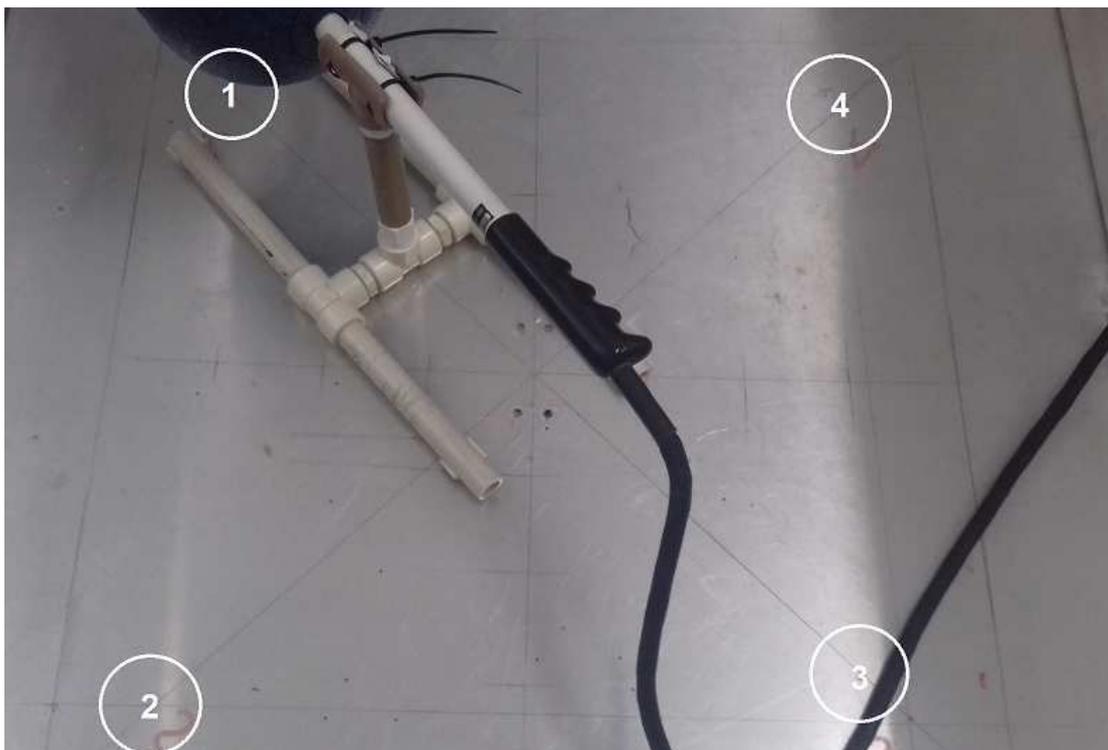


Fonte: O Autor

Antes de iniciar as medições é necessário localizar os oito vértices da ZCU. Na Figura 7.2 é mostrado marcações feitas no “piso” da câmara de reverberação indicando a posição de quatro pontos da ZCU. As hastes do suporte da antena determinam a

altura de cada ponto. Depois de determinar os vértices do volume de trabalho, é necessário realizar marcações que possam ajudar o usuário da câmara de reverberação a orientar a antena receptora, como mostrado na Figura 7.3. Após a calibração dos equipamentos, configuração dos pacotes e parâmetros do motor de passo, o sistema está pronto para aquisição de dados.

**Figura 7.2** – Marcações de referência para posicionamento da antena RX.



Fonte: O Autor

## 7.1 Medição do Coeficiente de Anisotropia Total

O coeficiente de anisotropia total é composto pelos coeficientes de anisotropia nos planos  $x - y$ ,  $x - z$  e  $y - z$ . Para simplificar, é descrito como obter o coeficiente de anisotropia em um dos planos, pois a obtenção desse coeficiente nos outros planos é feita de forma análoga.

Primeiro identifica-se as polarizações nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  da antena receptora, como mostrado na Figura 7.4, em seguida posiciona-se a antena em um dos vértices do volume de trabalho, de modo que as direções de polarização da antena ( $x$ ,  $y$ ) estejam alinhados com os eixos  $x$ ,  $y$  da câmara de reverberação. Posteriormente, a câmara

**Figura 7.3** – Marcações de referência dos eixos  $x$ ,  $y$  e  $z$  para orientação da antena RX.



Fonte: O Autor

é fechada e o software da antena e do sistema de movimentação são configurados para que amostras do campo elétrico nas direções  $x$  e  $y$  sejam armazenadas para cada posição do agitador e em toda a faixa de frequência considerada (700 MHz a 3 GHz). Finalmente, com os dados obtidos pode-se efetuar as devidas correções nos valores obtidos e calcular o coeficiente de anisotropia para o plano  $x - y$ .

Todos os procedimentos descritos anteriormente são repetidos para os planos  $x - z$  e  $y - z$ , considerando um dos vértices da ZCU. Porém é necessário, repetir todos os passos descritos para os oito vértices do ZCU e realizar o cálculo do coeficiente total de anisotropia descrito pela Equação (4.4).

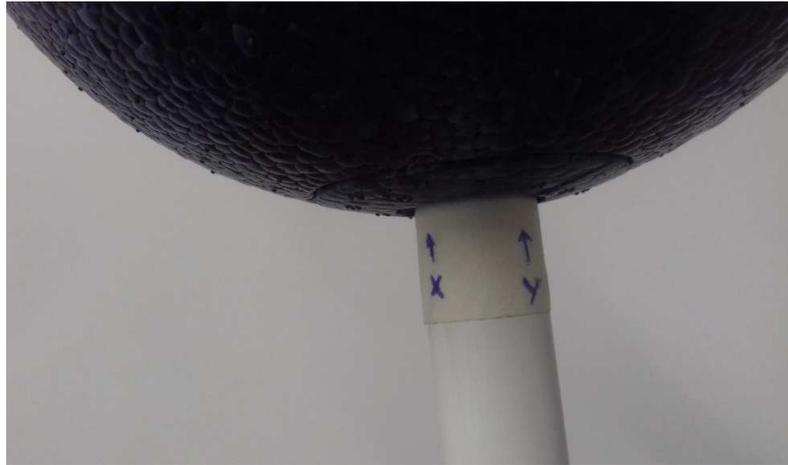


Figura 7.4 – Marcações de referência das polarizações  $x$ ,  $y$  e  $z$  na antena RX.

