

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Murilo Rezende Soares Cesar

**ANÁLISE E MODELAGEM NUMÉRICA DE CÂMARAS REVERBERANTES DE
MODOS MISTURADOS**

Florianópolis

2021

Murilo Rezende Soares Cesar

**ANÁLISE E MODELAGEM NUMÉRICA DE CÂMARAS REVERBERANTES DE
MODOS MISTURADOS**

Trabalho de Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Adroaldo Raizer, Dr.

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Cesar, Murilo Rezende Soares
Análise e Modelagem Numérica de Câmaras Reverberantes De
Modos Misturados / Murilo Rezende Soares Cesar ;
orientador, Adroaldo Raizer , 2021.
80 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

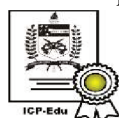
1. Engenharia Elétrica. 2. Câmaras reverberantes. 3.
Simulação numérica. 4. Compatibilidade eletromagnética. I.
, Adroaldo Raizer. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

Murilo Rezende Soares Cesar

Análise e Modelagem Numérica de Câmaras Reverberantes de Modos Misturados

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Elétrica” e aceito, em sua forma final, pelo Curso de Graduação em Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 17 de maio de 2021.



Documento assinado digitalmente

Jean Vianei Leite

Data: 20/05/2021 18:38:32-0300

CPF: 003.474.909-80

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Jean Vianei Leite, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente

Adroaldo Raizer

Data: 18/05/2021 15:22:22-0300

CPF: 649.432.599-87

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Adroaldo Raizer, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Mauricio Valencia Ferreira da Luz

Data: 18/05/2021 11:17:19-0300

CPF: 960.926.969-91

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Maurício Valencia Ferreira da Luz, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente

Kássia Toccolini

Data: 18/05/2021 15:50:06-0300

CPF: 082.214.409-30

Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Eng. Kássia Toccolini (Doutoranda PPGEEL-UFSC)
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado aos meus pais e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, José e Andrea, por sempre acreditar em mim e proporcionarem condições para que eu seguisse o caminho dos estudos.

Agradeço à minha namorada Heloísa Rocha pelo apoio e compreensão durante o período da graduação. Sua companhia me fez entender melhor o homem que sou e qual caminho tomar.

Agradeço também ao professor e orientador Dr. Adroaldo Raizer pela oportunidade de trabalhar em sua equipe. Essa experiência me trouxe muito crescimento pessoal e profissional, algo que levarei para o resto da vida.

Gostaria de agradecer também à equipe MagLab/GEMCO por todos os momentos vividos ao longo de mais de três anos. Agradeço ao Mikael e ao Dalton por todo o conhecimento transmitido e pelo auxílio neste trabalho.

Por fim, agradeço a todos meus amigos e colegas da graduação. A contribuição de cada um me levou a ser a quem sou hoje.

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo apresentar, modelar e analisar câmaras reverberantes de modos misturados (MSC) através de simulações numéricas. Câmaras reverberantes são uma sala com paredes de alta condutividade equipada com um misturador, antenas e equipamentos de medidas em seu interior. O campo eletromagnético injetado na câmara através da antena transmissora excita modos de propagação de ondas no interior da mesma, resultando em padrões de ondas estacionárias tridimensionais. A rotação do misturador perturba a estrutura dos modos e modifica a distribuição do campo na câmara. O movimento do misturador resulta em campo estatisticamente uniforme quando modos suficientes estão presentes na MSC. Câmaras reverberantes são utilizadas como ambiente de testes para ensaios de compatibilidade eletromagnética. A IEC (*International Electrotechnical Commission*) estabelece os requisitos para realização de testes de compatibilidade em câmaras reverberantes através da norma IEC 61000-4-21. A norma descreve o processo de calibração e todo o conjunto necessário para realização de ensaios em câmaras reverberantes. O propósito dessa validação é verificar a uniformidade de campo eletromagnético comparado com limites estabelecidos pela IEC 61000-4-21. Devido às dificuldades para construir as instalações de uma câmara reverberante de modos misturados, modelos numéricos são desenvolvidos para verificar a operação de MSC. Os modelos são simulados no *software* de modelagem eletromagnética *Ansys Electronics Desktop*, utilizando o pacote HFSS. A distribuição do campo eletromagnético no interior dos modelos é analisada e o processo de validação descrito pela norma é realizado em um dos modelos.

Palavras-chave: Câmaras reverberantes. Simulação numérica. Compatibilidade eletromagnética.

ABSTRACT

This work aims to introduce, model and analyze mode stirred reverberation chamber (MSC) through numerical simulations. Reverberation chamber is a room with high conductivity equipped with a stirrer, antennas and measuring equipments. The electromagnetic field injected through a transmitting antenna excites eigenmodes inside the chamber, resulting in a three-dimensional stationary wave pattern. Stirrer's rotation disturbs modes structures and alters fields distribution in the chamber. Stirrer's motion results in a statistically uniform when sufficient modes exist in a MSC. Reverberation chambers are used as test environments for electromagnetic compatibility testing. The IEC (International Electrotechnical Commission) establish required test procedures for performing through standard IEC 61000-4-21. This standard describes the calibration process and all procedures necessary to validate reverberation chamber's operation. The validation's purpose is to verify field uniformity compared to levels determined by IEC 61000-4-21. Due to difficulties to build a mode stirred chamber facility, numerical models are developed to verify MSC operation. The models are simulated at electromagnetic modeling software *Ansys Electronics Desktop*, using the HFSS module. Fields distribution inside the chamber are analyzed and the validation process described by the standard is performed in one of the models.

Keywords: Mode stirred reverberation chamber. Numerical simulation. Electromagnetic compatibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Configuração típica de câmaras reverberantes	18
Figura 2 – Perturbação das ondas estacionárias pela rotação do misturador	20
Figura 3 - Parâmetros geométricos de uma cavidade 3D	20
Figura 4 – Distribuição dos modos ao longo da frequência	22
Figura 5 - Número de modos de propagação em função da frequência	23
Figura 6 - Misturador " <i>Z-Fold</i> ".....	26
Figura 7 - Localização das sondas.....	28
Figura 8 - Desvio padrão para componentes do campo	29
Figura 9 - Gráfico de Carrels.....	42
Figura 10 - Modelo da antena Log-Periódica.....	44
Figura 11 - Modelo 1 com caixa de ar PML	48
Figura 12 - Modelo 1 com caixa de ar FE-BI.....	49
Figura 13 - Modelo 2 de câmara reverberante.....	50
Figura 14 - Modelo 3 de câmara reverberante.....	51
Figura 15 - Parâmetro S antena LPDA 100 MHz – 1 GHz.....	54
Figura 16 - VSWR LPDA 100 MHz – 1 GHz	54
Figura 17 - Ganho polar antena LPDA 100 MHz – 1 GHz.....	55
Figura 18 - Parâmetro S LPDA 200 MHz - 1 GHz	56
Figura 19 - VSWR LPDA 200 MHz - 1 GHz	56
Figura 20 - Ganho polar 3D LPDA 200 MHz - 1 GHz.....	57
Figura 21 - Parâmetro S LPDA 300 MHz - 1 GHz	58
Figura 22 - VSWR antena LPDA 300 MHz - 1 GHz.....	58
Figura 23 - Ganho polar 3D antena LPDA 300 MHz - 1 GHz	59
Figura 24 - Malha de elementos câmara modelo 2	60
Figura 25 - Malha de elementos plano horizontal	61
Figura 26 - Distribuição campo elétrico no WV posição 1	62
Figura 27 - Distribuição campo elétrico no WV posição 2	63
Figura 28 - Distribuição campo elétrico no WV posição 3	64
Figura 29 - Distribuição do campo elétrico em 200 MHz.....	65
Figura 30 - Distribuição do campo elétrico em 400 MHz	66

Figura 31 - Distribuição do campo elétrico em 600 MHz.....	67
Figura 32 - Malha de elementos câmara modelo 2	68
Figura 33 - Malha de elementos plano horizontal	69
Figura 34 - Distribuição campo elétrico no WV posição 1	70
Figura 35 - Distribuição campo elétrico no WV posição 2	71
Figura 36 - Distribuição campo elétrico no WV posição 3	72
Figura 37 - Distribuição do campo elétrico em 300 MHz.....	73
Figura 38 - Distribuição do campo elétrico em 600 MHz.....	74
Figura 39 - Distribuição do campo elétrico em 900 MHz.....	75
Figura 40 - Curvas de desvio padrão modelo 3 de câmara reverberante.....	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Número de amostras necessárias.....	29
Tabela 2 - Comprimentos dipolos antena.....	43
Tabela 3 - Espaçamento entre dipolos consecutivos	44
Tabela 4 - Área mínima de câmaras reverberantes em função da.....	46
Tabela 5 - Dimensões dos modelos de câmaras reverberantes.....	46

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CISPR	<i>Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques</i>
EM	<i>Electromagnetic</i>
EMC	<i>Electromagnetic Compatibility</i>
EMI	<i>Electromagnetic Interference</i>
EuT	<i>Equipment under Test</i>
FAR	<i>Full Anechoic Room</i>
FE-BI	<i>Finite Element Boundary Integral</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i>
IE	<i>Integral Equation</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrônicos</i>
LPDA	<i>Log Periodic Dipole Array</i>
LUF	<i>Lowest Usable Frequency</i>
MoM	<i>Method of Moments</i>
MSC	<i>Mode Stirred Chamber</i>
OATS	<i>Open Air Test Site</i>
RC	<i>Reverberation Chamber</i>
WV	<i>Working Volume</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	TEORIA DE CÂMARAS REVERBERANTES	18
2.1	INTRODUÇÃO.....	18
2.2	VISÃO GERAL.....	18
2.3	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	19
2.3.1	Modos de propagação.....	20
2.3.2	Menor frequência de operação	24
2.3.3	Volume de trabalho	24
2.3.4	Misturador.....	25
2.4	CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS REVERBERANTES	26
2.4.1	Número de amostras.....	28
2.4.2	Uniformidade de campo em câmaras vazias	29
2.4.3	Cálculo da uniformidade de campo	30
2.4.4	Procedimento de calibração com a câmara vazia.....	33
2.4.4.1	<i>Fatores adicionais de calibração</i>	34
2.4.4.1.1	Fator de calibração da antena receptora.....	34
2.4.4.1.2	Fator de carga máxima.....	35
2.4.5	Procedimento de calibração com o eut	35
2.5	CONCLUSÕES	36
3	MODELAGEM NUMÉRICA	37
3.1	INTRODUÇÃO.....	37
3.2	SIMULAÇÃO NUMÉRICA	37
3.3	ANSYS HFSS.....	37
3.3.1	Obtenção de modelo base no hfss.....	38
3.4	MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA.....	40

3.4.1	Antenas	41
3.4.1.1	<i>Antena log periódica.....</i>	41
3.4.2	CÂMARAS REVERBERANTES	45
3.4.2.1	<i>Modelo 1</i>	48
3.4.2.2	<i>Modelo 2</i>	49
3.4.2.3	<i>Modelo 3</i>	50
3.5	CONCLUSÕES	51
4	RESULTADOS	53
4.1	INTRODUÇÃO	53
4.2	MODELOS DE ANTENAS	53
4.2.1	LPDA 100 MHz – 1 GHz.....	53
4.2.2	LPDA 200 MHz – 1 GHz.....	55
4.2.3	LPDA 300 MHz – 1 GHz.....	57
4.3	MODELOS DE CÂMARAS REVERBERANTES	59
4.3.1	Modelo 1	59
4.3.2	Modelo 2	60
4.3.3	Modelo 3	68
4.4	CONCLUSÃO	77
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	78
6	BIBLIOGRAFIA	79

1 INTRODUÇÃO

Interferência eletromagnética (EMI) corresponde à deterioração de um sinal desejado por um distúrbio eletromagnético proveniente de uma fonte [1]. Até a década de 30, as fontes de interferência eram restritas a fenômenos naturais como relâmpagos e explosões solares [2] devido à escassez de fontes de interferência feitas pelo homem. Ao longo dos anos, termos como ruído de rádio e poluição eletromagnética foram utilizados para tentar definir os fenômenos eletromagnéticos envolvidos. Nas últimas décadas, a proliferação de equipamentos como TV, câmeras e, posteriormente, computadores e telefones celulares, alavancaram a necessidade de avaliar o comportamento eletromagnético desses dispositivos. A área de compatibilidade eletromagnética (EMC) visa normalizar os efeitos eletromagnéticos através de ensaios para garantir a coexistência dos aparelhos.

A IEEE (Instituto de Engenheiros Eletrotécnicos e Eletrônicos) define EMC como a capacidade de equipamentos ou sistemas elétricos, eletrônicos ou eletroeletrônicos de operar no ambiente eletromagnético pretendido com eficiência [1]. Atualmente, a maioria dos produtos elétricos, eletrônicos e eletroeletrônicos são desenvolvidos com o objetivo de serem compatíveis eletromagneticamente. O termo compatível eletromagneticamente corresponde à capacidade de operação sem perturbar outros equipamentos e de suportar perturbações EM provenientes de outros dispositivos.

O processo para estabelecer a compatibilidade de um equipamento sob teste (EuT) requer dois passos. O primeiro é determinar se o EuT produz sinais indesejados por meio de radiação e/ou condução. Em seguida o equipamento é exposto a níveis de campo eletromagnético pré-estabelecidos para verificar a operação do EuT [3]. Os ensaios são normalizados por entidades reguladoras, como a IEC (*International Electrotechnical Commission*) e o CISPR (*Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques*).

Para a realização de testes, o ambiente de ensaios é fundamental. É necessário um ambiente controlado eletromagneticamente para que as medidas não sofram interferências de fatores externos [4]. A comunidade de EMC busca continuamente por ambientes mais confiáveis e econômicos [5]. Nesse contexto, as câmaras reverberantes (RC) vêm tendo seu uso popularizado em detrimento a ambientes de teste já estabelecidos, como o local de ensaio de área aberta (OATS), a câmara anecóica (FAR) e a célula GTEM.

Em comparação com a FAR, a câmara reverberante possui diversas vantagens. Devido à natureza reflexiva, a maior vantagem de câmaras reverberantes consiste na possibilidade de

injetar pouca potência para atingir níveis de campo eletromagnético desejados para testes. A FAR possui alto custo de produção devido à presença de absorvedores de onda eletromagnética e a própria construção da câmara, ao contrário da RC, que é constituída apenas por chapas metálicas. Além disso, o campo eletromagnético estatisticamente uniforme, isotrópico e polarizado em todas as direções no interior da câmara reverberante dispensa a alteração da orientação e do posicionamento do EuT durante ensaios [6]. Essa característica confere vantagem em relação à câmara anecóica e à GTEM, que requerem ensaios em mais de uma orientação do EuT. Em relação à célula GTEM, a RC possui volume significativamente maior, possibilitando a realização de ensaios EMC em equipamentos maiores.

A importância de ensaios em RC foi normalizada pela IEC através da publicação da norma IEC 61000-4-21, publicada em 2003. Essa norma explica como o campo no interior da câmara se torna estatisticamente uniforme, isotrópico e polarizado aleatoriamente. A norma também descreve o procedimento de validação e o uso de câmaras reverberantes em ensaios de EMC.

O objetivo desse trabalho é desenvolver modelos de câmaras reverberantes de modos misturados (MSC) e analisar o comportamento do campo eletromagnético em seu interior. As câmaras serão modeladas numericamente através do método de elementos finitos (FEM). Devido a limitações para construção de uma câmara reverberante física, apenas o modelo numérico será utilizado. A simulação será realizada no *software* de modelagem *Ansys Electronics Desktop*, utilizando o módulo HFSS. Os resultados serão analisados e comparados com os níveis estabelecidos pela IEC 61000-4-21.

As câmaras reverberantes serão desenvolvidas com frequência mínima de operação de 100 MHz, 200 MHz e 300 MHz. A modelagem inclui a obtenção dos modelos das antenas no interior da câmara e o misturador, também chamado de conjunto de pás.

O desenvolvimento deste trabalho foi delimitado da seguinte forma:

O capítulo 2 apresenta a teoria relacionada a câmaras reverberantes de modos misturados e o método analítico para obtenção de campo eletromagnético uniforme. Também é apresentada a metodologia envolvida para o processo de validação e calibração de câmaras reverberantes.

No capítulo 3 é apresentado o *software* de simulação numérica e suas funcionalidades básicas. Em seguida, são apresentados os modelos desenvolvidos no HFSS das antenas, do misturador e da câmara reverberante completa.

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos pelas modelagens realizadas no capítulo 3. Os resultados são utilizados para os cálculos da validação e a uniformidade de campo é analisada.

Por fim, o capítulo 5 apresenta as considerações finais e a conclusão do trabalho realizado.

2 TEORIA DE CÂMARAS REVERBERANTES

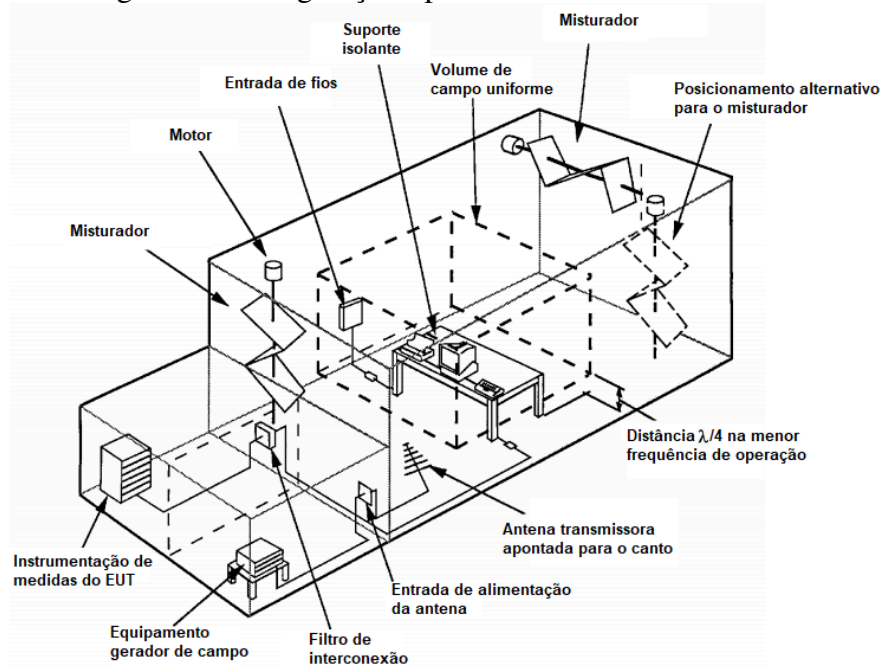
2.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será apresentada a câmara reverberante de modos misturados (MSC) e fatores importantes para o desenvolvimento de RC. Em seguida, será descrito o processo de calibração de câmaras reverberantes e os cálculos necessários para obter uniformidade de campo, de acordo com a norma IEC 61000-4-21.

2.2 VISÃO GERAL

Câmara reverberante de modos misturados (MSC) é uma sala metálica blindada capaz de gerar altos níveis de campo eletromagnético em seu interior. A câmara é composta por paredes de alta condutividade, um conjunto mecânico de pás metálicas e antenas para geração e detecção de campos eletromagnéticos. A Figura 1 representa a configuração típica de uma MSC. Esse ambiente possibilita a realização de ensaios EMC por confinar o campo eletromagnético em seu interior sem interferências externas. A RC pode ser utilizada para ensaios de emissão radiada, imunidade radiada, caracterização da blindagem de cabos e conectores, medidas de eficiência de antenas e efeitos biomédicos [7].

Figura 1 - Configuração típica de câmaras reverberantes



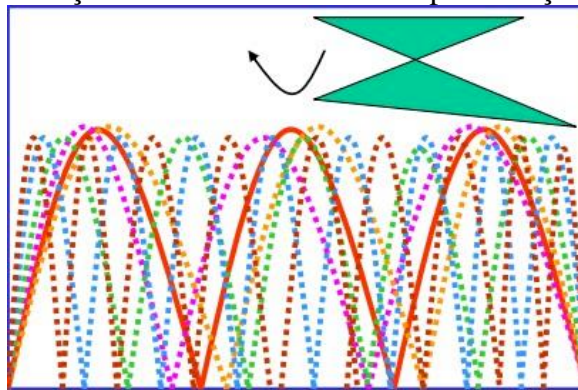
Fonte: [8] Adaptada

2.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A compreensão dos fenômenos eletromagnéticos associados a câmaras reverberantes pode ser realizada através de duas abordagens analíticas. Uma delas envolve a solução direta das equações de Maxwell com condições de contorno variantes no tempo. Devido à complexidade das equações de Maxwell variantes no tempo, a solução formal é difícil de ser obtida [9]. Outra abordagem pode ser feita a partir da combinação linear dos modos de propagação em uma cavidade ressonante vazia com dimensões iguais à câmara reverberante. Através desse método os modos de propagação e frequências equivalentes são utilizados para representar o campo eletromagnético e satisfazer as condições de contorno na superfície do misturador. A familiaridade com o cálculo de modos de propagação perturbados e suas respectivas frequências de ressonância reduz a complexidade do problema, o que facilita a utilização dessa abordagem. Uma condição necessária para o uso desse método é a presença de uma grande quantidade de modos de propagação no interior de uma câmara para cada frequência [10].

Entre os modelos existentes de câmaras reverberantes, a MSC é o modelo mais popularizado devido à simplicidade do misturador mecânico. A geração de campo eletromagnético proveniente de uma antena transmissora forma padrões de onda estacionária no interior da RC. Esse padrão é resultado da soma vetorial das ondas incidentes e refletidas devido às reflexões do campo eletromagnético nas paredes da câmara. A rotação mecânica do conjunto de pás perturba a natureza dos campos EM e altera a estrutura das ondas estacionárias [8], conforme ilustra a Figura 2. No interior da câmara é gerado um campo eletromagnético estatisticamente uniforme, isotrópico e polarizado aleatoriamente.

Figura 2 – Perturbação das ondas estacionárias pela rotação do misturador

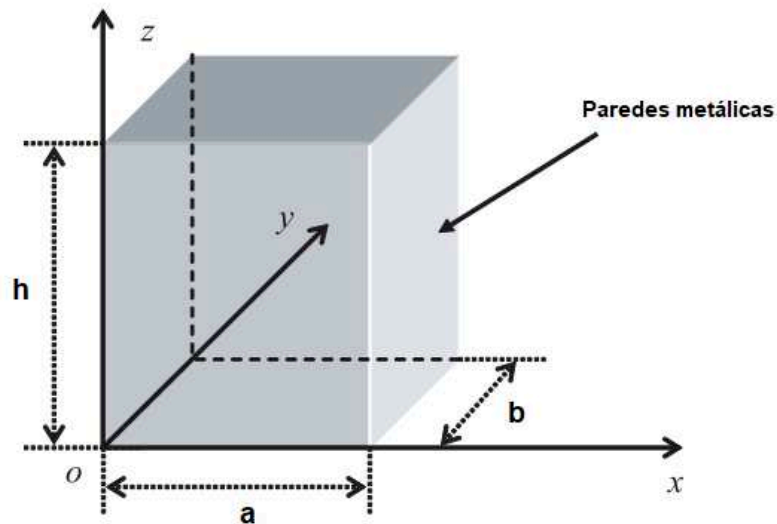


Fonte: [11]

2.3.1 Modos de propagação

Considere uma cavidade ressonante retangular de dimensões a (largura), b (comprimento), e h (altura), representada pela Figura 3. Ao transmitir energia de radiofrequência no interior da cavidade, modos de propagação são excitados de acordo com a frequência. Esse fenômeno é chamado de ressonância.

Figura 3 - Parâmetros geométricos de uma cavidade 3D



Fonte: [12] Adaptada

Cada modo de propagação possui configuração espacial do campo eletromagnético e frequência de ressonância associada. O cálculo das frequências de ressonância, ou seja, a frequência em que cada modo de propagação m,n,p se forma em uma cavidade tridimensional é dada pela equação 1:

$$f_{m,n,p} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2} \quad (1)$$

Onde:

c - velocidade de propagação da onda no meio, em m/s;

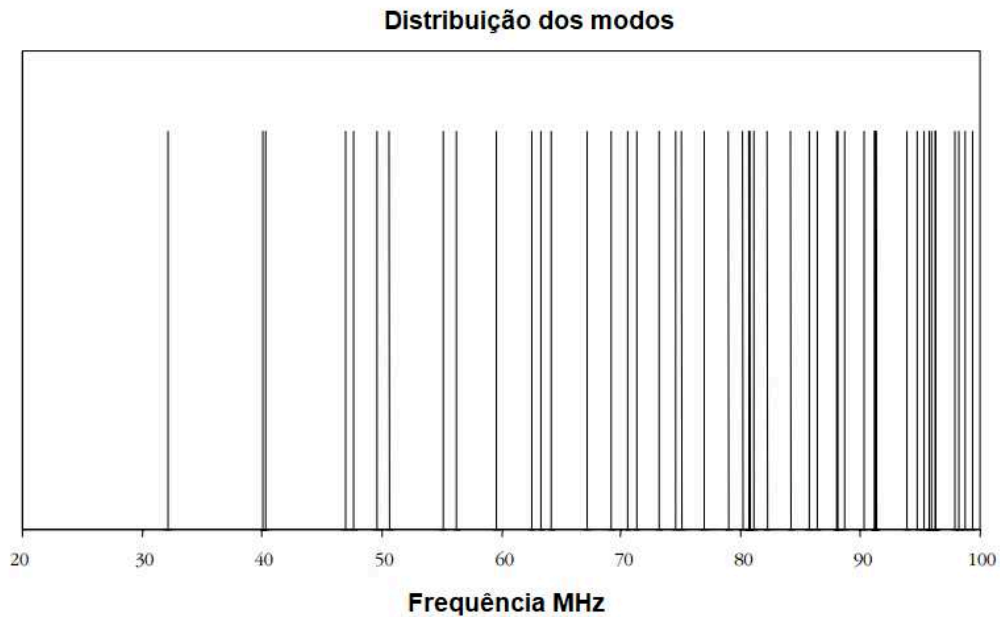
m, n, p - índices dos modos (pelo menos dois são diferentes de zero);

a, b, h – dimensões da cavidade, em m.

O modo calculado representa uma variação única do campo eletromagnético em função da localização espacial ao longo da cavidade. O primeiro modo de propagação, chamado modo fundamental, corresponde à menor frequência de ressonância da cavidade. É calculado alocando um dos índices igual a 0 e os restantes iguais a 1. Dessa forma, o modo fundamental é representado por 110, 101 ou 011, de acordo com as dimensões da cavidade.

Considere um exemplo de câmara retangular de dimensões 10,8 m x 5,2 m x 3,9 m. Utilizando a equação 1, é possível calcular a frequência em que cada modo m,n,p é excitado na câmara. A Figura 4 mostra a distribuição de modos teóricos do exemplo de câmara ao longo da frequência.

Figura 4 – Distribuição dos modos ao longo da frequência



Fonte: [8] Adaptada

O primeiro modo de propagação da câmara do exemplo, representado pelo índice 110, se torna ressonante a partir da frequência de 32,01 MHz. Os modos seguintes, 210 e 101, são ressonantes em 40,04 MHz e 40,89 MHz, respectivamente, como mostra a Figura 4. Com o aumento da frequência é possível notar que mais modos de propagação são excitados no interior da câmara.

O número acumulado de modos excitados em determinada frequência pode ser estimado em função da frequência f e é dado pela equação 2. O conhecimento do número de modos permite avaliar a quantidade de modos de propagação excitados ao longo da faixa de frequência desejada. Sendo assim, a solução analítica de $N(f)$ é indispensável para o estudo de câmaras reverberantes através dessa abordagem [9].

$$N(f) = \frac{8\pi}{3} abh \left(\frac{f}{c} \right)^3 \quad (2)$$

Onde:

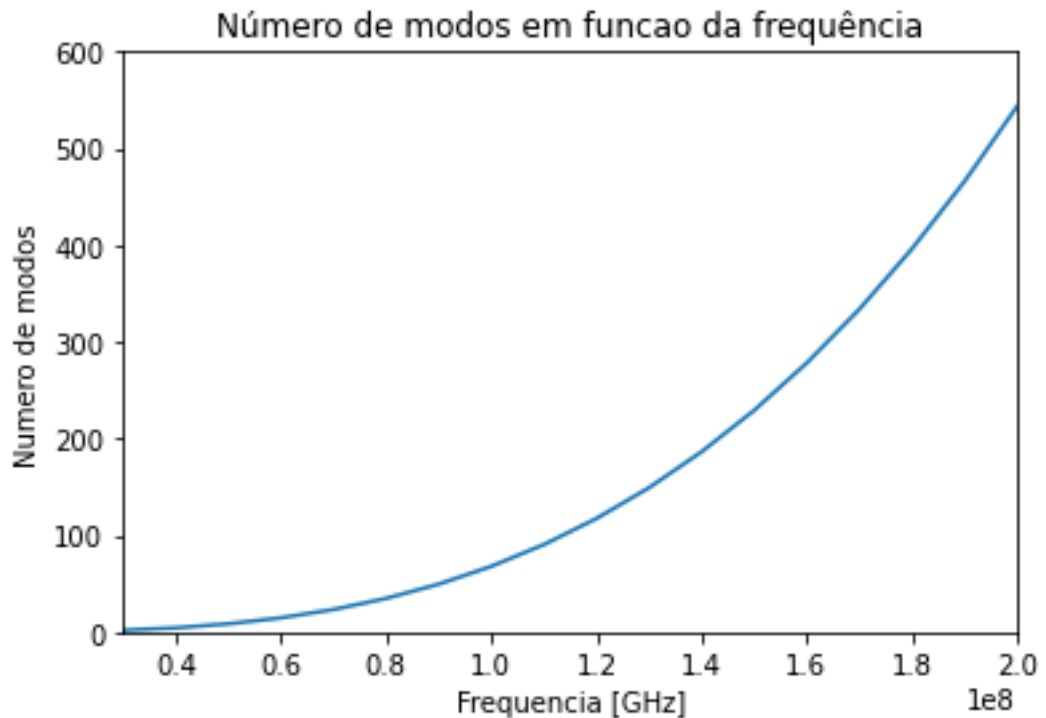
a, b, h – Dimensões da câmara, em m;

f – Frequência, em Hz;

c – Velocidade de propagação da onda, em m/s.

O número total de modos excitados para o exemplo de câmara com dimensões 10,8 m x 5,2 m x 3,9 m é ilustrado na Figura 5.

Figura 5 - Número de modos de propagação em função da frequência



Fonte: Do autor

A curva $N(f)$ para o exemplo citado anteriormente é apresentada entre 30 MHz e 200 MHz na Figura 5. É possível notar maior quantidade de modos de propagação no interior da câmara com o aumento da frequência.

Para cada um dos modos de propagação, existe um fator de qualidade Q que descreve a capacidade de armazenamento de energia da câmara em relação às perdas por dissipação. A capacidade de armazenamento de energia de uma RC está relacionada ao material das paredes, o volume da câmara e a frequência. O fator de qualidade Q é calculado pela equação 3.

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

Onde:

V - Volume da câmara, em m³;

η_{Tx} - Eficiência antena transmissora;

η_{Rx} - Eficiência antena receptora;

λ - Comprimento de onda, em m;

P_{MedRec} - Potência média recebida na Rx, em W;

$P_{entrada}$ - Potência de entrada na Tx, em W;

$\langle P_{MedRec} / P_{entrada} \rangle$ - Razão média ao longo de uma revolução do misturador.

A notação $\langle \rangle$ indica a média aritmética da razão $\frac{P_{MedRec}}{P_{entrada}}$ em N posições do misturador.

2.3.2 Menor frequência de operação

Tipicamente, câmaras reverberantes de modos misturados possuem frequência de operação a partir de algumas centenas de MHz a dezenas de GHz. As dimensões da câmara, número de modos e eficiência do misturador determinam a menor frequência de operação. Na menor frequência devem estar presentes entre 60 e 100 modos de propagação distintos. Essa condição é necessária para que haja modos excitados suficientes para a perturbação do misturador. A menor frequência de operação (LUF) é geralmente definida na frequência em que a câmara atinge ambiente estatisticamente uniforme e isotrópico. A partir da menor frequência de operação a RC pode ser utilizada para testes [8].

Para a câmara exemplo de dimensões 10,8 m x 5,2 m x 3,9 m, a menor frequência de operação pode ser estimada a partir do número de modos existentes. A equação 1 é utilizada para calcular a frequência em que a câmara possui modos de propagação suficientes. Estabelecendo o número de modos mínimos como 60, a câmara possui LUF = 95,93 MHz e para 100 modos, LUF = 113 MHz. Por se tratar do cálculo do número teórico de modos, esse cálculo oferece uma estimativa da frequência de operação da câmara reverberante. A LUF é dimensionada através do procedimento de calibração para verificar a uniformidade de campo.

2.3.3 Volume de trabalho

A região onde o campo eletromagnético é estatisticamente uniforme, isotrópico e polarizado aleatoriamente é chamada de volume de teste ou volume de trabalho (WV). É delimitada por oito posições de sondas de campo, que correspondem aos vértices do volume. As dimensões do volume de trabalho são definidas pela menor frequência de operação da câmara reverberante. De acordo com a IEC 61000-4-21, o WV deve estar $\lambda/4$ m distante (na LUF) das paredes e da antena transmissora. Em seu interior estão contidas apenas a antena receptora, mesa de apoio para testes e o EuT.

O tamanho máximo do volume de trabalho da câmara exemplo pode ser estimado a partir da dimensão de $\lambda/4$. Para a câmara exemplo de dimensões 10,8 m x 5,2 m x 3,9 m, a LUF em que 60 modos de propagação estão presentes é de 95,93 MHz, ou seja, $\lambda/4 = 0,78$ m. Com essa configuração, as dimensões máximas do WV são 9,2 m x 3,6 m x 2,3 m. Para o cálculo teórico do tamanho máximo do WV, as antenas e o misturador são considerados pontuais. Antenas e misturadores de diferentes tamanhos e configurações podem ser utilizados em RC, portanto as dimensões do WV real são menores que o teórico.

2.3.4 Misturador

A distribuição de campo eletromagnético no interior da câmara é resultado da superposição dos modos de propagação. Essa superposição resulta em um padrão de onda estacionária tridimensional no interior da câmara com regiões de máximos e mínimos [13]. Para um equipamento sob teste posicionado no interior da câmara qualquer variação do posicionamento pode resultar em uma mudança de até 40dB na intensidade do campo eletromagnético. [14].

A instalação de um misturador metálico, também chamado de *stirrer*, tem como objetivo modificar as condições de contorno. O movimento do misturador perturba a natureza do campo, altera a estrutura dos modos de propagação e conseqüentemente as regiões de máximos e mínimos. Dessa forma, a probabilidade do EuT estar exposto a altas intensidades de campo é maior. Uma vez que o misturador tenha rotacionado posições distintas suficientes, as variações resultantes fornecem campos que abrangem todas as direções e polarizações. Isso implica que a magnitude e direção dos campos eram os mesmos, dentro de um limite de incerteza [8].

A rotação do conjunto de pás pode ser realizada através de duas técnicas: modo *stirring* e modo *tuning*. No modo *stirring* as pás são rotacionadas continuamente, enquanto no modo

tuning a rotação é feita em passos discretizados ao longo de uma revolução. Em frequências baixas mais posições do rotor são computadas devido a menor quantidade de modos excitados. Conforme relatado anteriormente, a densidade modal aumenta com a frequência, o que reduz a necessidade de um número elevado de posições do misturador.