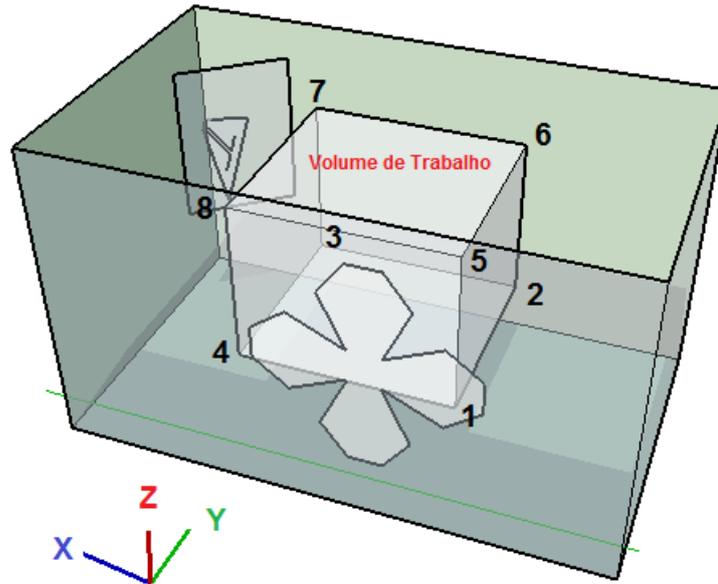
## 7.2 Medição do Coeficiente Total de Não-Homogeneidade

O coeficiente total de não-homogeneidade é composto pelos coeficientes de não-homogeneidade em  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Por simplificação é descrito o procedimento necessário para medição do coeficiente de não-homogeneidade em  $x$ , pois os demais são obtidos de forma análoga.

Antes de iniciar as medições é preciso escolher dois pontos mais afastados entre si no volume de trabalho, para isso os pontos escolhidos pertencem à diagonal do volume de trabalho (os pares de pontos 1-7, 2-8, 3-5 e 4-6) como mostrado na Figura 7.5. Ao posicionar a antena receptora em um dos pontos do volume de trabalho, a câmara é fechada e as medições são conduzidas via software. Ao finalizar esta etapa, a antena receptora é re-posicionada para um outro ponto do volume, e as medições são novamente realizadas. A sequência de procedimentos descritos é necessário para formar um par de posições  $r_j$  e  $r_k$ . Após concluir a medição do coeficiente de não-homogeneidade em  $x$ , é necessário aplicar a Equação (4.5). Finalmente, todo o procedimento é repetido para as direções de polarização  $y$  e  $z$ , permitindo aplicar a Equação (4.6) para obter o coeficiente total de não-homogeneidade.

## 7.3 Medição do Desvio Padrão Global

O desvio padrão total de cada componente individual do campo ( $x$ ,  $y$  e  $z$ ) calculado considerando todos os oito pontos do volume de trabalho, deve-se inicialmente posici-



**Figura 7.5** – Vértices da zona de campo uniforme no interior da câmara de reverberação.

onar a antena em um dos vértices do volume de trabalho, em seguida, deve-se fechar a câmara e monitorar o valor máximo do campo elétrico nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  para cada posição angular do agitador e para os demais vértices do volume de trabalho, na faixa de 700 MHz a 3 GHz. Por fim, para cada frequência calcula-se o campo elétrico normalizado aplicando a Equação (4.7), feito isso o desvio padrão das componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  é calculado utilizando a Equação (4.8). Uma vez calculado o desvio padrão de cada componente a Equação (4.9) é empregada para calcular o desvio padrão total do campo elétrico.

## 7.4 Medição do Fator de Qualidade

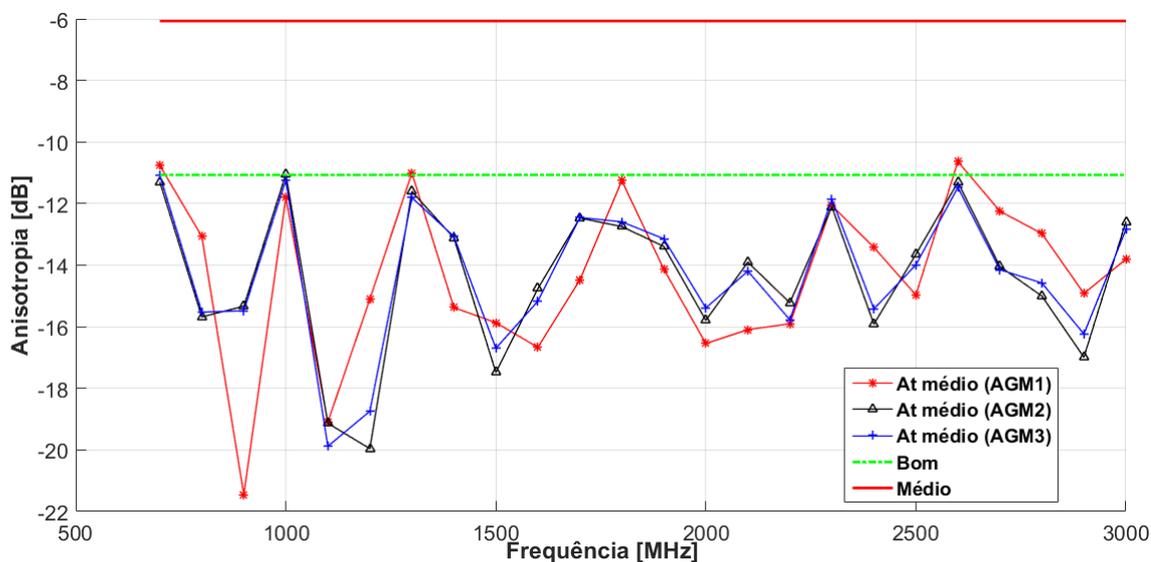
O fator de qualidade experimental é medido da mesma forma que o desvio padrão, enquanto o desvio padrão considera as componentes individuais do campo, o fator de qualidade considera o campo elétrico total (raiz quadrada da soma dos quadrados do campo elétrico de cada componente). Com isso as Equações (4.29) e (4.28) podem ser utilizadas para o cálculo do fator de qualidade experimental.

# Capítulo 8

## Resultados

O campo estatisticamente isotrópico<sup>2</sup> é uma característica idealizada de bom desempenho para câmaras de reverberação. O coeficiente de anisotropia médio foi calculado para oito vértices do volume de trabalho considerando três agitadores disponíveis, a Figura 8.1 mostra o coeficiente de anisotropia média no ponto 4 para os agitadores AGM1, AGM2 e AGM3.

**Figura 8.1** – Coeficiente de anisotropia para os agitadores AGM1, AGM2 e AGM3.



Fonte: O Autor

A tabela fornecida por Arnaut e West (1999) não contempla o número de passos do agitador empregado neste trabalho ( $N = 50$ ), diante disso, os valores de referência para  $N = 20$  e  $N = 100$  foram convertidos em escala linear e suas médias foram calculadas, em

<sup>2</sup>É uma condição relacionada a uniformidade de campo com relação a orientação ou direção em um ponto

seguida, os valores obtidos foram convertidos para dB, obtendo valores de referência para um agitador considerando de desempenho “bom” de -6,07 dB e “médio” de -11,07 dB.