O conjunto de pás é um conjunto de chapas metálicas com dimensão maior que $\lambda/2$ para menor frequência utilizada. A configuração “*Z-Fold*”, considerada o formato clássico para misturador de câmaras reverberantes, é composta por placas com angulação de 30° a 120° entre si. A Figura 6 ilustra a configuração típica do misturador “*Z-Fold*”.

Figura 6 - Misturador “*Z-Fold*”



Fonte: GTEMCell Group

A função de uma câmara reverberante de modos misturados é gerar um ambiente de testes estatisticamente uniforme e isotrópico com limites aceitáveis de incerteza. Isso é realizado ao introduzir um misturador mecânico em uma sala blindada, o que redistribui a energia dos campos eletromagnéticos.

2.4 CALIBRAÇÃO DE CÂMARAS REVERBERANTES

Para a operação de MSC é necessário realizar um processo de validação para verificar a uniformidade de campo no interior da câmara. Esse procedimento ocorre apenas uma vez após a construção da câmara ou após modificações significativas. O propósito da validação é garantir a

distribuição uniforme do campo elétrico no interior da RC em um intervalo de incerteza definido ao longo de N posições do misturador [8].

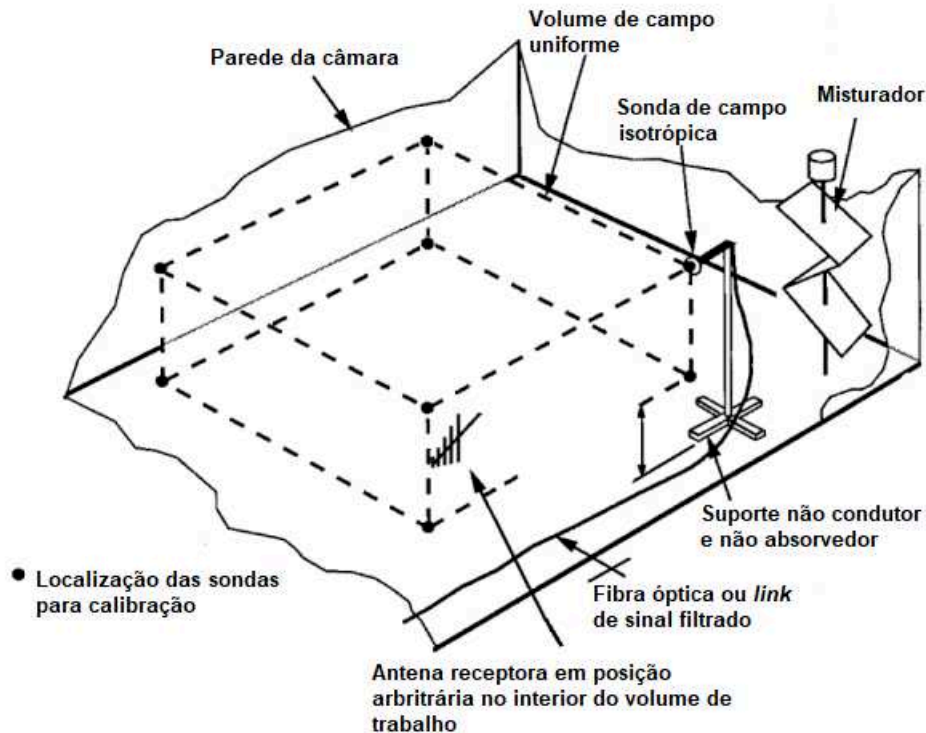
O processo de calibração é feito com a câmara vazia, apenas as antenas transmissora e receptora, o misturador e sonda de campo estão posicionados em seu interior. A validação é baseada na comparação entre as medidas de pico dos campos elétricos detectados pelas sondas de campo e a potência média recebida pela antena Rx. Para garantir a acurácia, são obtidos valores de potência média recebida na Rx em oito locais distintos no interior do volume de trabalho.

A calibração deve ser realizada para ambas as técnicas modo *tuning* e modo *stirring*. O procedimento de calibração será explicado de acordo com a técnica modo *tuning*, na qual os passos do rotor são discretizados.

A uniformidade de campo é verificada em uma região espacial no interior da câmara reverberante chamada de volume de trabalho (WV). Essa região é delimitada pela sonda de campo posicionada em oito pontos no interior da RC.

As sondas de campo, que constituem os vértices do WV, devem ser posicionadas a $\lambda/4$ m, para menor frequência de operação, de distância das paredes da câmara. Isso se deve a possíveis efeitos de acoplamento parasita entre as paredes metálicas e o dispositivo em teste. A Figura 7 ilustra o posicionamento das sondas e das antenas no interior da câmara reverberante.

Figura 7 - Localização das sondas



Fonte: [8] Adaptada

2.4.1 Número de amostras

A norma IEC 61000-4-21 estabelece que ao menos 12 posições distintas ao longo de uma revolução devem ser utilizadas para computar dados de campo elétrico, potência transmitida e recebida. Para o modo *tuning* as posições do rotor são chamadas de passo e para o modo *stirring* de amostras.

Conforme abordado anteriormente, em baixas frequências, poucos modos estão presentes e a densidade modal é menor, o que dificulta no processo de validação nessa faixa de frequência. Para compensar essa questão são utilizadas mais posições do rotor em baixa frequência, o que aumenta a quantidade de dados de campo elétrico e potência computados. A Tabela 1 apresenta o número de passos recomendados a partir da frequência inicial f_s .

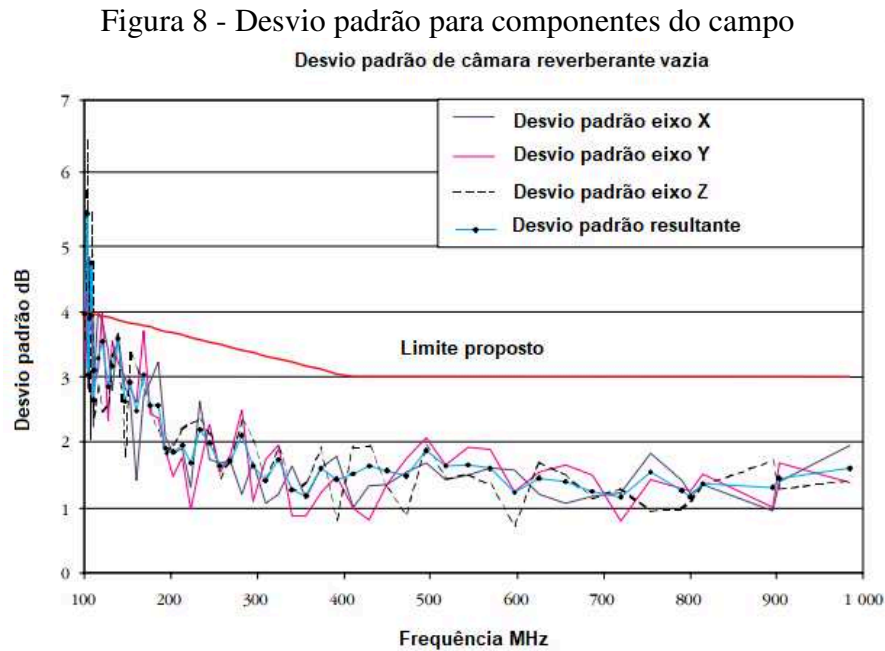
Tabela 1 - Número de amostras necessárias

Faixa de frequência	Número de amostras para calibração e teste	Número de frequências para calibração
f_s a $3 f_s$	50	20
$3 f_s$ a $6 f_s$	18	15
$6 f_s$ a $10 f_s$	12	10
Acima de $10 f_s$	12	20/década

Fonte: [8] modificado

2.4.2 Uniformidade de campo em câmaras vazias

A uniformidade de campo é o parâmetro mais importante a ser calculado para a RC, pois define se a câmara é capaz de operar corretamente. Os desvios padrões dos campos elétricos são utilizados como critérios para expressar a uniformidade de campo em termos do desvio para os três eixos σ_{xyz} e o desvio padrão de cada eixo σ_x , σ_y , e σ_z . Para frequências abaixo de 400 MHz o limite proposto pela norma é de 4 dB e acima de 400 MHz o limite é de 3 dB. A Figura 8 ilustra os limites propostos [8].



Fonte: [8] Adaptada

2.4.3 Cálculo da uniformidade de campo

A análise da uniformidade de campo é realizada através dos dados de campos elétricos computados nas sondas de campo em oito posições no interior da câmara reverberante [8]. De modo geral, são utilizados valores de campo elétrico para o cálculo dos desvios padrões devido a maior disponibilidade de equipamentos de medidas que detectam campos elétricos.

Os valores máximos de campo elétrico nas coordenadas x, y, z bem como o campo máximo resultante são computados em N posições do misturador, conforme Tabela 1. Os valores máximos de campo são utilizados para calcular a média de N posições do misturador [8]. As equações 4, 5, 6 e 7 representam esses valores:

$$E_{\max,x} = [E_x]_N \quad (4)$$

$$E_{\max,y} = [E_y]_N \quad (5)$$

$$E_{\max,z} = [E_z]_N \quad (6)$$

$$E_{\max,total} = [E_{xyz}]_N \quad (7)$$

Onde:

$[E]_N$ - representa a média aritmética do campo elétrico máximo em N posições.

Os dados de campo elétrico máximo são normalizados pela potência média de entrada utilizando as equações 8, 9, 10 e 11. A potência de entrada, medida em W, é mantida constante ao longo de toda a verificação.

$$\vec{E}_x = \frac{E_{\max,x}}{\sqrt{P_{\text{entrada}}}} \quad (8)$$

$$\vec{E}_y = \frac{E_{\max,y}}{\sqrt{P_{\text{entrada}}}} \quad (9)$$

$$\vec{E}_z = \frac{E_{\max,z}}{\sqrt{P_{\text{entrada}}}} \quad (10)$$

$$\vec{E}_{xyz} = \frac{E_{\max,xyz}}{\sqrt{P_{\text{entrada}}}} \quad (11)$$

Onde:

$P_{entrada}$ - Potência injetada pela antena Tx em W.

Para computar o desvio padrão para o campo elétrico das componentes x, y, z e o campo elétrico resultante, é calculada a média das oito posições da sonda pelas equações 12, 13, 14 e 15.

$$\langle \vec{E}_x \rangle = \langle \vec{E}_x \rangle_8 = \frac{\sum_{i=1}^8 \vec{E}_{x,i}}{8} \quad (12)$$

$$\langle \vec{E}_y \rangle = \langle \vec{E}_y \rangle_8 = \frac{\sum_{i=1}^8 \vec{E}_{y,i}}{8} \quad (13)$$

$$\langle \vec{E}_z \rangle = \langle \vec{E}_z \rangle_8 = \frac{\sum_{i=1}^8 \vec{E}_{z,i}}{8} \quad (14)$$

$$\langle \vec{E}_{xyz} \rangle = \langle \vec{E}_{xyz} \rangle_8 = \frac{\sum_{i=1}^8 \vec{E}_{xyz,i}}{8} \quad (15)$$

Onde:

$\langle \rangle_n$ representa a média aritmética de 8 posições das sondas.

Através dos 24 valores normalizados de campo, isto é, as componentes x, y, z computadas nas oito localizações das sondas, é calculado o valor médio dos campos elétricos combinados pela equação 16.

$$\langle \vec{E} \rangle_{24} = \left\langle \frac{\vec{E}_x + \vec{E}_y + \vec{E}_z}{3} \right\rangle_8 = \frac{\sum_{r=x,y,z} \sum_{i=1}^8 \vec{E}_{r,i}}{24} \quad (16)$$

A partir dos valores obtidos anteriormente é possível realizar o cálculo dos desvios padrões normalizados para cada componente x, y, z utilizando as equações 17, 18 e 19. O desvio

padrão por eixo é o desvio entre o campo elétrico normalizado médio das oito localizações e o campo elétrico máximo normalizado para cada localização da *probe* [8].

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (\vec{E}_{x,i} - \langle \vec{E}_x \rangle)^2}{(8-1)}} \quad (17)$$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (\vec{E}_{y,i} - \langle \vec{E}_y \rangle)^2}{(8-1)}} \quad (18)$$

$$\sigma_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^8 (\vec{E}_{z,i} - \langle \vec{E}_z \rangle)^2}{(8-1)}} \quad (19)$$

O cálculo do desvio padrão dos três eixos utiliza os desvios de cada componente para o cálculo, representado pela equação 20:

$$\sigma_{24} = \sqrt{\frac{\sum_{r=x,y,z} \sum_{i=1}^8 (\vec{E}_{r,i} - \langle \vec{E}_{24} \rangle)^2}{(24-1)}} \quad (20)$$

O desvio padrão relativo ao campo elétrico normalizado representado em dB é expressado através das equações 21, 22, 23 e 24:

$$\sigma_{x,dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_x}{\langle \vec{E}_x \rangle} + 1 \right) \quad (21)$$

$$\sigma_{y,dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_y}{\langle \vec{E}_y \rangle} + 1 \right) \quad (22)$$

$$\sigma_{z,dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_z}{\langle \vec{E}_z \rangle} + 1 \right) \quad (23)$$

$$\sigma_{24,dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{\sigma_{24}}{\langle \vec{E}_{24} \rangle} + 1 \right) \quad (24)$$

Conforme exposto anteriormente, o desvio padrão em dB é utilizado para verificar se a câmara reverberante possui campo elétrico estatisticamente uniforme, isto é, está apta a operar. Dessa forma, os desvios $\sigma_{x,y,z,24}$ devem estar contidos nos limites estabelecidos pela IEC 61000-4-21.

Para frequências menores que 400 MHz:

$$\sigma_{x,y,z,24} < 4 \text{ dB}$$

Para frequência > 400 MHz:

$$\sigma_{x,y,z,24} < 3 \text{ dB}$$

Para a câmara exemplo, os desvios padrão de cada eixo e o desvio padrão resultante são verificados a partir da LUF. Entre 95,93 MHz e 400 MHz os desvios devem respeitar o limite de 4 dB, conforme ilustrado pela Figura 8. Acima da frequência de 400 MHz o limite estabelecido é de 3 dB.

Caso a uniformidade não seja atingida através dos critérios acima, é possível aumentar o número de passos do misturador ao longo de uma revolução ou reduzir o WV. Após essas modificações, é necessário realizar todos os cálculos descritos acima novamente e verificar a uniformidade da câmara.

2.4.4 Procedimento de calibração com a câmara vazia

Calibração de câmaras reverberantes é um processo no qual são verificados a operação e os níveis de potência injetada. É um procedimento realizado com a câmara vazia (sem EuT) e feito apenas uma vez. A uniformidade é verificada ao longo de uma década da faixa de frequência de operação. A RC pode realizar testes a partir da frequência em que a uniformidade de campo atinge os requerimentos necessários [8].

O procedimento é realizado apenas com a antena receptora no interior do volume WV, logo, a mesa de testes e o EuT são retirados. A calibração requer oito posições distintas de leitura para a antena Rx, modificando a orientação em 20° em relação aos eixos da câmara a cada nova localização. A modificação da orientação da antena Rx é importante para diminuir erros de leitura da polarização. A antena Tx é posicionada em um local fixo, preferencialmente apontada para um canto da câmara, distante $\lambda/4$ das paredes e do WV.

A partir da menor frequência de teste f_s , o misturador é rotacionado 360° em passos discretos. A cada posição do rotor são computadas as leituras de campo elétrico das sondas localizadas nos vértices do volume de trabalho, potências máximas e médias recebidas na Rx e potência média de entrada na Tx. O processo é repetido em frequências com intervalos logarítmicos até atingir uma década da frequência inicial. Acima de $10 f_s$ apenas três posições da *probe* e da antena receptora são necessárias para computar os valores, sendo um dos locais o centro do volume de trabalho.

2.4.4.1 Fatores adicionais de calibração

Fatores adicionais relacionados à RC devem ser determinados para servir de referência à câmara montada para testes em seu interior. Esses fatores são utilizados para avaliar a operação da câmara equipada em relação a câmara vazia [8].

2.4.4.1.1 Fator de calibração da antena receptora

O fator de calibração da antena receptora (ACF), dado pela equação 25, é utilizado como comparativo no cálculo da carga da câmara reverberante. O fator AFC para a câmara vazia é calculado para oito posições até uma década da frequência inicial f_s e acima dessa faixa de frequência apenas em três posições.

$$ACF = \left\langle \frac{P_{MedRec.}}{P_{entrada}} \right\rangle \quad (25)$$

2.4.4.1.2 Fator de carga máxima

O fator de carga máxima é dimensionado para determinar se o EuT pode afetar na qualidade na câmara. O fator ACF da câmara vazia, calculado na equação 25, é comparado ao fator ACF com a câmara carregada. O carregamento da câmara é realizado instalando diversos absorvedores de onda eletromagnética em posições aleatórias no interior da RC. O objetivo é verificar se a uniformidade de campo é afetada pela inserção de objetos que interagem com o campo eletromagnético no interior da câmara. Para isso, é feita uma calibração utilizando os passos descritos em 2.4.4 com absorvedores no interior. O fator de carga máxima é dado pela equação 26.

$$\text{Carregamento} = \frac{ACF_{\text{Câmara_Vazia}}}{ACF_{\text{Câmara_Carregada}}} \quad (26)$$

2.4.5 Procedimento de calibração com o EuT

Após a realização da calibração da câmara reverberante de modos misturados, é considerado que essa instalação está apta a operar ensaios. No entanto, antes de cada teste é realizada uma verificação com todos os equipamentos e o EuT para medir o campo uniforme da câmara [8]. Os passos são semelhantes aos da calibração com a câmara vazia.