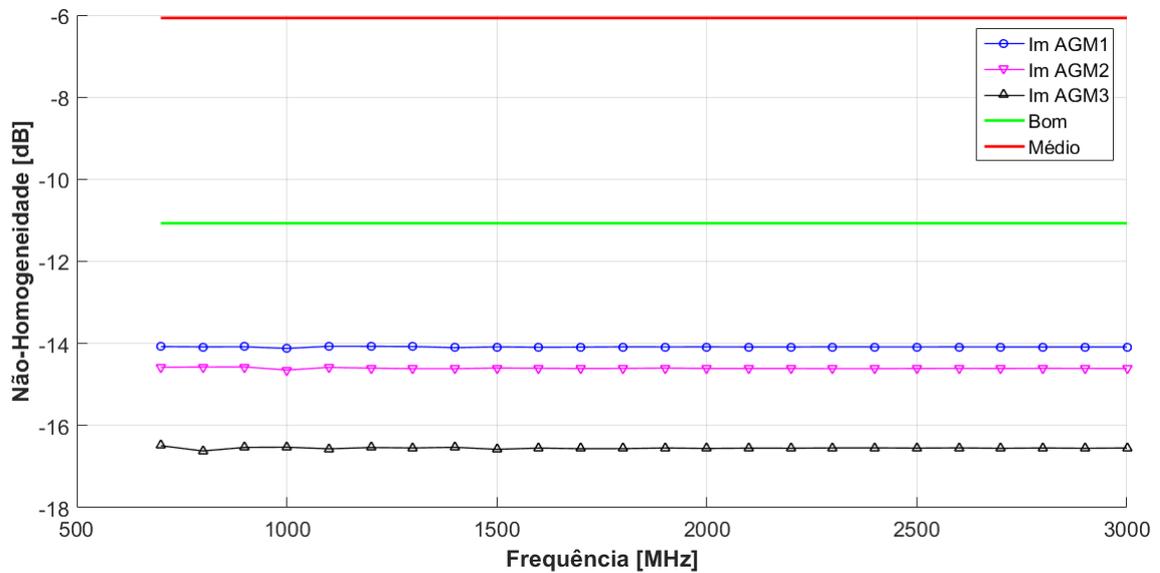
Pode-se notar que o desempenho dos agitadores AGM2 e AGM3 estão abaixo do valor de referência considerando “bom” (-11,07 dB), apesar do desempenho dos AGM2 e AGM3 estarem próximos, o AGM3 possui o melhor desempenho se comparado ao AGM2. Na maioria da faixa de frequência o AGM1 apresenta desempenho considerado “bom”, contudo, nas frequências: 700 MHz, 1300 MHz e 2600 MHz o desempenho deste agitador é considerado “médio” (-6,07 dB). Em algumas faixas de frequência (como 1450 MHz a 2300 MHz) o desempenho do AGM1 é superior aos agitadores AGM2 e AGM3, em outras faixas de frequência (como 2600 MHz a 3000 MHz) o desempenho do AGM1 é inferior aos agitadores AGM2 e AGM3. Dessa forma, analisando toda a faixa de frequência o agitador que apresenta melhor desempenho é o agitador AGM3.

O coeficiente de não-homogeneidade, de forma análoga ao coeficiente de anisotropia, fornece informações sobre a não uniformidade pontual do campo elétrico. Para realizar as medições é necessário que os pares de pontos estejam o mais distante possível entre si, nesse sentido quatro pares de pontos foram escolhidos (pares 1-7, 2-8, 3-5 e 4-6).

O coeficiente de não-homogeneidade média é mostrado na Figura 8.2 para os pares de pontos 1-7, considerando os agitadores AGM1, AGM2 e AGM3. É possível notar que o desempenho dos agitadores empregados estão abaixo do valor de referência considerando “bom” (-11,07 dB). As modificações empregadas no AGM2 contribuíram para elevar os níveis de homogeneidade partindo de -14 dB (AGM1) para quase -15 dB. A adição do ângulo de abertura no projeto do AGM3 melhorou consideravelmente os níveis de homogeneidade partindo de aproximadamente -15 dB (AGM2) para quase -17 dB. O coeficiente de não-homogeneidade média para os demais pares de pontos, manteve um comportamento similar ao apresentado em toda a faixa de frequência de 700 MHz a 3 GHz.

O desvio padrão é o parâmetro frequentemente empregado na avaliação da uniformidade do campo, permitindo (de forma indireta) avaliar o desempenho do agitador. Na Figura 8.3 é apresentado o desvio padrão das componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  do campo elétrico, considerando todas as posições do agitador AGM1 e os oito pontos do volume

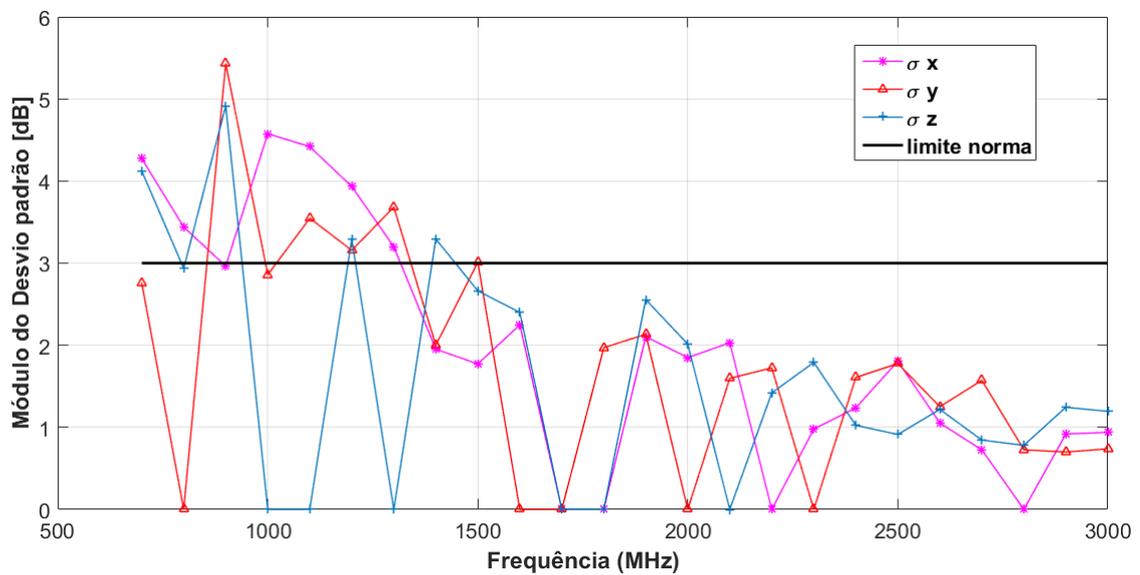
**Figura 8.2** – Coeficiente de não-homogeneidade média para os agitadores AGM1, AGM2 e AGM3.



Fonte: O Autor

de trabalho.

**Figura 8.3** – Desvio padrão das componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  do campo elétrico para o AGM1.