A partir da frequência inicial f_s , o misturador é rotacionado utilizando o número de passos da Tabela 1. O procedimento é realizado da mesma forma relatada em 2.4.4. Os valores de potência máxima e média recebida na antena receptora e potência de entrada na transmissora são computados. Com esses valores é calculado o fator de calibração da câmara (CCF), dado pela equação 27. O CCF corresponde à potência média recebida normalizada ao longo de N posições do misturador.

$$CCF = \left\langle \frac{P_{\text{Med Rec.}}}{P_{\text{entrada}}} \right\rangle_N \quad (27)$$

Através do CCF, o fator de carga da câmara pode ser determinado pela equação 28.

$$CLF = \frac{CCF}{ACF} \quad (28)$$

O fator CLF é utilizado na comparação com o fator de carga máxima da câmara calculado pela equação 26. A carga da câmara não pode exceder o fator de carga máxima. Um fator CLF excedente significa que a câmara está carregada a ponto de interferir na uniformidade de campo. Caso essa verificação falhe é necessário aumentar o número de passos do misturador de 10% a 50% ou reduzir o volume de trabalho no qual o campo é uniforme [8].

2.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentados o princípio de funcionamento de uma MSC e os principais parâmetros associados. Em seguida foram apresentados o procedimento para a calibração de câmaras reverberantes e os cálculos necessários para verificar a uniformidade de campo. Parâmetros teóricos calculados, como o número de modos e a menor frequência de operação, são utilizados como estimativa para o desenvolvimento de um modelo de RC. É notório que a câmara reverberante é obtida de forma experimental, realizando testes e validações a partir do dimensionamento teórico, até atingir um modelo capaz de operar.

No próximo capítulo será apresentado o *software* utilizado para realizar a modelagem numérica de câmaras reverberantes e os principais parâmetros que devem ser configurados para a simulação. Além disso, serão expostos os modelos obtidos com base nas informações do capítulo 2 e a metodologia utilizada.

3 MODELAGEM NUMÉRICA

3.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os modelos numéricos de câmaras reverberantes de modos misturados. Inicialmente será apresentado o módulo de modelagem numérica HFSS do *software Ansys Electronics Desktop*, e conceitos utilizados para a simulação. Os parâmetros necessários para obter um modelo básico no HFSS também serão abordados. Em seguida, serão apresentados os modelos de antenas e câmaras reverberantes desenvolvidos.

3.2 SIMULAÇÃO NUMÉRICA

A simulação numérica de câmaras reverberantes de modos misturados requer o cálculo de dispersão dos campos eletromagnéticos e correntes excitadas por uma fonte em um volume definido. Os campos resultantes do espalhamento devido às paredes, o misturador, as antenas e o EuT são definidos pelas equações de Maxwell [5].

Para o presente trabalho, o módulo HFSS do programa *Ansys Electronics Desktop* foi utilizado para a modelagem de MSC. O HFSS é um solucionador de onda completa, o que possibilita a modelagem de diversas estruturas, como antenas e placas de circuito impresso. O programa permite a análise tridimensional de campos eletromagnéticos em alta frequência através do método dos elementos finitos (FEM) [15].

3.3 ANSYS HFSS

O programa ANSYS HFSS é um simulador de estruturas 3D em alta frequência que permite a solução de problemas eletromagnéticos estáticos e transientes no domínio do tempo e da frequência. A solução dos campos eletromagnéticos utiliza o método de elementos finitos. Neste método, estruturas 3D modeladas pelo usuário são discretizadas em uma malha de elementos finitos representada por tetraedros. O HFSS utiliza malha adaptativa, um processo iterativo em que os tamanhos dos elementos tetraédricos são reduzidos até atingir determinado critério de convergência.

O método de elementos finitos é um método numérico no qual o modelo tridimensional é dividido em diversas regiões menores. Cada sub-região, chamada de elemento, representa o

campo eletromagnético com uma função local. Os elementos são representados por tetraedros e o conjunto recebe o nome de malha.

No HFSS, a geração da malha a partir da estrutura 3D é o primeiro passo do processo de solução do *software*. Nos vértices de cada tetraedro, chamados de nós, valores de campo eletromagnético tangenciais às faces do elemento são computados. O valor do campo eletromagnético no interior de cada elemento é interpolado a partir dos valores nodais. Essa representação permite transformar as equações de Maxwell em um conjunto de equações matriciais que são solucionadas utilizando métodos numéricos tradicionais. Para problemas que requerem maior precisão o *software* permite que os pontos médios entre cada vértice também computem valores de campo eletromagnético [15].

Através da malha gerada, o HFSS computa os modos de propagação em cada porta inserida no modelo. O programa calcula os modos existentes em uma linha de transmissão com seção cruzada semelhante à da porta. A partir disso, o campo eletromagnético é computado ao longo de toda a estrutura, assumindo que um modo de propagação é excitado por vez. Com esses cálculos, a matriz de parâmetros S é computada levando em consideração todas as ondas transmitidas e refletidas. Os parâmetros S representam a razão entre onda incidente e refletida em uma porta e são utilizados para calcular coeficientes de transmissão e reflexão.

3.3.1 Obtenção de modelo base no hfss

A obtenção de um modelo eletromagnético no *software* HFSS inicia-se com a criação das estruturas 3D. O programa possui ferramentas CAD para o desenvolvimento de estruturas, além de possibilitar a criação de geometrias baseadas em funções matemáticas. O programa permite que estruturas criadas em outros *softwares* CAD sejam importadas no HFSS.

Em seguida, são definidos os materiais relacionados a cada estrutura. O HFSS possui uma gama de materiais em sua biblioteca e permite a adição de novos materiais com base nas características elétricas. O *software* conta também com condições de contorno aplicadas nas faces de objetos ou planos modelados. Condições de contorno tais como condutor perfeito e condutividade finita podem ser utilizadas para simplificar a complexidade do modelo eletromagnético e reduzir o cálculo computacional.

As condições de contorno também são utilizadas para delimitar o volume de cálculo em que o HFSS realizará pelo método de elementos finitos [15]. É modelada uma caixa de ar que

engloba todas as estruturas e a condição de contorno é especificada nas paredes dessa caixa. Existem três condições de contorno para a modelagem da caixa de ar:

- *Radiation Boundary* – É utilizada para modelar problemas em que as ondas radiam até regiões de campo distante. As ondas eletromagnéticas são absorvidas nas paredes da caixa que possuem essa condição de contorno. A caixa de ar deve ser posicionada a um quarto do comprimento de onda de qualquer estrutura.
- PML – Possui função semelhante à *Radiation*. A diferença consiste na efetividade de absorção da PML. Devido a absorver totalmente as ondas eletromagnéticas, a caixa de ar é posicionada mais próxima às estruturas, reduzindo o volume de cálculo. A caixa de ar deve ser posicionada a um oitavo do comprimento de onda de qualquer estrutura.
- FE-BI – Utiliza regiões híbridas, aliando o método de elementos finitos a outro método numérico chamado de método dos momentos (MoM) ou IE. O método dos momentos utiliza *solver* de equações integrais e calcula correntes nas superfícies de objetos metálicos. As estruturas calculadas a partir de IE dispensam a necessidade de caixa de ar ao redor, pois o cálculo é realizado apenas na superfície. A utilização da região híbrida FE-BI possibilita a solução FEM em volume e IE em regiões de espaço livre. A região de cálculo pode ser reduzida consideravelmente, pois a caixa de ar pode englobar apenas parte do modelo.

Após a definição de todas as estruturas e caixa de ar, seus respectivos materiais e condições de contorno, a fonte de excitação é definida. O HFSS utiliza dois métodos de solução das excitações, *driven modal*, no qual a excitação é modelada pelos modos de propagação, e *driven terminal*, em que a excitação é modelada em termos de tensão e corrente. A porta de excitação é modelada por um plano e possui diversas opções para gerar o campo eletromagnético. Entre as mais utilizadas estão a porta *lumped* e porta *wave*. A porta *lumped* representa uma superfície interna na qual o sinal entra e sai do dispositivo. A porta *wave* é representada por um guia de onda infinito com seção transversal semelhante ao do plano que modela a porta.

Com todos os parâmetros definidos é possível modificar a configuração de solução do HFSS. A configuração inclui a definição da frequência de operação do modelo e permite a adição de uma varredura em frequência ao longo de uma faixa determinada pelo usuário.

O HFSS permite a análise do modelo após os parâmetros descritos acima serem configurados. Existem duas funcionalidades que não são necessárias, mas que podem influenciar significativamente na obtenção de um modelo eletromagnético confiável. A primeira delas é a operação de malhas, que possibilita a manipulação da malha de elementos finitos. Cada estrutura pode ser manipulada separadamente, delimitando o tamanho máximo de cada elemento, o número máximo de elementos em cada geometria, entre outros. A segunda funcionalidade é a parametrização. Todos os parâmetros que são definidos numericamente podem ser substituídos por variáveis. Essa função é capaz de parametrizar as variáveis definidas ao longo de intervalos definidos pelo usuário.

Para modelos que requerem alto poder computacional, o programa HFSS oferece a função HPC (*High Performance Computer*). Essa tecnologia traz robustez ao possibilitar a resolução de problemas mais complexos e com maior custo computacional. A funcionalidade HPC possibilita ao usuário utilizar recursos computacionais de outros computadores para a realização dos cálculos numéricos. De forma automática, o ANSYS HFSS se comunica com a máquina designada para realizar a simulação numérica, recebendo de volta os resultados através da rede [15].

3.4 MODELO DE SIMULAÇÃO NUMÉRICA

Como exposto anteriormente, a câmara reverberante de modos misturados é composta por paredes de alta condutividade, antena transmissora e misturador metálico. A obtenção de um modelo numérico de câmaras reverberantes envolve o desenvolvimento dessas estruturas no programa de modelagem HFSS.

Para a criação de um bom modelo, as antenas e a câmara reverberante foram desenvolvidos separadamente. Três modelos de antenas transmissoras com frequências de operação diferentes foram obtidos. Associados à frequência de operação de cada antena, três câmaras reverberantes foram modeladas no programa HFSS, com LUF de 150 MHz, 200 MHz e 300 MHz.

3.4.1 Antenas

Para gerar campos eletromagnéticos no interior de câmaras reverberantes é necessária a modelagem de antenas transmissoras eficientes. Parâmetros de antenas como parâmetro S e ganho devem ser levados em consideração para garantir que a antena irradie campo eletromagnético na direção desejada sem grandes perdas. Devido à extensa largura de banda de uma câmara reverberante de modos misturados, mais de uma antena para propagação do campo foi modelada. Nesse trabalho foram modeladas antenas log periódicas com frequência de operação entre 100 MHz-1 GHz. Todas as antenas foram excitadas com 20 W.

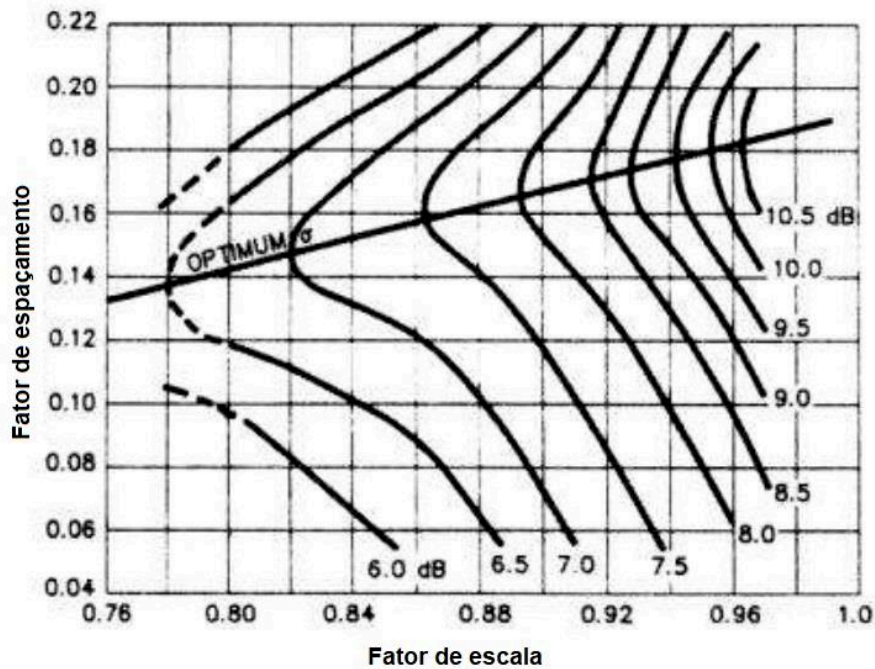
3.4.1.1 Antena log periódica

A antena log periódica é conhecida pela extensa largura de banda e ganho relativamente alto. Essa antena possui diversas configurações, a mais utilizada é a LPDA (*Log Periodic Dipole Array*). É constituída por dipolos de meia onda de diferentes tamanhos alimentados alternadamente. O comprimento dos dipolos e a distância entre eles decrescem gradualmente por funções logarítmicas, sendo essa a razão de seu nome.

A dimensão longitudinal do maior dipolo corresponde a meio comprimento de onda da menor frequência de operação da antena. Da mesma forma, a dimensão do menor dipolo corresponde a meio comprimento de onda da maior frequência de operação da antena [16]. Cada conjunto de dipolo age como elemento ativo e ressona em uma frequência dentro da faixa de operação da antena. A distância entre os dipolos é uma função logarítmica representada pelo fator de espaçamento σ e o comprimento de dois dipolos consecutivos é uma função logarítmica representada pelo fator de escala τ [16].

Conforme exposto anteriormente, a primeira antena log periódica modelada opera entre 100 MHz e 1 GHz. O comprimento do maior dipolo L_1 corresponde à metade do comprimento de onda na menor frequência. Da mesma forma, o menor dipolo L_n à metade do comprimento de onda na maior frequência. Os valores de σ e τ são estabelecidos pelo gráfico de Carrels, representado pela Figura 9.

Figura 9 - Gráfico de Carrels



Fonte: [17]

O número de dipolos N presentes em uma antena LPDA é avaliado pela equação 29.

$$N = 1 + \left(\frac{\log B_s}{\log \frac{1}{\tau}} \right) \quad (29)$$

O termo B_s presente na equação 29 é calculado pela equação 30.

$$B_s = \left(\frac{f_{superior}}{f_{inferior}} \right) \cdot \left[1,1 + 7,7(1 - \tau^2) \left(\frac{4\sigma}{1 - \tau} \right) \right] \quad (30)$$

Onde:

$f_{superior}$ - maior frequência de operação, em Hz;

$f_{inferior}$ - menor frequência de operação, em Hz.

Utilizando a Figura 9, os fatores foram definidos como $\sigma = 0,15$ e $\tau = 0,82$. O comprimento L_n de dipolos consecutivos pode ser determinado pela equação 31. O cálculo do

espaçamento S_n entre o maior dipolo e seu consecutivo é definido pela equação 32, sendo a relação entre espaçamentos S_n e S_{n+1} dada pela equação 33.

$$L_{n+1} = \tau \cdot L_n \quad (31)$$

$$S_1 - S_2 = \left(\frac{L_1 - L_2}{2} \right) \cdot \left(\frac{4\sigma}{1 - \tau} \right) \quad (32)$$

$$S_{n+1} = \tau \cdot S_n \quad (33)$$

Para a modelagem de uma antena LPDA, o conjunto de equações descrito acima foi inserido no Python para dimensionar os comprimentos e as distâncias entre os dipolos. Para obter a antena com as melhores características no HFSS, os valores L de comprimento de cada dipolo e S de espaçamento entre dipolos consecutivos foram variados em 20%. As tabelas 2 e 3 mostram a comparação entre as dimensões teóricas calculadas e as dimensões utilizadas na modelagem de L e S.

Tabela 2 - Comprimentos dipolos antena LPDA

L_n	L teórico [mm]	L modelado [mm]
L1	750	615
L2	615	625
L3	504,3	504,3
L4	413,5	413,5
L5	339	339
L6	278	278
L7	228	228
L8	186,9	186,9
L9	153,3	130

Fonte: Do autor

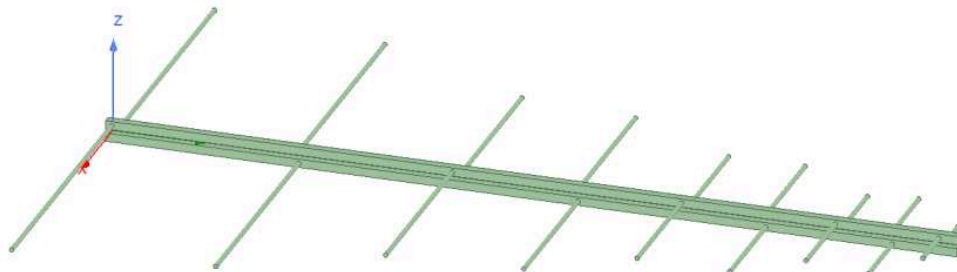
Tabela 3 - Espaçamento entre dipolos consecutivos

S_n	S teórico [mm]	S modelado [mm]
S_{1-2}	225	222
S_{2-3}	184,5	184,5
S_{3-4}	151,29	151,29
S_{4-5}	124	124
S_{5-6}	101,72	101,72
S_{6-7}	83,41	85
S_{7-8}	68,4	70
S_{8-9}	56	56

Fonte: Do autor

O modelo obtido da antena log periódica com operação entre 100 MHz e 1 GHz é representado na Figura 10. Os dipolos foram modelados como condutores perfeitos e conectados ao eixo central por onde ocorre a injeção de potência. A caixa de ar foi modelada com condições de contorno FE-BI. A excitação é modelada como uma porta *lumped* e corresponde a um plano ortogonal ao eixo de sustentação da antena. A alimentação dos dipolos ocorre de forma alternada. O modelo foi configurado para realizar uma varredura discreta em frequência ao longo de toda a faixa de operação entre 100 MHz e 1 GHz.

Figura 10 - Modelo da antena Log-Periódica



Fonte: Do autor via HFSS

Também foram modeladas antenas LPDA com menor frequência de operação 200 MHz e 300 MHz. O limite superior da frequência de operação foi mantido em 1 GHz. A antena log com frequência de operação 200 MHz - 1 GHz foi modelada utilizando as mesmas dimensões das Tabela 2 e Tabela 3, excluindo o maior dipolo L1. Neste modelo, o maior dipolo é representado por L2, que corresponde à metade do comprimento de onda para a frequência 200 MHz. Da mesma forma, a antena log modelada na faixa de frequência 300 MHz - 1 GHz utiliza as dimensões das tabelas Tabela 2 e Tabela 3. O dipolo L3 constitui o dipolo de meia onda da menor frequência de operação, 300 MHz.

3.4.2 Câmaras reverberantes

Inicialmente, foi necessário estabelecer a frequência de operação para determinar o tamanho da câmara desejada. A equação 2, que calcula o número de modos de propagação presentes em função da frequência, foi rearranjada para determinar a área mínima de uma câmara reverberante. Com a manipulação da equação 2, representada pela equação 34, foi possível calcular as dimensões mínimas de uma câmara em que ao menos 60 modos de propagação sejam excitados. A altura foi fixada em 3m, por se tratar de uma altura suficiente para comportar distintos equipamentos em teste.

$$A_{\min} = \frac{3Nc^3}{8\pi f^3 h} \quad (34)$$

Onde:

N - número mínimo de modos de propagação;

f - frequência, em Hz;

c - velocidade de propagação do meio, em m;

h - altura da câmara, em m.

A tabela 4 ilustra dimensões mínimas de câmaras reverberantes para diferentes frequências mínimas de operação. A altura h foi fixada em 3 m e o número de modos N em 60.

Tabela 4 - Área mínima de câmaras reverberantes em função da frequência

LUF [MHz]	Área mínima [m ²]
80	125
100	64,5
150	19,09
200	8,05
250	4,12
300	2,38

Fonte: Do autor

Pela Tabela 4, é notória a influência da menor frequência de operação nas dimensões de câmaras reverberantes. Para analisar as diferenças de operação, foram desenvolvidos três modelos de câmaras reverberantes de tamanhos diferentes. A Tabela 5 apresenta as dimensões de cada câmara modelada, a menor frequência de cada e o número de modos teóricos.

Tabela 5 - Dimensões dos modelos de câmaras reverberantes

Nº modelo	LUF [MHz]	Dimensões [m]		Nº modos teóricos
		(comprimento x largura x altura)		
1	150	6 x 5 x 3		87
2	200	3,4 x 3,19 x 3		74
3	300	2,65 x 2,52 x 3		160

Fonte: Do autor

As câmaras representadas na Tabela 5 foram modeladas no *software* HFSS, seguindo os passos descritos abaixo.

A modelagem da câmara iniciou-se com a obtenção das paredes da câmara. Por se tratarem de chapas metálicas, as paredes foram representadas por planos com as dimensões apresentadas na Tabela 5. Em seu interior, foram posicionados o conjunto de pás e a antena transmissora modelada anteriormente. A configuração do conjunto de pás foi obtida pela união de 4 planos de 80 cm x 75 cm com angulação de 90° entre eles. O WV foi definido de acordo

com as dimensões de cada modelo. Para reduzir a complexidade do modelo, as sondas de campo e a antena receptora não foram desenvolvidas.

As paredes e o misturador, modelados por planos bidimensionais, foram inicialmente designados com condição de contorno que representa condutores perfeitos para reduzir o modelo inicial. Posteriormente, a condição de contorno condutividade finita foi utilizada para computar as perdas existentes no interior da câmara. A condutividade finita atribui propriedades elétricas de materiais aos planos selecionados. Neste projeto, o material selecionado para modelar os planos metálicos foi alumínio.

Para delimitar o volume de cálculo das estruturas modeladas, duas abordagens foram utilizadas para obtenção da caixa de ar. Na primeira abordagem, a caixa de ar englobava todo o domínio, sendo externa à câmara reverberante. Neste método, foi utilizada a condição de contorno PML na caixa de ar para solução através do método de elementos finitos. Devido à caixa de ar englobar a câmara inteira, todo o volume é calculado. A segunda abordagem utilizou as regiões híbridas FE-BI, recurso presente no HFSS. Esta abordagem utiliza o FEM no volume em conjunto com o método IE em superfícies metálicas. Dessa forma, as paredes e o misturador não precisam estar contidos na região delimitada pela caixa de ar, o que reduz consideravelmente o volume de cálculo. Através dessa abordagem híbrida, a antena transmissora e o volume WV foram modelados com caixa de ar FE-BI e as superfícies metálicas por regiões IE, sem a presença de caixa de ar ao redor.

Devido às limitações do software HFSS que não permite movimento, a rotação do misturador foi modelada em passos discretizados. Através do recurso *parametric*, a posição angular do conjunto de pás foi parametrizada e cada posição corresponde a uma simulação. O número de parametrizações foi designado com base na Tabela 1, correspondente ao número de amostras.

O modelo foi configurado para realizar varredura em frequência de acordo com cada câmara. Em todos os modelos a varredura em frequência foi configurada em intervalos discretos, com passo de 50 MHz.

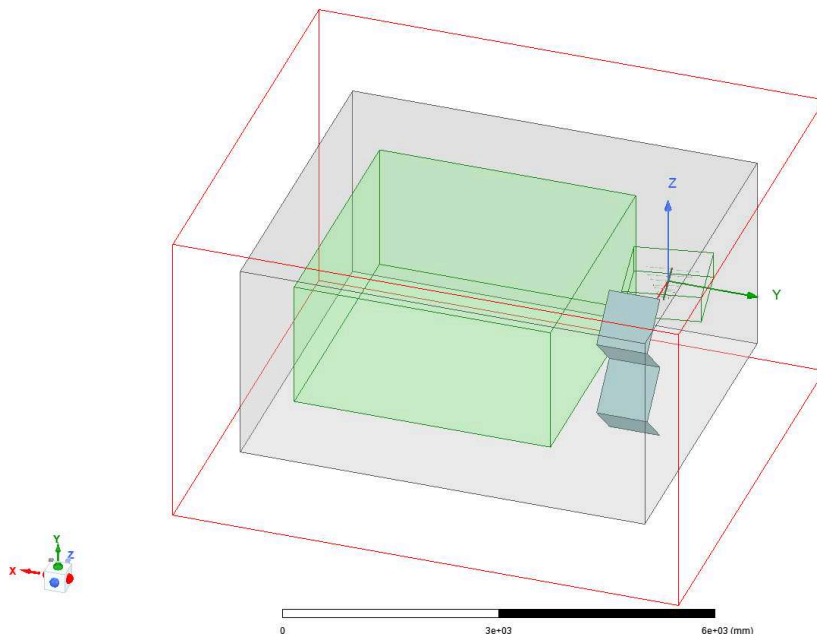
Além dos parâmetros configurados acima, foram realizadas operações em malha para a obtenção de um modelo mais preciso. Devido à natureza reflexiva da câmara, as paredes e o misturador devem conter elementos suficientes para computar corretamente os campos eletromagnéticos incidentes e refletidos. As dimensões dos elementos das paredes e do misturador foram limitadas a 200 mm.

Os modelos de câmaras reverberantes foram simulados através da função HPC do programa HFSS. O computador designado para realizar os cálculos computacionais possui as seguintes configurações: processador Intel Xeon Gold 6126, 8 *cores* e 128 *Gb* de RAM.

3.4.2.1 Modelo 1

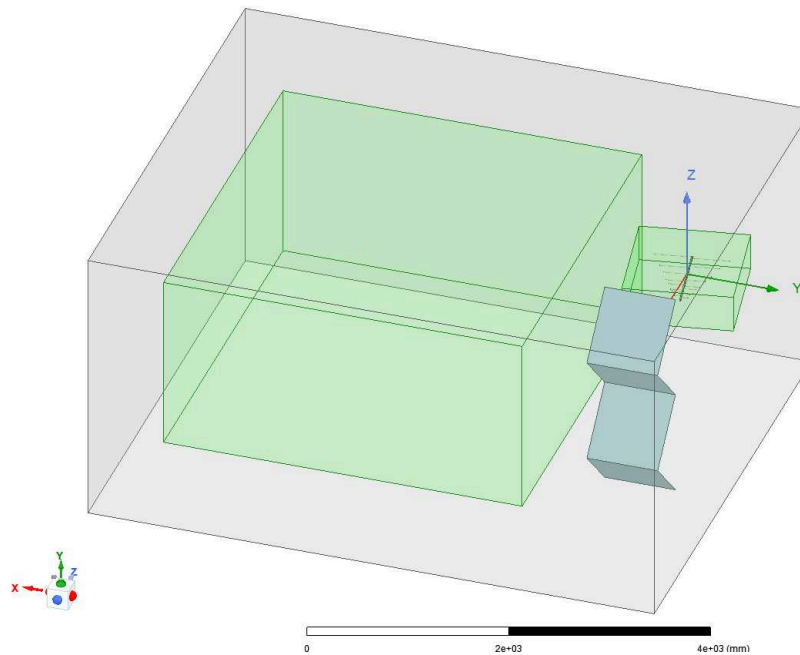
A Figura 11 e a Figura 12 representam os modelos de câmara de dimensões 6 m x 5 m x 3 m com caixas de ar PML e FE-BI, respectivamente. O WV, região em que o campo estatisticamente uniforme é obtido, é representado pela caixa verde e possui dimensões 3,8 m x 3,8 m x 1,9 m.

Figura 11 - Modelo 1 com caixa de ar PML



Fonte: Do autor via HFSS

Figura 12 - Modelo 1 com caixa de ar FE-BI



Fonte: Do autor via HFSS

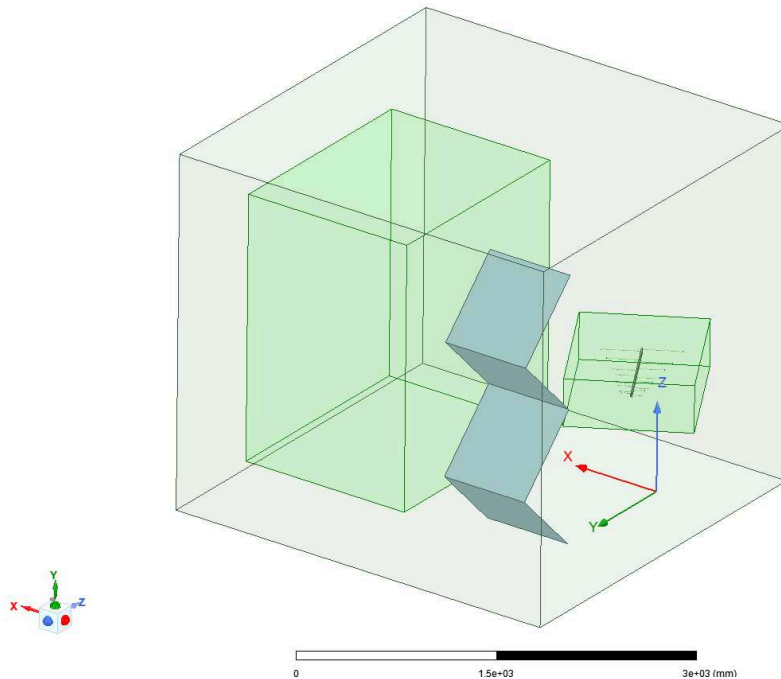
Na Figura 11 é possível notar o volume adicional da caixa de ar PML, representada em vermelho, englobando todas as estruturas. As regiões FE-BI da Figura 12 são representadas pelas caixas de ar em verde ao redor da antena transmissora e WV. As superfícies metálicas, em azul e cinza, correspondem à região IE e não contém caixa de ar.

Nesse modelo foi utilizada a antena LPDA com frequência de operação entre 100 MHz e 1 GHz. A varredura em frequências discretas foi realizada entre 150 MHz e 1 GHz, com passo de 50 MHz. Demais parâmetros foram configurados conforme exposto em 3.4.2.

3.4.2.2 Modelo 2

A câmara reverberante com frequência de operação entre 200 MHz e 1 GHz é representada pela Figura 13. Para esse modelo, foi utilizada apenas a caixa de ar FE-BI com o objetivo de reduzir o volume de cálculo. As dimensões do WV são 1,85 x 1,45 x 2,25 m.

Figura 13 - Modelo 2 de câmara reverberante



Fonte: Do autor via HFSS

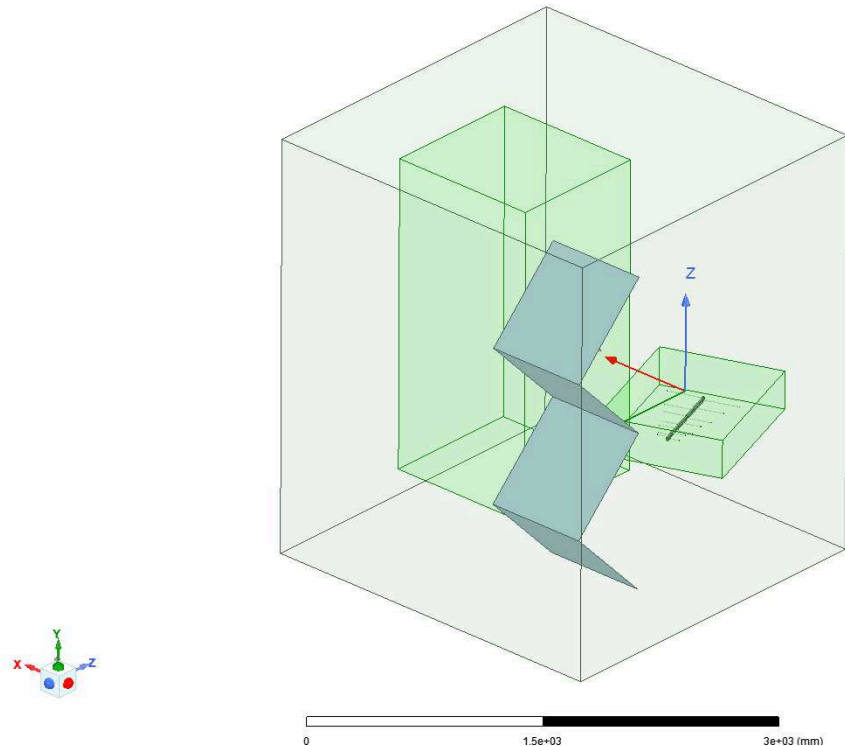
Para o modelo 2, as condições de contorno das superfícies metálicas foram configuradas como condutores de alumínio. Na Figura 13, as regiões IE correspondem às superfícies metálicas em azul e cinza e as caixas de ar FE-BI são representadas pelas caixas verdes.

A LPDA modelada em 3.4.1.1 com frequência de operação entre 200 MHz e 1 GHz foi utilizada como antena transmissora nessa câmara. O modelo foi configurado para realizar varredura em frequência entre 200 MHz e 1 GHz. Demais parâmetros foram configurados conforme exposto em 3.4.2.

3.4.2.3 Modelo 3

A câmara reverberante correspondente ao modelo 3 está ilustrada na Figura 14. Assim como no modelo 2, apenas o método da caixa de ar FE-BI foi utilizado. O WV possui dimensões 1,1 x 1 x 2,25 m.

Figura 14 - Modelo 3 de câmara reverberante



Fonte: Do autor via HFSS

Como relatado nos modelos anteriores, as caixas de ar FE-BI estão representadas na Figura 14 pelas caixas verdes e as regiões IE pelos planos de cores azul e cinza. As superfícies metálicas foram modeladas por condutores perfeitos e, posteriormente, por condutividade finita semelhante ao alumínio.

A antena transmissora LPDA desenvolvida em 3.4.1.1 para frequência de operação 300 MHz e 1 GHz foi utilizada no modelo 3. O modelo foi configurado para realizar varredura em frequência ao longo da faixa de operação da câmara, entre 300 MHz e 900 MHz, conforme Tabela 1. Nesse modelo o tamanho máximo dos elementos da malha foi aumentado de 200 mm para 400 mm para reduzir o volume de elementos e o tempo de simulação. Demais parâmetros foram modelados conforme exposto em 3.4.2.

3.5 CONCLUSÕES

Neste capítulo foi apresentado o módulo HFSS do programa *Ansys Electronics Desktop*, utilizado na modelagem de câmaras reverberantes. As funcionalidades do programa

foram expostas e o processo de obtenção de um modelo base no HFSS foi descrito. Também foram apresentados os modelos de antenas e câmaras reverberantes desenvolvidos no HFSS.

No próximo capítulo serão apresentados os resultados obtidos dos modelos apresentados. Também será realizada a análise do campo eletromagnético no interior dos modelos de câmara reverberante desenvolvidos.

4 RESULTADOS

4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados dos modelos de antenas e câmaras reverberantes desenvolvidos no capítulo 3. Os parâmetros de antena das antenas LPDA serão expostos e verificados. A distribuição de campo eletromagnético no interior dos modelos de câmara simulados será apresentada e analisada em relação à frequência. Também será realizada a verificação da uniformidade de campo do modelo 3 através dos procedimentos descritos no capítulo anterior. Os resultados da verificação serão comparados aos limites estabelecidos pela IEC 61000-4-21.