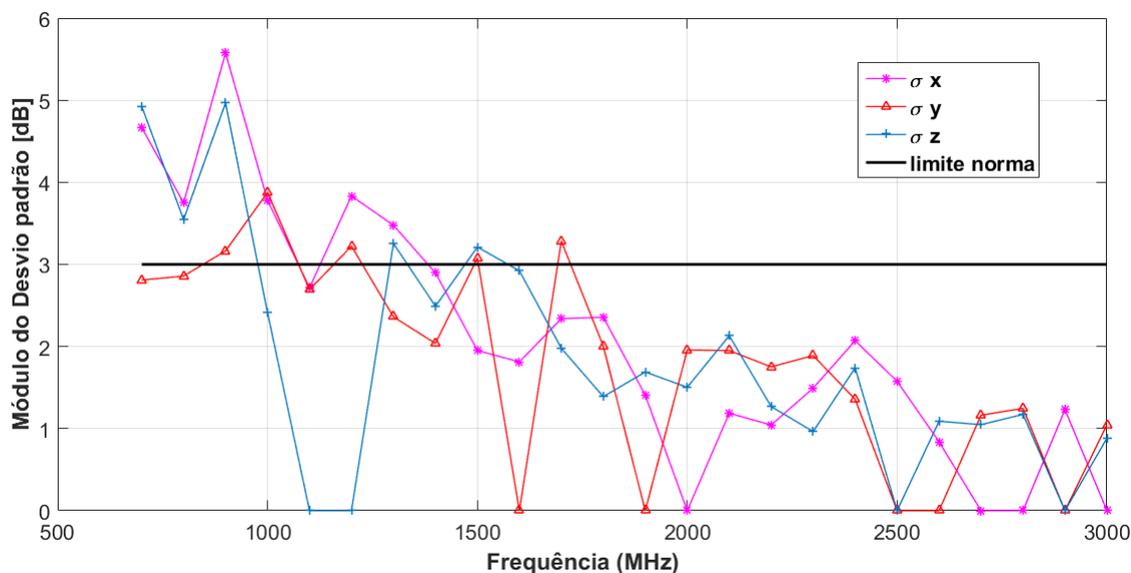


Fonte: O Autor

Na Figura 8.3 é apresentado o desvio padrão das componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  do campo elétrico. Pode-se observar que acima de 1450 MHz os valores de desvio padrão atendem o valor máximo (3 dB) estabelecido pela norma IEC 6100-4-21. Além disso, pode-se notar que ao longo da faixa compreendida entre 1450 MHz a 3000 MHz o desvio padrão

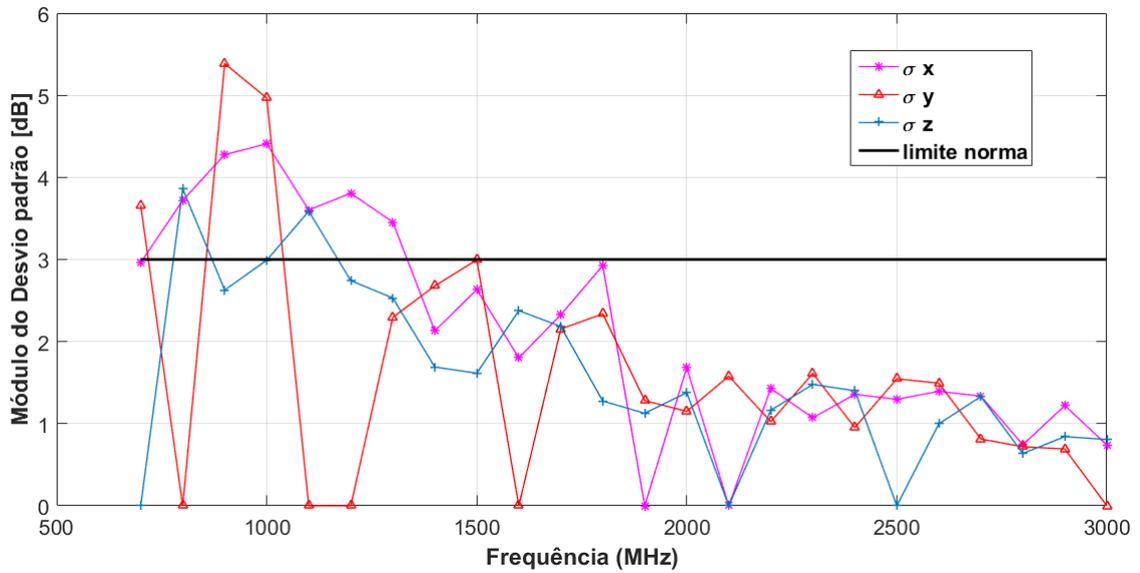
apresenta certa tendência de equalizar-se. Na Figura 8.4 pode-se examinar como as modificações empregadas no AGM2 reforçam a equalização e a redução dos níveis do desvio padrão, os valores do desvio padrão passam a atender a norma a partir de 1350 MHz (apesar de existir alguns valores acima de 3 dB como em 1500 MHz e 1700 MHz). Além disso, a equalização e redução dos valores do desvio padrão das componentes do campo elétrico foram acentuadas em comparação ao AGM1. A Figura 8.5 apresenta os valores do desvio padrão das componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  do campo elétrico para o AGM3, nota-se que o resultados apresentados (em comparação ao AGM2) foram consideravelmente melhorados. Os valores do desvio padrão passam a atender o valor máximo estabelecido em norma (3 dB) a partir de 1350 MHz, além disso, o a equalização foi acentuada e o desvio padrão foi reduzido em toda a faixa de 1350 MHz a 3000 MHz. Dessa forma, considerando o desvio padrão, o AGM3 obteve melhor desempenho, dentre os agitadores utilizados.

**Figura 8.4** – Desvio padrão das componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  do campo elétrico para o AGM2.



Fonte: O Autor

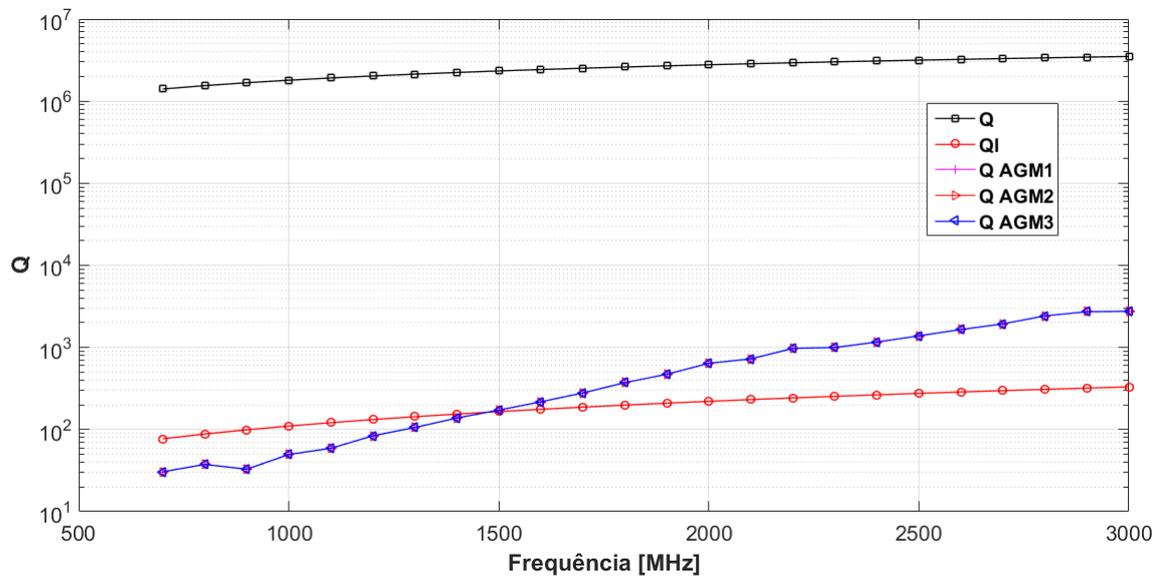
O fator de qualidade, da mesma forma que o desvio padrão, é um parâmetro de avaliação geral do desempenho de uma câmara de reverberação. Na Figura 8.6 é apresentado o fator de qualidade para os três agitadores disponíveis no LEMA. É possível observar que o desempenho dos agitadores utilizados similares. Além disso, nota-se que a partir de 1500 MHz o fator de qualidade para os três agitadores é superior ao limite teórico inferior.