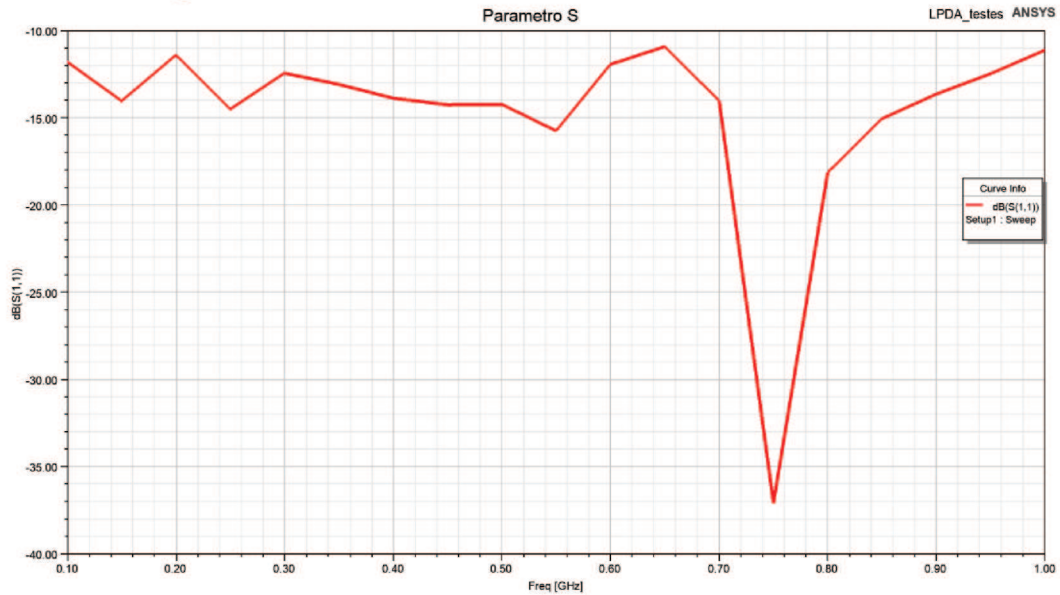
4.2 MODELOS DE ANTENAS

Os resultados dos modelos de antenas desenvolvidos no capítulo 3 serão apresentadas a seguir. Três modelos de antena LPDA foram criados com menor frequência de operação 100 MHz, 200 MHz e 300 MHz. O limite superior da frequência de operação é mantido em 1 GHz. Os três modelos de log periódica foram simulados com sucesso e os principais parâmetros de antena foram apresentados.

4.2.1 LPDA 100 MHz – 1 GHz

Nas figuras a seguir, Figura 15, Figura 16 e Figura 17 são apresentados os parâmetros S11, VSWR e ganho polar da antena LPDA com frequência de operação entre 100 MHz e 1 GHz.

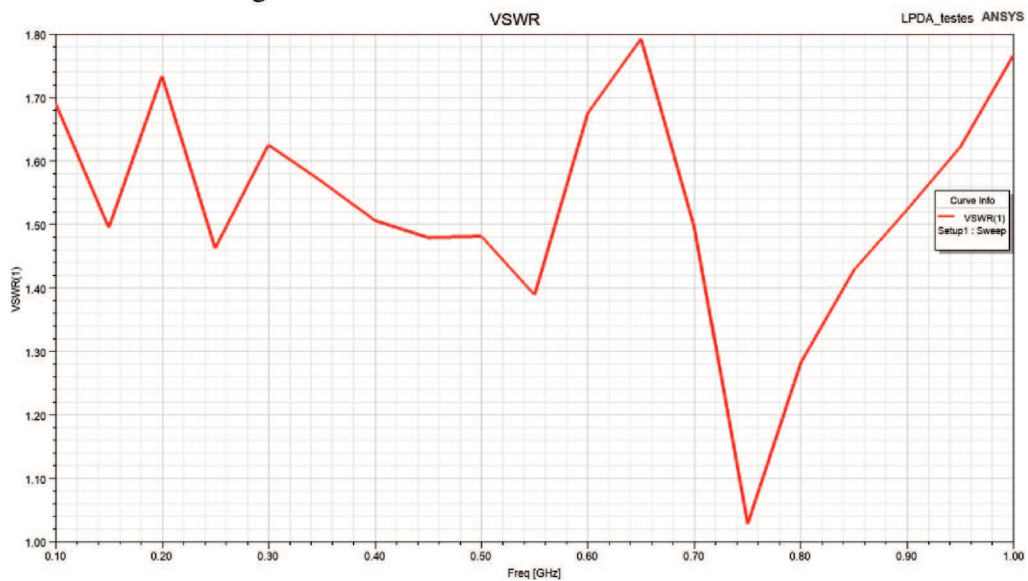
Figura 15 - Parâmetro S11 antena LPDA 100 MHz – 1 GHz



Fonte: Do autor via HFSS

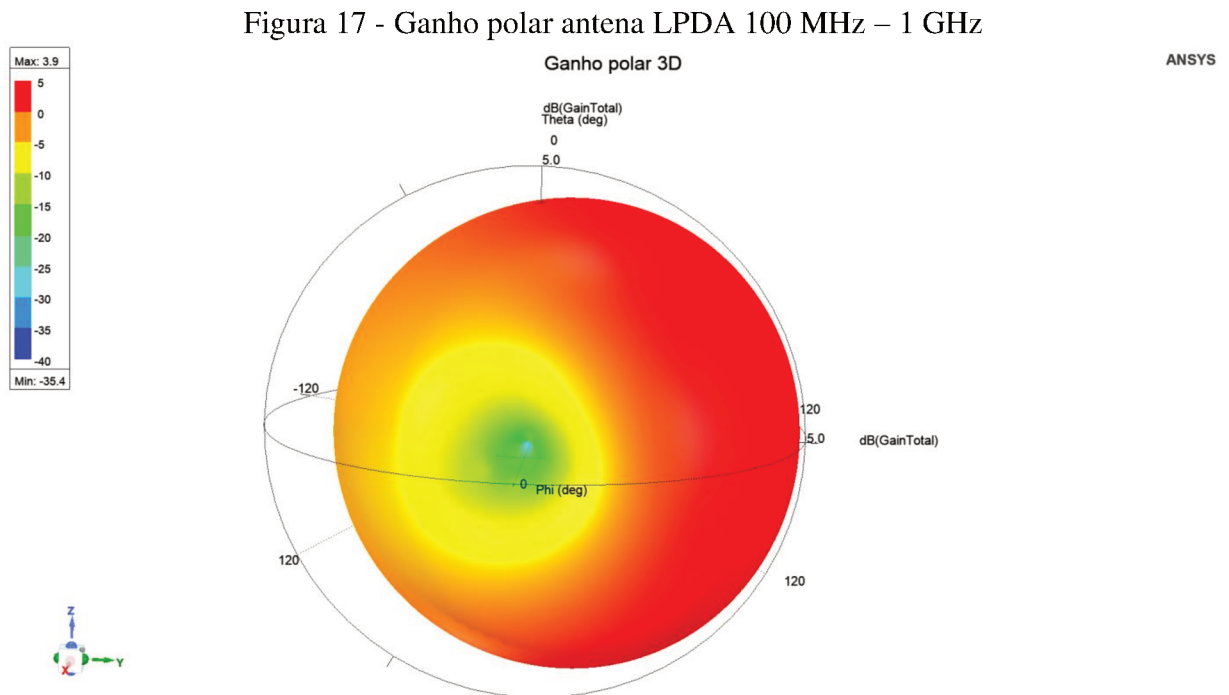
A antena LPDA 100 MHz – 1 GHz modelada possui parâmetro S11 menor que -10 dB ao longo de toda a faixa de frequência. O parâmetro S11 representa a quantidade de potência refletida na antena. Parâmetro S11 abaixo do patamar de -10 dB é satisfatório e indica que a maior parte da potência injetada na antena transmissora está sendo radiada. O valor mínimo do parâmetro S11 entre 700 MHz e 800 MHz indica a faixa de frequência em que a antena radia melhor.

Figura 16 - VSWR LPDA 100 MHz – 1 GHz



Fonte: Do autor via HFSS

O VSWR, calculado a partir do parâmetro S, descreve a potência refletida e indica se há casamento de impedância na porta da antena LPDA. De modo geral, VSWR abaixo de 2 indica que a impedância da antena está casada e pouca potência é refletida. Para esse modelo de antena LPDA, o VSWR possui valor máximo de 1,8, o que significa que a potência refletida na porta da antena é baixa e a porta está casada com a antena.



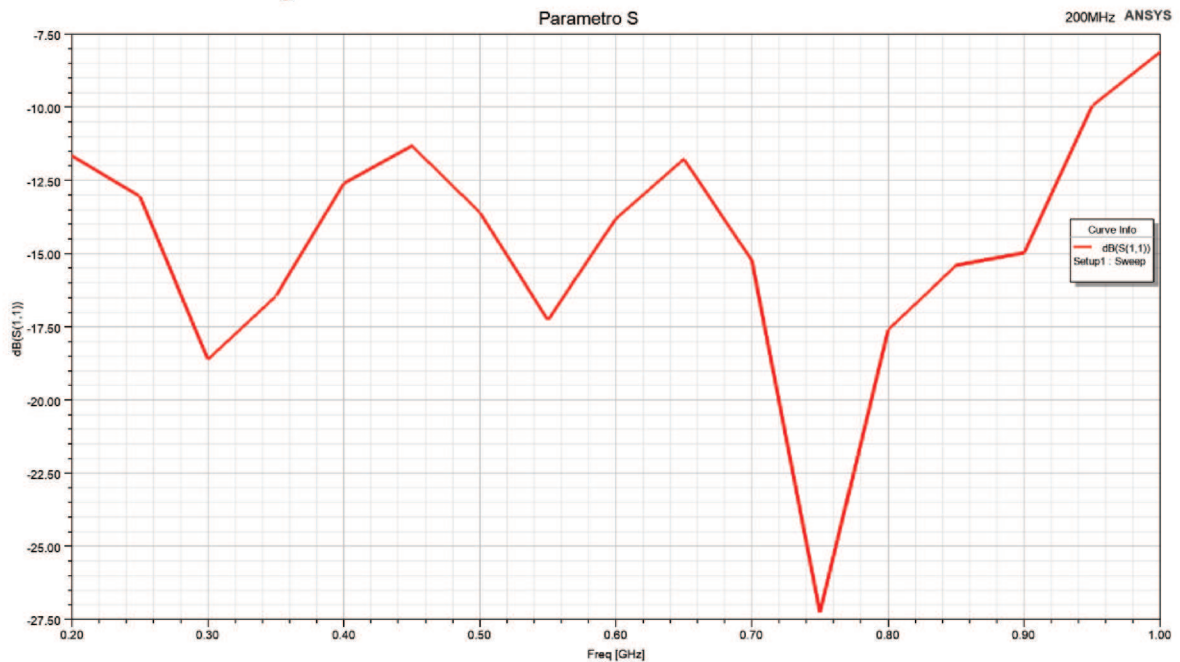
Fonte: Do autor via HFSS

A antena LPDA 100 MHz – 1 GHz possui ganho máximo de 3,9 dB. O ganho descreve a quantidade de potência transmitida na direção de máximo em comparação a uma antena isotrópica, que possui ganho igual para todas as direções.

4.2.2 LPDA 200 MHz – 1 GHz

Na Figura 18, Figura 19 e Figura 20 são apresentados os parâmetros S11, VSWR e ganho polar da antena LPDA com frequência de operação 200 MHz e 1 GHz.

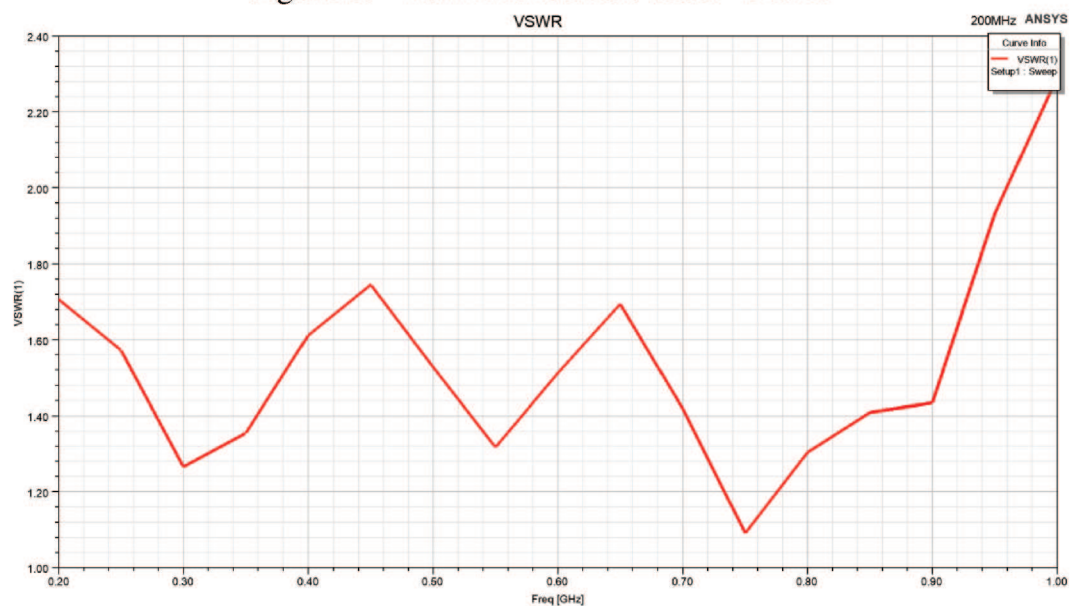
Figura 18 - Parâmetro S11 LPDA 200 MHz - 1 GHz



Fonte: Do autor via HFSS

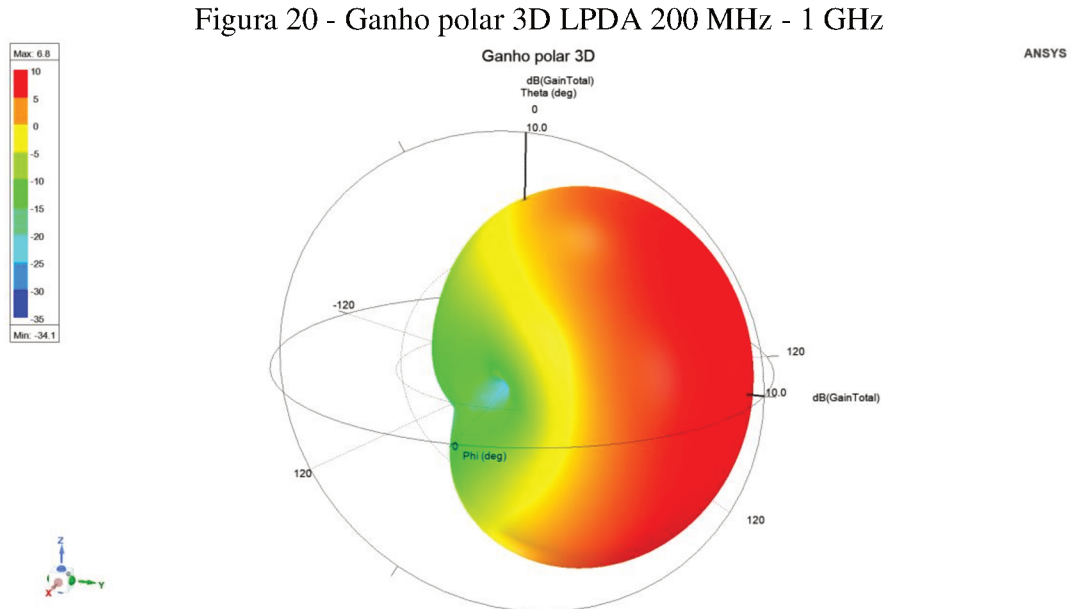
A antena LPDA 200 MHz – 1 GHz modelada possui parâmetro S11 satisfatório até a frequência de 950 MHz. Após 950 MHz, o parâmetro S11 ultrapassa o valor recomendado de -10 dB, o que indica que há mais perdas por reflexão em comparação à antena LPDA 100 MHz – 1 GHz. O parâmetro S11 mínimo entre 700 MHz e 800 MHz indica a faixa de frequência em que a antena radia melhor.

Figura 19 - VSWR LPDA 200 MHz - 1 GHz



Fonte: Do autor via HFSS

O VSWR da antena LPDA 200 MHz – 1 GHz também indica maiores perdas para frequências acima de 950 MHz. O valor acima de 2 indica que o casamento de impedância entre a porta e a antena sofre desbalanceamento. O valor máximo do VSWR de 2,4 indica que 18% da potência injetada está sendo refletida.



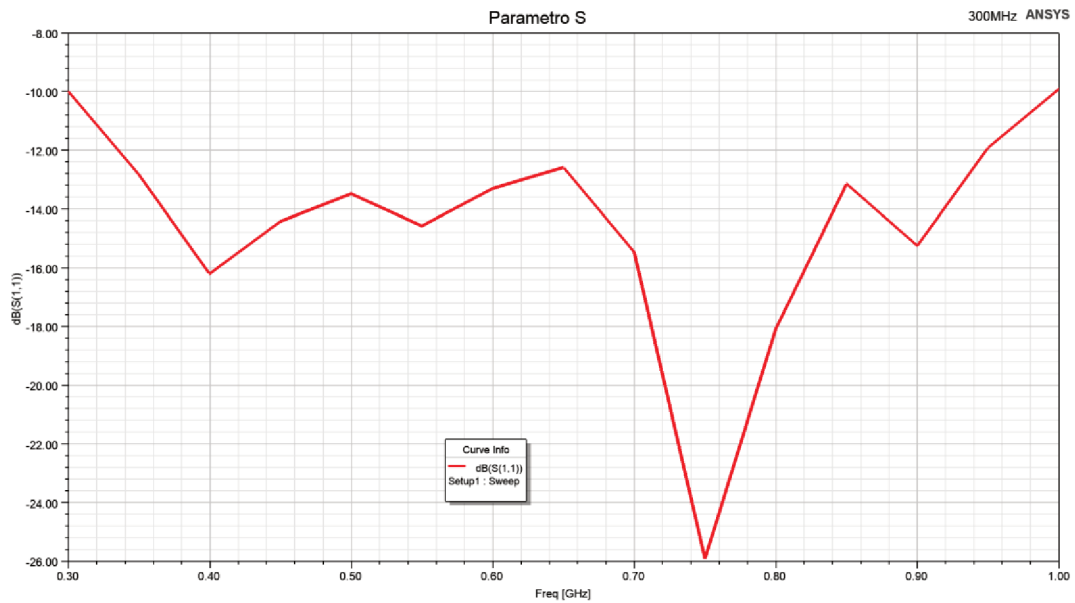
Fonte: Do autor via HFSS

Para essa configuração de LPDA o ganho possui valor máximo de 6,8. Com o aumento do ganho a antena se torna mais diretiva, isto é, mais potência está concentrada na direção de máxima radiação. Devido à natureza reflexiva de câmaras reverberantes, a diferença do ganho não será de grande influência.