**Figura 8.5** – Desvio padrão das componentes  $x$ ,  $y$  e  $z$  do campo elétrico para o AGM3.

Fonte: O Autor

O comportamento do fator de qualidade ao longo da faixa considerada (700 MHz a 3000 MHz), é inverso ao comportamento do desvio padrão, a partir de 1500 MHz o desvio padrão (considerando os agitadores AGM1, AGM2 e AGM3) tende a diminuir ao longo da frequência e o fator de qualidade tende a aumentar. O comportamento inverso é apresentado abaixo de 1500 MHz, em que os valores do desvio padrão tendem a elevar-se e os valores do fator de qualidade tendem a diminuir.

**Figura 8.6** – Fator de qualidade para os agitadores AGM1, AGM2 e AGM3 na faixa de 700 MHz a 3 GHz.



Fonte: O Autor

# Capítulo 9

## Conclusões

O número cada vez maior de aplicações de câmaras de reverberação exige uma maior variedade de indicadores de desempenho para melhor avaliar o seu desempenho em um sentido amplo e explicar múltiplos aspectos de seu comportamento. Os indicadores de desempenho descritos neste trabalho são os mais comuns empregados na literatura, mas não cobrem a lista completa de métricas e técnicas utilizadas em câmaras de reverberação. Ao combinar vários desses indicadores, a dinâmica da câmara de reverberação pode ser melhor descrita. Não há como definir um único parâmetro que avalie todos os diferentes aspectos da câmara de reverberação.

A convergência dos resultados das métricas de desempenho permitem avaliar com segurança em qual faixa de frequências o desempenho dos agitadores e consequentemente da câmara de reverberação é satisfatório. As métricas de desempenho empregadas permitiram avaliar de forma consistente o desempenho dos agitadores. Dentre os agitadores avaliados, o agitador AGM3 apresentou o melhor desempenho, indicando que as características do AGM2 juntamente com o acréscimo do ângulo de abertura contribuíram para o aumento do desempenho deste agitador entre 1350 MHz a 3000 MHz. A equalização e redução dos valores do desvio padrão foram alcançadas com o emprego do AGM3, esta característica é desejável, pois a perturbação causada pela introdução de um equipamento no interior da ZCU pode não ser suficiente para fazer com que os valores do desvio padrão ultrapassem o valor limite estabelecido pela norma IEC 61000-4-21. De forma geral, os três agitadores possuem desempenhos satisfatórios entre 1500 MHz e 3000 MHz.

Este trabalho pode ser considerado como um ponto de partida para realização de

---

outros estudos com a câmara de reverberação disponível no LEMA.

# Apêndice A

## Programa RFEX

A interface do programa RFEX (*Radio Frequency Exposure*) fornecido pela Rohde & Schwarz<sup>®</sup> é mostrado na Figura A.1, permitindo configurar adequadamente a antena antes de realizar as medições.

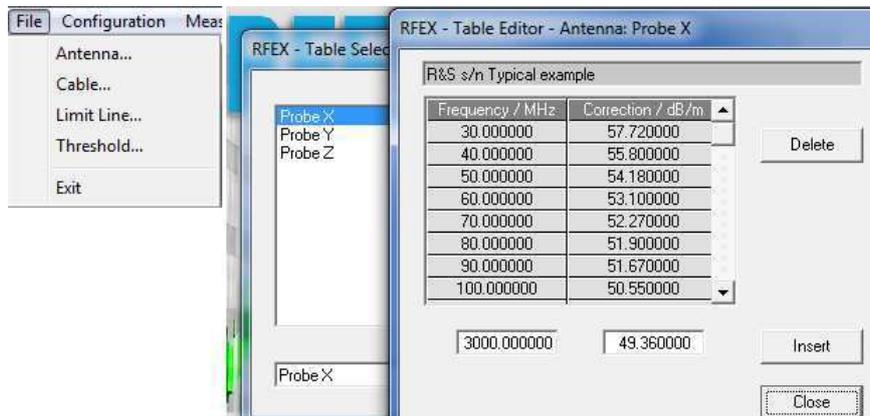
Figura A.1 – Interface do programa RFEX.



Fonte: O Autor

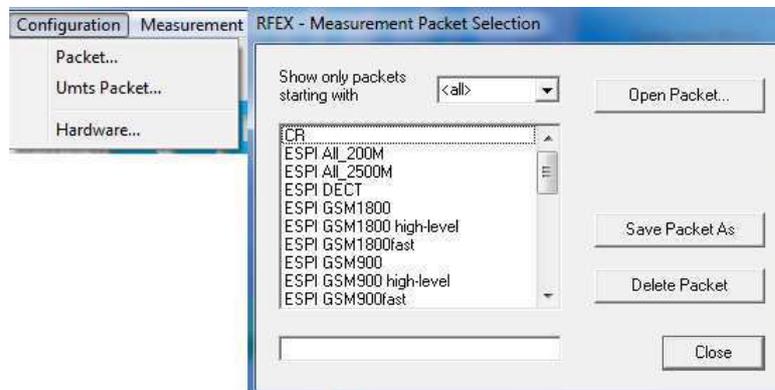
Na aba *File* é possível encontrar tabelas contendo os fatores de correção para a antena e para os cabos, além disso, o programa permite editar, adicionar ou remover valores da tabela.

Na aba *Configuration* o usuário pode escolher um dos pacotes pré-configurados

**Figura A.2** – Tabelas contendo os fatores de correção da antena TS-EMF.

Fonte: O Autor

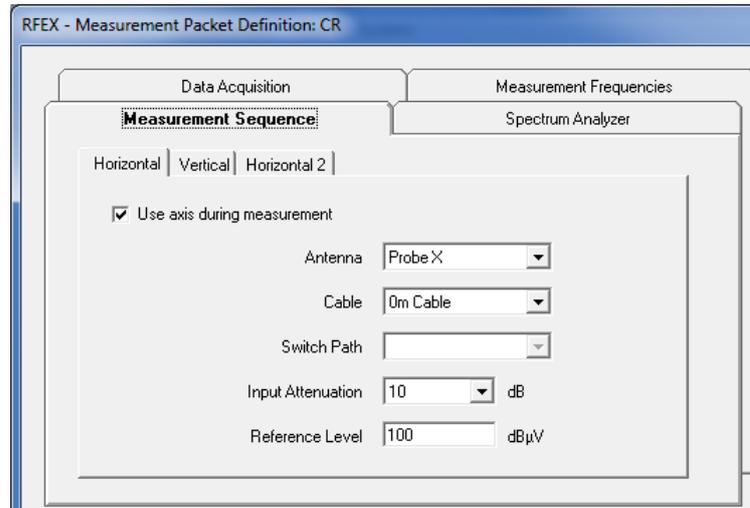
fornecidos pelo programa, ou criar seu próprio pacote (Figura A.3). Ao criar um novo pacote o programa disponibiliza uma série de opções (Figura A.4), nas quais pode-se determinar a sequência das medições, a resolução e a faixa de frequência utilizada, dentre outras opções.

**Figura A.3** – Configuração de pacotes.

Fonte: O Autor

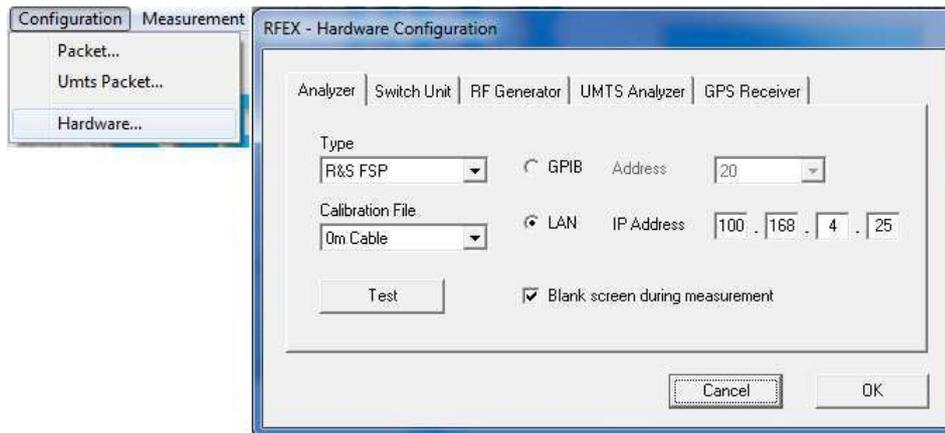
É possível realizar testes para verificar se todos os equipamentos estão conectados e funcionando corretamente. Ainda na aba Configuration, a opção *Hardware* permite verificar se o analisador de espectro está conectado corretamente (Figura A.5) e se as pontas de prova em *x*, *y* e *z* estão chaveando corretamente (Figura A.6).

**Figura A.4** – Algumas opções disponíveis na configuração dos pacotes.



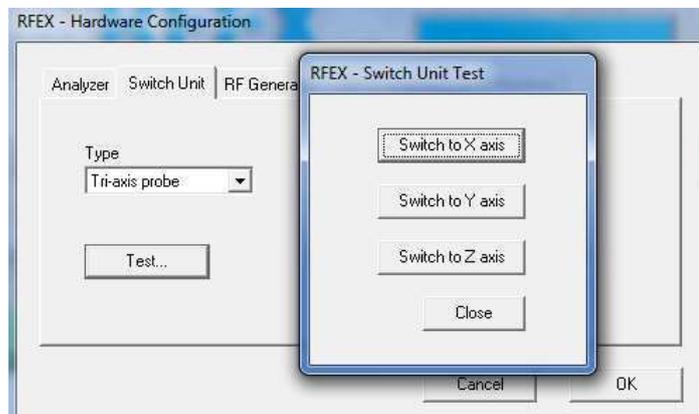
Fonte: O Autor

**Figura A.5** – Opção que permite verificar a conexão do analisador de espectro .



Fonte: O Autor

**Figura A.6** – Teste do chaveamento das pontas de prova da antena TS-EMF.



Fonte: O Autor

Depois de verificar a conexão de todos os equipamentos e configurar corretamente os pacotes, o programa está pronto para iniciar a aquisição de dados. Para aquisição de dados o programa fornece três opções: *Single Measure*, *Long-term Measure* e *Peak/Average Measure*. A opção *Single Measure* é ideal para verificar se o pacote de medição está corretamente configurado, permitindo ao usuário verificar se a sequência de procedimentos está sendo executada corretamente. A opção *Long-term Measure* permite programar o tempo de início e término das medições, não havendo restrições para a duração total. Durante cada medição, o programa executa ciclicamente uma sequência de comandos configurada pelo usuário. A opção *Peak/Average Measure* funciona de forma similar a opção *Single Measure*, fornecendo o pico e a média dos pacotes uma única vez.

O programa RFEX calcula e fornece ao usuário o valor do campo elétrico total (contribuição nas três direções:  $x$ ,  $y$  e  $z$ ). Durante a medição, o programa armazena dados brutos que possuem a extensão *.raw*, como mostrado na Figura A.7. Ao abrir um dos arquivos *.raw* (Figura A.8) cinco colunas são apresentadas, a primeira coluna é atribuído a frequência, a segunda, terceira e quarta colunas são atribuídos ao campo elétrico medido nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , respectivamente, a quinta coluna indica o nome do pacote (previamente nomeado pelo usuário nas configurações do pacote). É importante ressaltar que os dados brutos não estão corrigidos, sendo necessário ao usuário (que deseje trabalhar com estes dados) incluir os fatores de correção em cada componente do campo elétrico e efetuar as conversões necessárias (Ex.:  $\text{dB}\mu\text{ V}$  para  $\text{V/m}$ ).

**Figura A.7 – Dados fornecidos pela antena TS-EMF.**

Nome	Data de modificaç...	Tipo
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw	16/11/2017 16:21	Arquivo RAW
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.0	16/11/2017 15:56	Arquivo 0
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.1	16/11/2017 15:57	Arquivo 1
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.2	16/11/2017 15:57	Arquivo 2
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.3	16/11/2017 15:58	Arquivo 3
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.4	16/11/2017 15:58	Arquivo 4
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.5	16/11/2017 15:59	Arquivo 5
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.6	16/11/2017 15:59	Arquivo 6
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.7	16/11/2017 16:00	Arquivo 7
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.8	16/11/2017 16:00	Arquivo 8
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.9	16/11/2017 16:01	Arquivo 9
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.10	16/11/2017 16:01	Arquivo 10
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.11	16/11/2017 16:02	Arquivo 11
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.12	16/11/2017 16:02	Arquivo 12
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.13	16/11/2017 16:03	Arquivo 13
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.14	16/11/2017 16:03	Arquivo 14
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.15	16/11/2017 16:04	Arquivo 15
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.16	16/11/2017 16:04	Arquivo 16
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.17	16/11/2017 16:05	Arquivo 17
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.18	16/11/2017 16:05	Arquivo 18
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.19	16/11/2017 16:06	Arquivo 19
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.20	16/11/2017 16:06	Arquivo 20
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.21	16/11/2017 16:07	Arquivo 21
PONTO_2_X_Y_Z_AGM1.Raw.22	16/11/2017 16:07	Arquivo 22