4.2.3 LPDA 300 MHz – 1 GHz

Na Figura 21, Figura 22 e Figura 23 são apresentados os parâmetros S11, VSWR e ganho polar da antena LPDA com frequência de operação 300 MHz e 1 GHz.

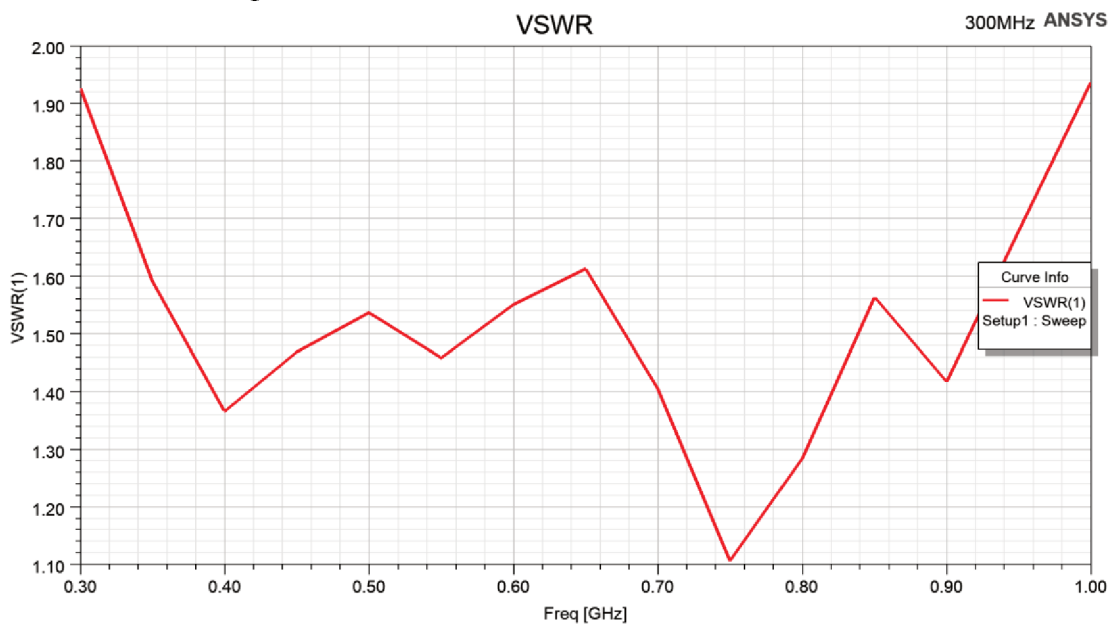
Figura 21 - Parâmetro S11 LPDA 300 MHz - 1 GHz



Fonte: Do autor via HFSS

Assim como a antena LPDA 100 MHz – 1 GHz, a antena LPDA 300 MHz – 1 GHz possui parâmetro S11 satisfatório. Ao longo de toda a faixa de frequência é verificado que S11 se mantém abaixo de -10 dB. Assim como ocorre nos modelos de antenas LPDA apresentados anteriormente, a faixa entre 700 MHz e 800 MHz é o intervalo em que a antena radia melhor.

Figura 22 - VSWR antena LPDA 300 MHz - 1 GHz

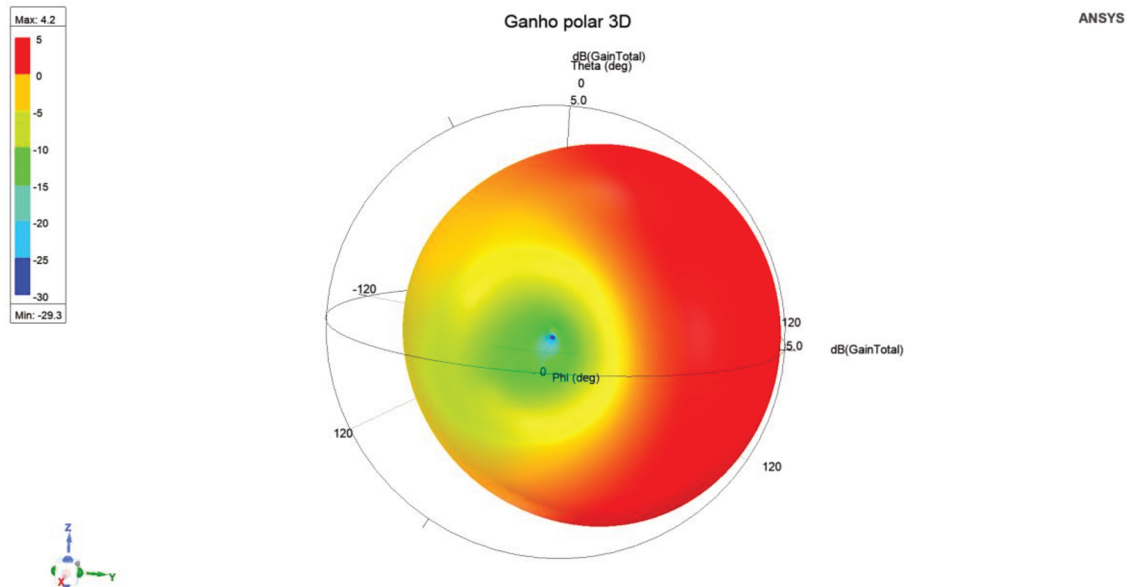


Fonte: Do autor via HFSS

Para a LPDA 300 MHz – 1 GHz, o VSWR está abaixo do valor recomendado. O aumento do VSWR em frequências próximas aos limites de operação da antena indica que há

maior descasamento de impedância nesses intervalos. Como resultado, a antena LPDA 300 MHz – 1 GHz possui mais perdas por reflexão e menor eficiência de transmissão em frequências próximas a 300 MHz e a 1 GHz.

Figura 23 - Ganho polar 3D antena LPDA 300 MHz - 1 GHz



Fonte: Do autor via HFSS

O ganho máximo para a antena LPDA 300 MHz – 1 GHz é de 4,2 dB.

4.3 MODELOS DE CÂMARAS REVERBERANTES

Os resultados dos modelos de câmaras reverberantes de modos misturados desenvolvidos no capítulo 3 serão apresentados a seguir. Três modelos de câmaras com diferentes frequências iniciais de operação foram apresentados. Um dos modelos desenvolvido não apresentou resultados devido à limitações computacionais. Os resultados dos outros dois modelos serão expostos, apresentando a malha de elementos e a distribuição do campo elétrico. Para o modelo 3 foi realizado o procedimento de calibração com a câmara vazia, descrito em 2.4.4.

4.3.1 Modelo 1

Para esse modelo de câmara reverberante não foi possível obter resultados numéricos. A simulação do modelo 1 com caixa de ar PML não foi concluída devido à falta de memória

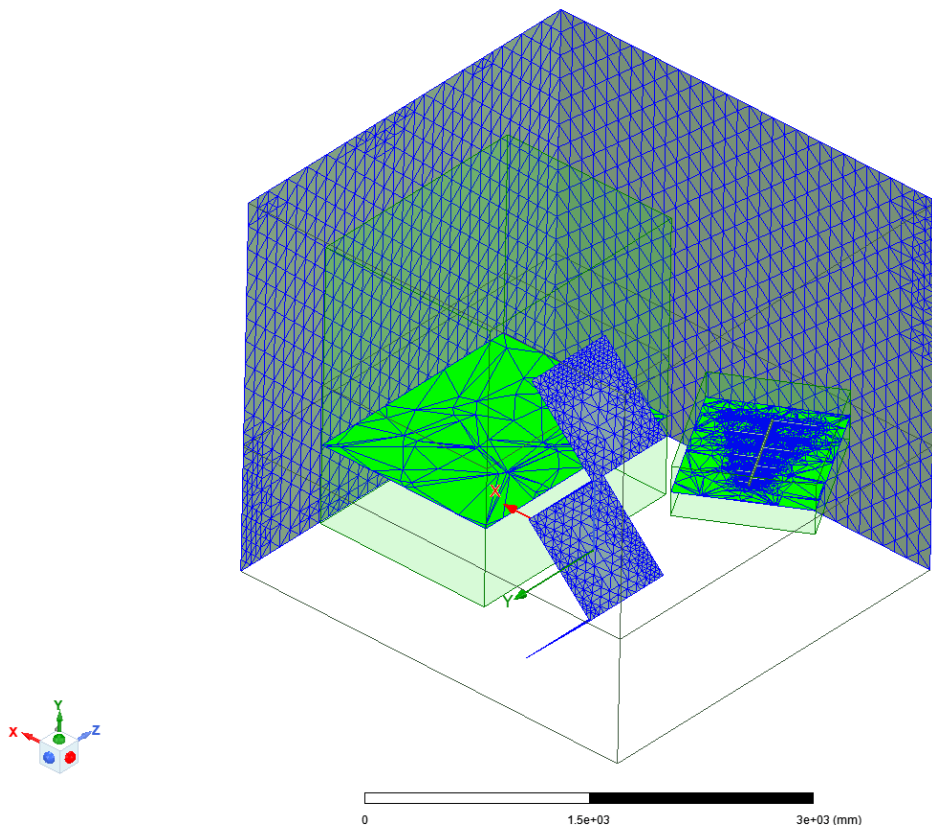
RAM para o *solver*. A simulação do modelo 1 com regiões híbridas não foi capaz de convergir após 200 iterações, o que indica problema no modelo desenvolvido.

Devido às dimensões da câmara, com volume de 90 m³, não foi possível realizar a simulação desse modelo. É necessário que capacidade computacional seja adicionada à máquina de cálculo ou que o modelo seja reduzido para realizar simulações com a capacidade disponível.

4.3.2 Modelo 2

Na Figura 24 e Figura 25 são apresentadas a malha de elementos do modelo 2 de câmara reverberante.

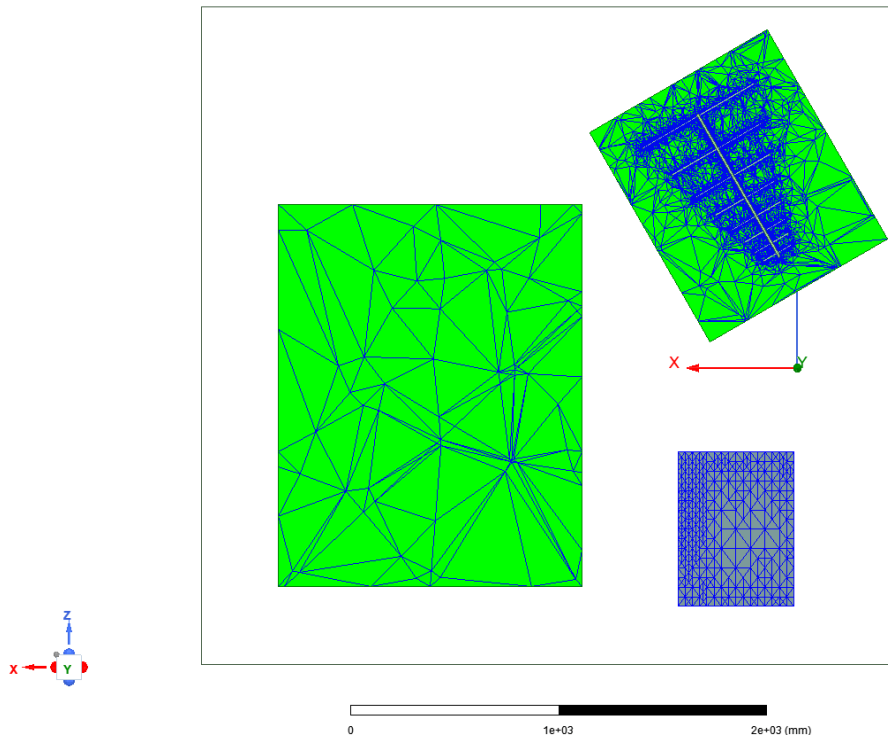
Figura 24 - Malha de elementos câmara modelo 2



Fonte: Do autor via HFSS

A malha de elementos da câmara modelo 2 é apresentada na Figura 24. O número total de elementos é de 92757, sendo 9316 elementos nos planos que modelam as paredes e o misturador.

Figura 25 - Malha de elementos plano horizontal

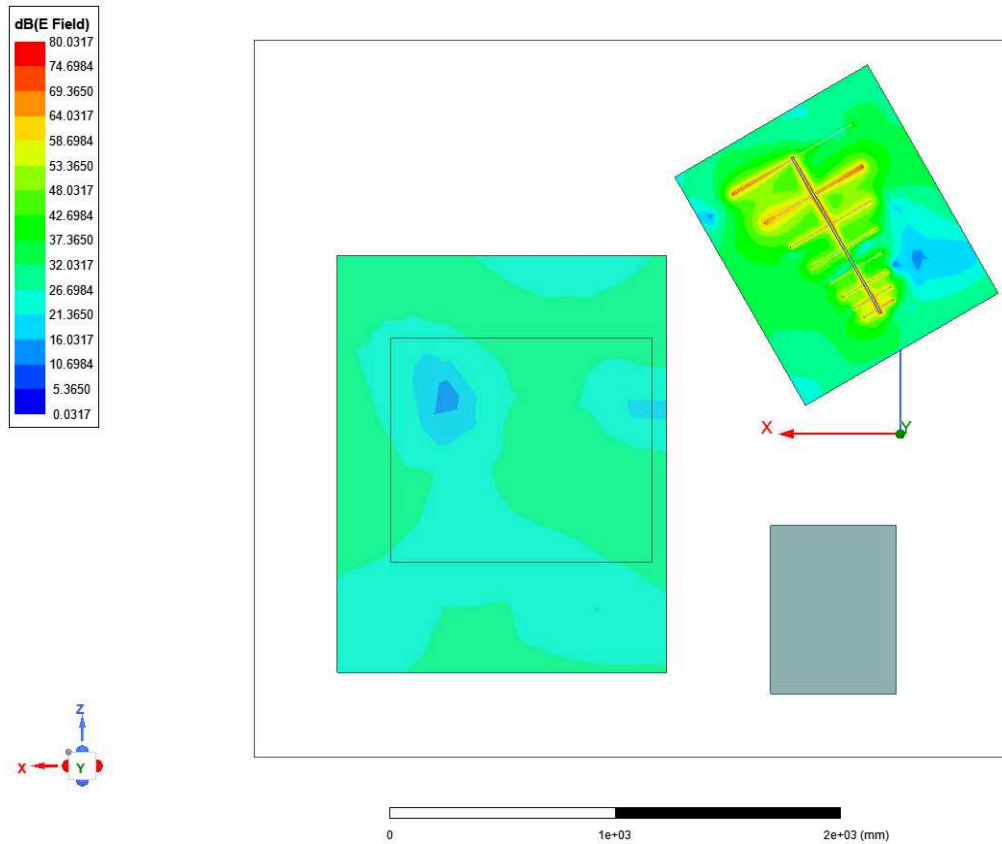


Fonte: Do autor via HFSS

A Figura 25 ilustra a malha de elementos no WV, na caixa de ar da antena transmissora e no misturador, vista a partir de um corte horizontal na câmara. O WV e da caixa de ar da antena correspondem a 83441 elementos.

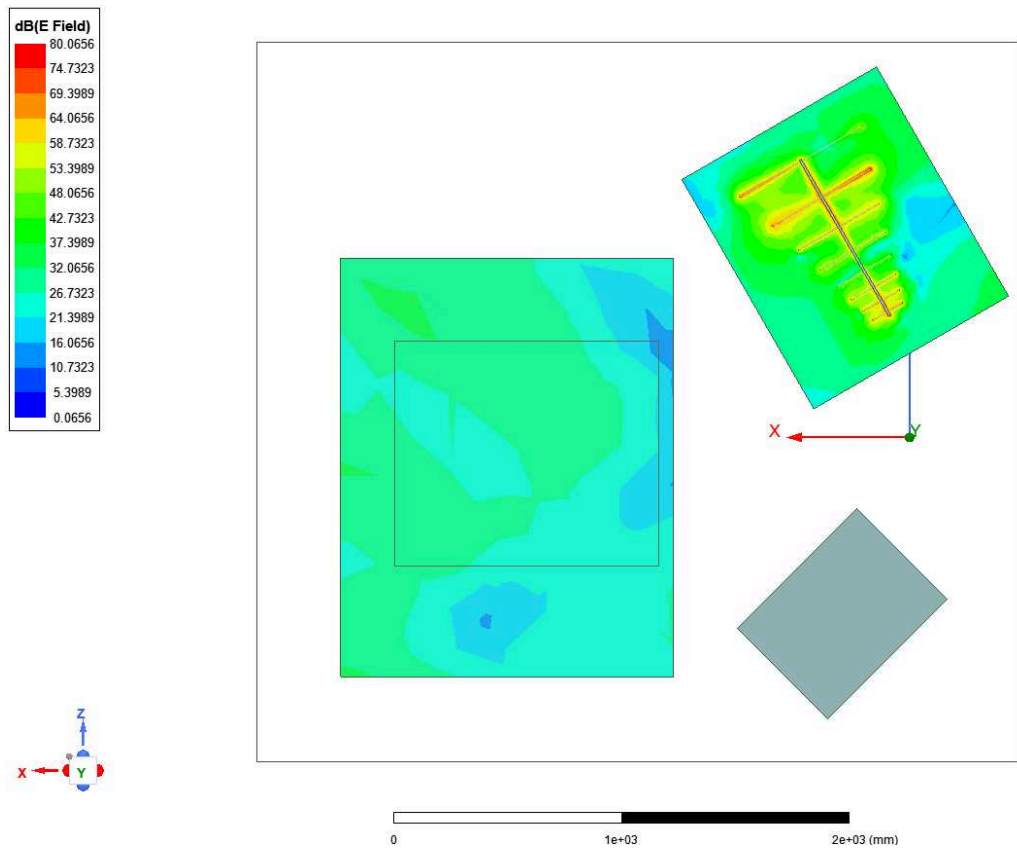
Na Figura 26, na Figura 27 e na Figura 28 são apresentadas as distribuições de campo elétrico no interior da câmara para três posições do misturador em 200 MHz. A distribuição do campo é representada por meio de um plano horizontal no interior da câmara visto de cima. Devido às regiões híbridas, a visualização do campo elétrico é possível apenas nos volumes contidos pelas caixas de ar FE-BI.