Fonte: O Autor

**Figura A.8 – Conteúdo de um arquivo .raw**

700.00000000E+000	22.364265442E+000	22.332565308E+000	21.629852295E+000	CR
800.00000000E+000	22.252616882E+000	21.732238770E+000	22.163032532E+000	CR
900.00000000E+000	22.873580933E+000	22.000480652E+000	20.701423645E+000	CR
1.000000000E+003	21.530578613E+000	23.090126038E+000	22.607429504E+000	CR
1.100000000E+003	21.614746094E+000	21.076850891E+000	22.080055237E+000	CR
1.200000000E+003	22.758728027E+000	22.029190063E+000	21.659347534E+000	CR
1.300000000E+003	21.388687134E+000	22.328712463E+000	22.212959290E+000	CR
1.400000000E+003	22.741035461E+000	22.967208862E+000	22.313171387E+000	CR
1.500000000E+003	21.470191956E+000	21.665016174E+000	21.879905701E+000	CR
1.600000000E+003	21.295753479E+000	21.528900146E+000	21.730087280E+000	CR
1.700000000E+003	23.836906433E+000	24.431701660E+000	23.425140381E+000	CR
1.800000000E+003	21.847503662E+000	22.188491821E+000	22.649551392E+000	CR
1.900000000E+003	22.381958008E+000	23.912078857E+000	23.835388184E+000	CR
2.000000000E+003	23.851188660E+000	23.482536316E+000	23.810531616E+000	CR
2.100000000E+003	24.252975464E+000	24.600143433E+000	25.075950623E+000	CR
2.200000000E+003	23.593940735E+000	24.978164673E+000	24.427055359E+000	CR
2.300000000E+003	24.345344543E+000	23.652252197E+000	22.440628052E+000	CR
2.400000000E+003	23.898086548E+000	25.610145569E+000	25.428245544E+000	CR
2.500000000E+003	22.482398987E+000	23.058158875E+000	24.610549927E+000	CR
2.600000000E+003	23.627616882E+000	23.558219910E+000	22.980499268E+000	CR
2.700000000E+003	25.318824768E+000	22.873298645E+000	23.158439636E+000	CR
2.800000000E+003	22.688270569E+000	24.265151978E+000	24.271484375E+000	CR
2.900000000E+003	25.039733887E+000	25.548149109E+000	25.116821289E+000	CR
3.000000000E+003	25.260658264E+000	26.245559692E+000	25.837326050E+000	CR

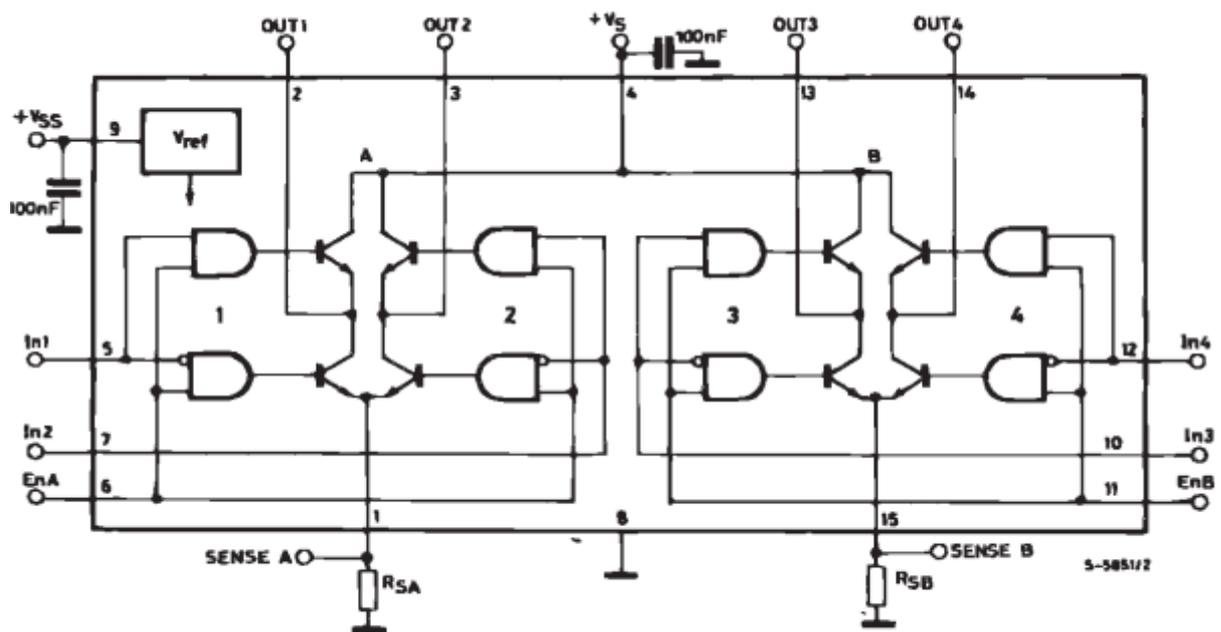
Fonte: O Autor

# Apêndice B

## Circuito Integrado L298N

O circuito integrado L298N é muito utilizado para propósito de controle de motores. Uma das vantagens do uso deste circuito integrado (CI) é o menor espaço ocupado, baixa complexidade do circuito, alta capacidade de corrente e o fato de possuir dois circuitos Ponte H, podendo controlar dois servo motores ou um motor de passo. Na Figura B.1 pode-se observar o esquema interno do CI L298N retirado de seu *data sheet* (MICROELECTRONICS, 2000).

Figura B.1 – Esquema interno do circuito integrado L298N.



Fonte: (MICROELECTRONICS, 2000)

As principais funções deste CI são descritas na Tabela B.1.

**Tabela B.1** – Funções dos principais pinos do circuito integrado L298N ((MICROELECTRONICS, 2000)).

<b>Nome</b>	<b>Função</b>
<b>Sense A; Sense B</b>	Entre esse pino e o Terra é conectado um resistor sensitivo para controlar a corrente da carga
<b>Out 1; Out 2</b>	Saídas da Ponte A. A corrente que flui através da carga conectada entre esses dois pinos é monitorada pelo pino 1
<b>Input 1; Input 2</b>	Entradas da Ponte A (compatíveis com o nível TTL)
<b>Enable A; Enable B</b>	Entradas (compatíveis com o nível TTL); nível baixo desabilita a Ponte A (enable A) e/ou Ponte B (enable B)
<b>Input 3; Input 4</b>	Entradas das Ponte B (compatíveis com o nível TTL)
<b>Out 3; Out 4</b>	Saídas da Ponte B. A corrente que flui através da carga conectada entre esses dois pinos é monitorada pelo pino 15

# Referências Bibliográficas

ARNAUT, L. Field anisotropy field inhomogeneity and polarization bias in imperfect reverberation chambers. *NPL Tech. Note*, v. 981120, 1998.

ARNAUT, L.; WEST, P. *Evaluation of the NPL untuned stadium reverberation chamber using mechanical and electronic stirring techniques national physical laboratory report CEM 11 ht tp*. [S.l.]: Tech. Rep, 1998.

ARNAUT, L.; WEST, P. *Electric Field Probe Measurements in the NPL Untuned Stadium Reverberation Chamber*. [S.l.]: Nat. Phys. Lab., 1999.

ARNAUT, L. R. Effect of local stir and spatial averaging on measurement and testing in mode-tuned and mode-stirred reverberation chambers. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, IEEE, v. 43, n. 3, p. 305–325, 2001.

ARNAUT, L. R. Effect of size, orientation, and eccentricity of mode stirrers on their performance in reverberation chambers. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, IEEE, v. 48, n. 3, p. 600–602, 2006.

ARNAUT, L. R.; SERRA, R.; WEST, P. D. Statistical anisotropy in imperfect electromagnetic reverberation. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, v. 59, n. 1, p. 3–13, 2017.

ARNAUT, L. R.; WEST, P. Effect of antenna aperture, eut and stirrer step size on measurements in mode-stirred reverberation chambers. In: *Electromagnetic Compatibility, 2000. IEEE International Symposium on*. [S.l.]: IEEE, 2000. v. 1, p. 29–31.

BAI, L. *et al.* Effects of paddle configurations on the uniformity of the reverberation chamber. In: *Electromagnetic Compatibility, 1999 IEEE International Symposium on*. [S.l.]: IEEE, 1999. v. 1, p. 12–16.

BRUNS, C. *Three-dimensional Simulation and Experimental Verification of a Reverberation Chamber*. [S.l.]: Swiss Federal Inst. Technol., 2005.

CANTALICE, S. F. *et al.* Influence of an asymmetrically positioned load in a reverberation chamber. In: *Instrumentation and Measurement Technology Conference, 2009. I2MTC'09. IEEE*. [S.l.]: IEEE, 2009. p. 1616–1619.

CHAN, T. V. C. T.; READER, H. C. *Understanding Microwave Heating Cavities*. [S.l.]: Artech House Publishers, 2000.

COLLIN, R. E. *Foundations for Microwave Engineering*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.

- COMPATIBILITY, E. Part 4-21: Testing and measurement techniques—reverberation chamber test methods. *IEC Standard*, p. 61000–4, 2011.
- CORONA, P.; FERRARA, G.; MIGLIACCIO, M. Reverberating chambers as sources of stochastic electromagnetic fields. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, v. 38, n. 3, p. 348–356, 1996.
- GENENDER, E. *et al.* Simulating the multipath channel with a reverberation chamber: Application to bit error rate measurements. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*, IEEE, v. 52, n. 4, p. 766–777, 2010.
- HARIMA, K.; YAMANAKA, Y. FDTD analysis on the effect of stirrers in a reverberation chamber. *IEEE*, p. 260–263, 1999.
- HATFIELD, M. O. *et al.* *Electromagnetic reverberation characteristics of a large transport aircraft*. [S.l.], 1994.
- HILL, D. A. Electromagnetic theory of reverberation chambers. *Technical Note (NIST TN)-1506*, v. 1506, 1998.
- HILL, D. A. Plane wave integral representation for fields in reverberation chambers. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, v. 40, n. 3, p. 209–217, 1998.
- HILL, D. A. *et al.* Measurements of shielding effectiveness and cavity characteristics of airplanes. *NASA STI/Recon Technical Report N*, v. 95, 1994.
- HILL, D. A. *et al.* Aperture excitation of electrically large, lossy cavities. *IEEE transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, v. 36, n. 3, p. 169–178, 1994.
- HOLLOWAY, C. L. *et al.* Requirements for an effective reverberation chamber: Unloaded or loaded. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, v. 48, n. 1, p. 187–194, 2006.
- HONG, J.-I.; HUH, C.-S. Optimization of stirrer with various parameters in reverberation chamber. *Progress In Electromagnetics Research*, EMW Publishing, v. 104, p. 15–30, 2010.
- HUANG, Y.; ZHANG, J. T.; LIU, P. A novel method to examine the effectiveness of a stirrer. In: *Electromagnetic Compatibility, 2005. EMC 2005. 2005 International Symposium on*. [S.l.]: IEEE, 2005. v. 2, p. 556–561.
- HUI, T. *et al.* Numerical simulation of field uniformity of reverberation chamber. In: *Antennas, Propagation and EM Theory (ISAPE), 2016 11th International Symposium on*. [S.l.]: IEEE, 2016. p. 481–484.
- KOSTAS, J. G.; BOVERIE, B. Statistical model for a mode-stirred chamber. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*, IEEE, v. 33, n. 4, p. 366–370, 1991.
- LEFERINK, F.; BOUDENOT, J.-C.; ETTEN, W. van. Experimental results obtained in the vibrating intrinsic reverberation chamber. In: *Electromagnetic Compatibility, 2000. IEEE International Symposium on*. [S.l.]: IEEE, 2000. v. 2, p. 639–644.
- MICROELECTRONICS, S. *L298–Dual Full-Bridge Driver–Datasheet*. [S.l.]: Available, 2000.

- MIGLIACCIO, M. *et al.* The polarization purity of the electromagnetic field in a reverberating chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, v. 58, n. 3, p. 694–700, 2016.
- MUSSO, L. *Assessment of reverberation chamber testing for automotive applications*. Tese (Doutorado) — Lille 1, 2003.
- PAUL, C. Introduction to electromagnetic compatibility (EMC). Wiley Online Library, p. 1–48, 1992.
- PETIT, F. *Modélisation et simulation d'une chambre réverbérante à brassage de modes à l'aide de la méthode des différences finies dans le domaine temporel*. Tese (Doutorado) — Université de Marne La Vallée, 2002.
- SALGADO, R. G. *Numerical Simulations of Reverberation Chamber*. Dissertação (Mestrado) — Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2016.
- SERRA, R. Reverberation chambers through the magnifying glass: an overview and classification of performance indicators. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, IEEE, v. 6, n. 2, p. 76–88, 2016.
- SERRA, R. *et al.* Reverberation chambers à la carte: An overview of the different mode-stirring techniques. *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, IEEE, v. 6, n. 1, p. 63–78, 2016.
- SILVA, E. *et al.* Compact electromagnetic reverberation chamber design and construction. In: *Proc. ANTEM2006 Int. Symp. on Antenna Technology and Applied Electromagnetics/Canadian Radio Science*. [S.l.: s.n.], 2006. v. 1, p. 97–99.
- SILVA, E. F. da. *Uma proposta de maximização da região de campo uniforme para uma câmara de reverberação compacta*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, Brasil, 2008.
- STANDARD, G. M. N. A. Gm9120p: Immunity to radiated electromagnetic fields - (reverberation method) emc. *Component Test Procedures*, 1993.
- WANG, S. *et al.* A new method of evaluating reverberation chamber q-factor with experimental validation. *Progress In Electromagnetics Research Letters*, EMW Publishing, v. 36, p. 103–112, 2013.
- WEST, J. C. *et al.* Best practices in measuring the quality factor of a reverberation chamber. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, IEEE, 2017.
- ZHANG, D.; SONG, J. Impact of stirrers' position on the properties of a reverberation chamber with two stirrers. In: *Electromagnetic Compatibility, 2000. IEEE International Symposium on*. [S.l.]: IEEE, 2000. v. 1, p. 7–10.