Figura 26 - Distribuição campo elétrico nas caixas de ar posição 1



A Figura 26 mostra a distribuição do campo elétrico no interior das caixas de ar vista a partir de um plano horizontal paralelo ao chão da câmara. A posição 1 do misturador corresponde ao ângulo de 0° e é utilizado como referência para as posições seguintes. O campo no interior do WV varia de intensidade aproximadamente entre 30 dB e 10 dB.

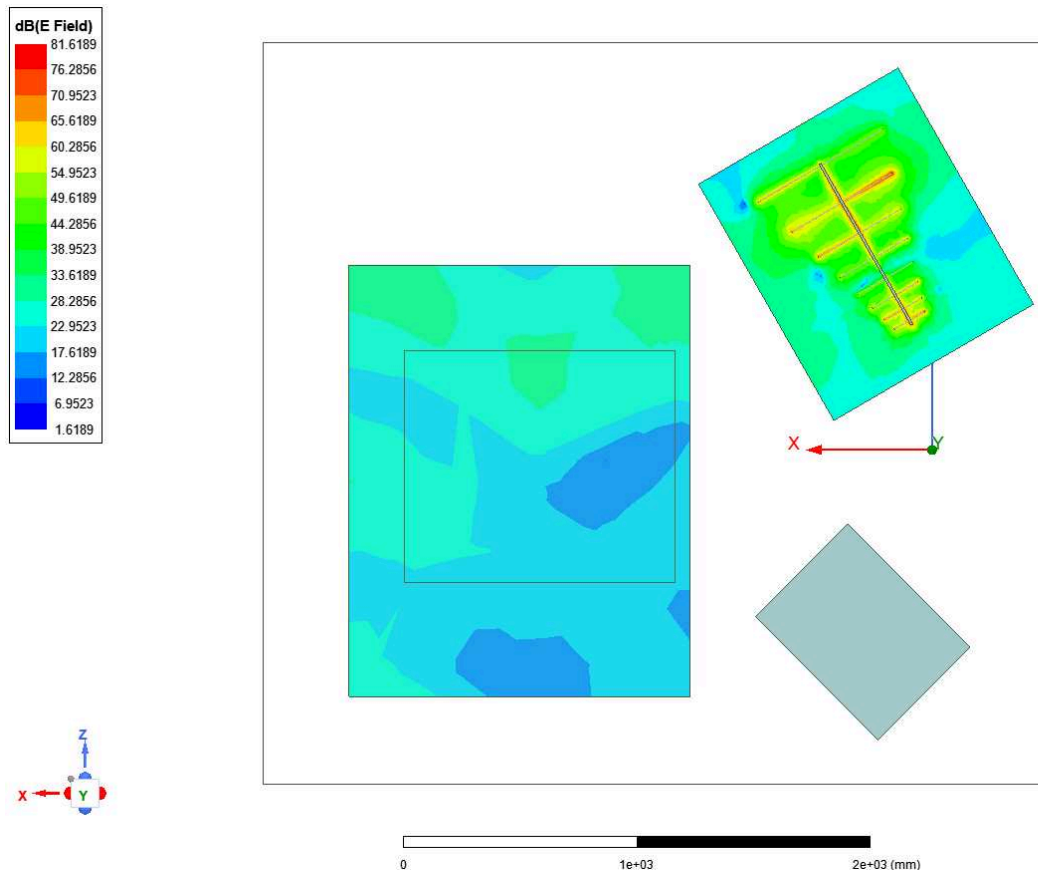
Figura 27 - Distribuição campo elétrico nas caixas de ar posição 2



Fonte: Do autor via HFSS

A Figura 27 ilustra a distribuição do campo elétrico no interior das caixas de ar vista a partir de um plano horizontal. A posição 2 do misturador corresponde a 45° de rotação em relação à posição 1. O campo elétrico no interior do WV varia aproximadamente entre 30 dB e 10 dB de intensidade. A rotação do misturador não afetou a intensidade de campo, apenas alterou a distribuição do campo no interior da câmara.

Figura 28 - Distribuição campo elétrico nas caixas de ar posição 3

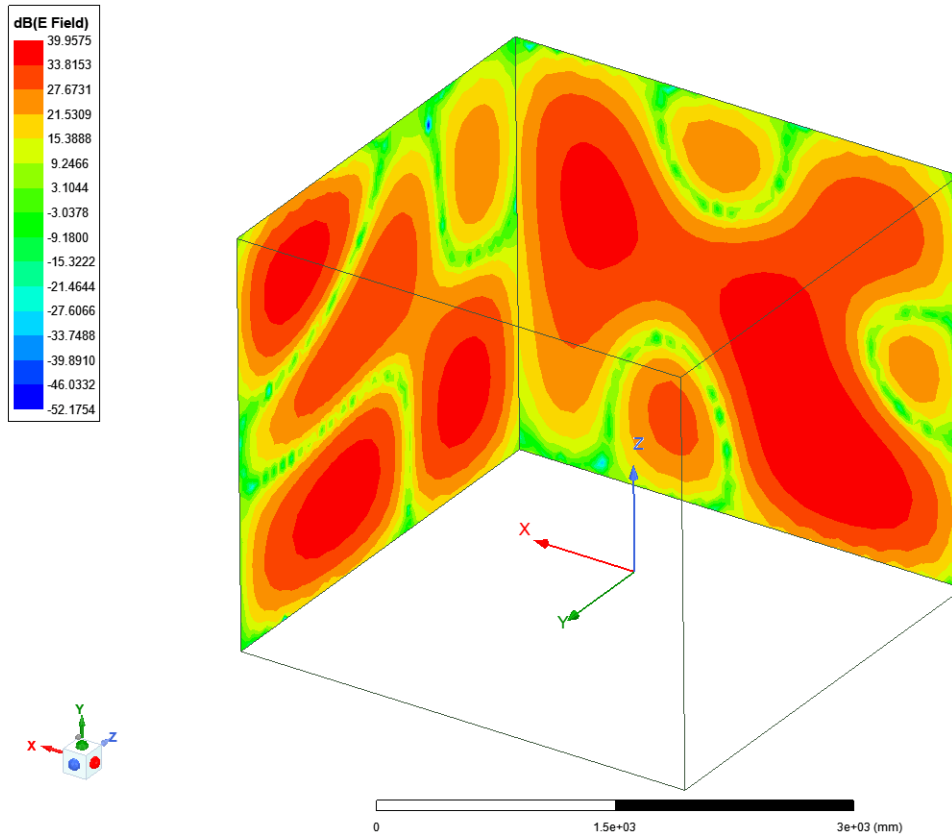


Fonte: Do autor via HFSS

A Figura 28 ilustra a distribuição do campo elétrico no interior das caixas de ar vista a partir de um plano horizontal. A posição 3 corresponde a -45° em relação à posição 1. Como ocorre nas posições anteriores, o campo elétrico varia entre 30 dB e 10 dB de intensidade no interior do WV. A rotação do misturador modifica a distribuição do campo, alterando as posições de máximos e mínimos das ondas eletromagnéticas.

A Figura 29, a Figura 30 e a Figura 31 ilustram a distribuição do campo elétrico nas paredes da câmara nas frequências 200 MHz, 400 MHz e 600 MHz.

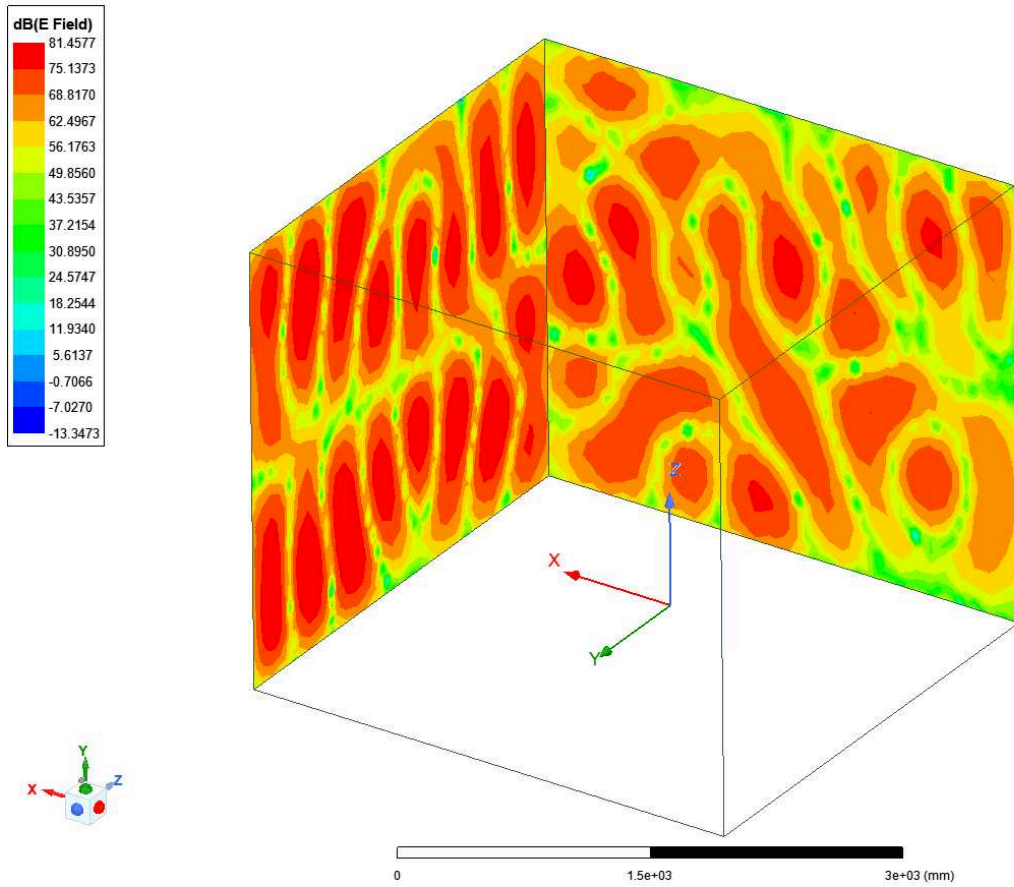
Figura 29 - Distribuição do campo elétrico nas paredes em 200 MHz



Fonte: Do autor via HFSS

A Figura 29 ilustra a distribuição de campos elétricos nas paredes metálicas da câmara reverberante. É notável as regiões de máximos e mínimos, representadas em vermelho e verde, respectivamente. A intensidade de campo elétrico varia entre 39 dB e -3 dB.

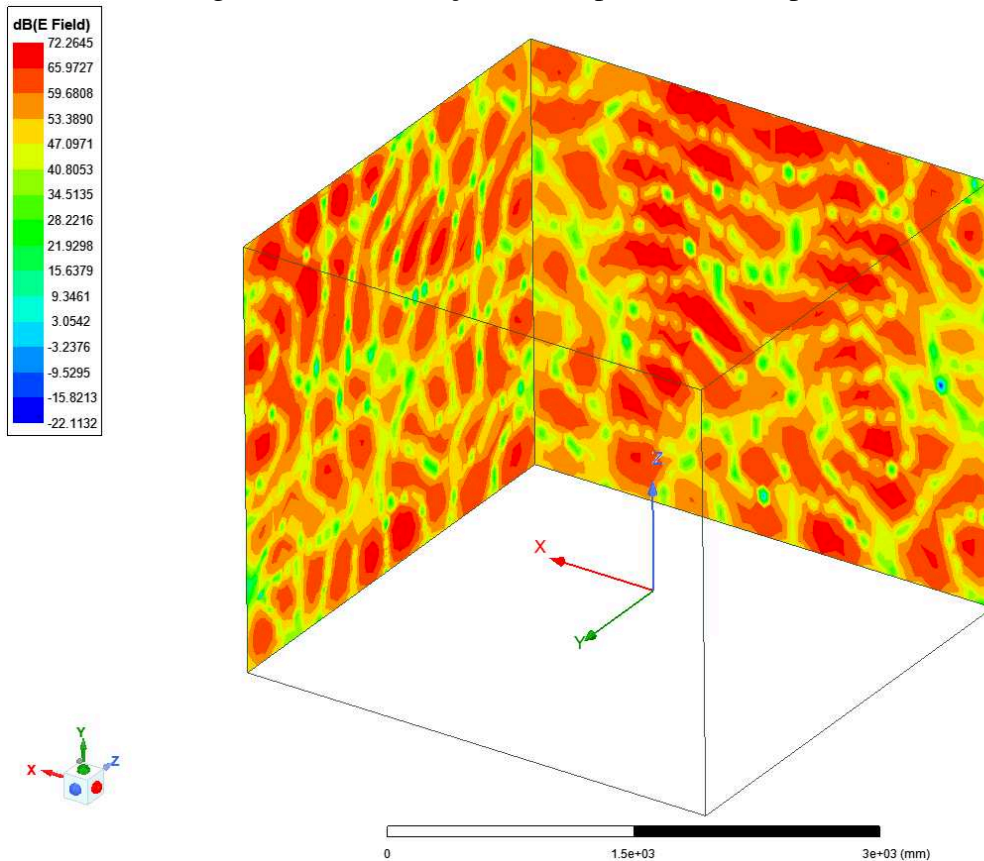
Figura 30 - Distribuição do campo elétrico nas paredes em 400 MHz



Fonte: Do autor via HFSS

A Figura 30 representa a distribuição de campo elétrico nas paredes metálicas do modelo 2 de câmara reverberante em 400 MHz. Comparado à distribuição de campos em 200 MHz, mais modos estão presentes. A intensidade do campo elétrico varia entre 81 dB e 30 dB.

Figura 31 - Distribuição do campo elétrico nas paredes em 600 MHz



Fonte: Do autor via HFSS

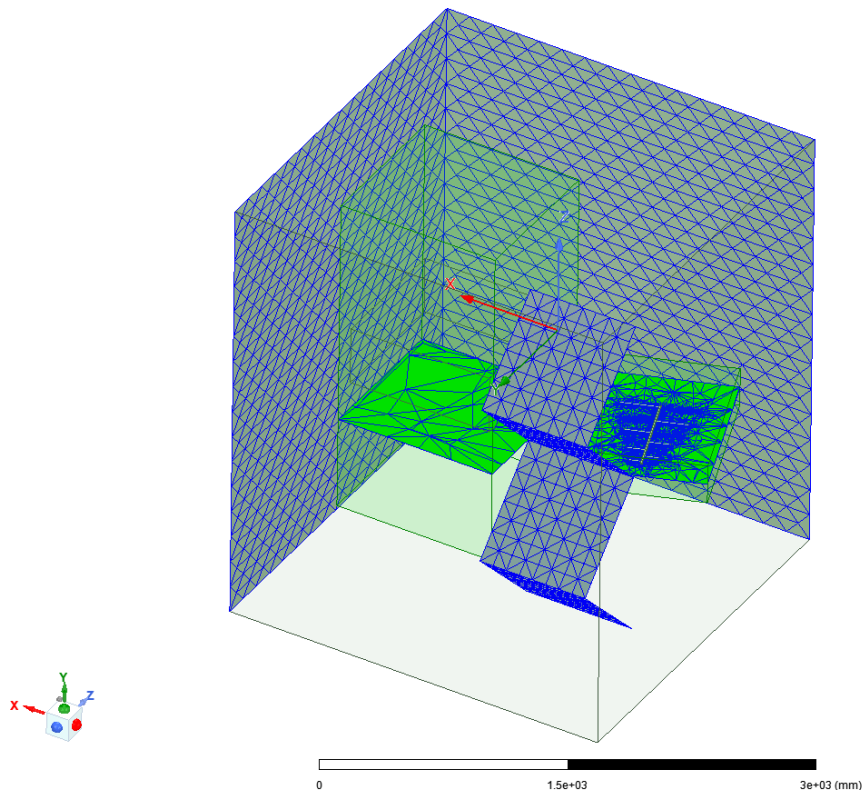
A Figura 31 ilustra a distribuição de campo elétrico nas paredes metálicas do modelo 2 de câmara reverberante em 600 MHz. É notório o aumento do número de modos de propagação em relação às frequências de 200 MHz e 400 MHz, o que era esperado pela equação 2. A maior distribuição dos modos no interior da câmara resulta em um campo elétrico que varia entre 72 dB e 20 dB.

A simulação de cada posição do misturador nesse modelo durou 4 horas, totalizando 12 horas para todas as três parametrizações. Devido ao tempo necessário para simular 50 posições, esse modelo não foi utilizado para verificar a uniformidade de campo.

4.3.3 Modelo 3

Na Figura 32 e na Figura 33 são apresentadas as malhas de elementos do modelo 3 de câmara reverberante.

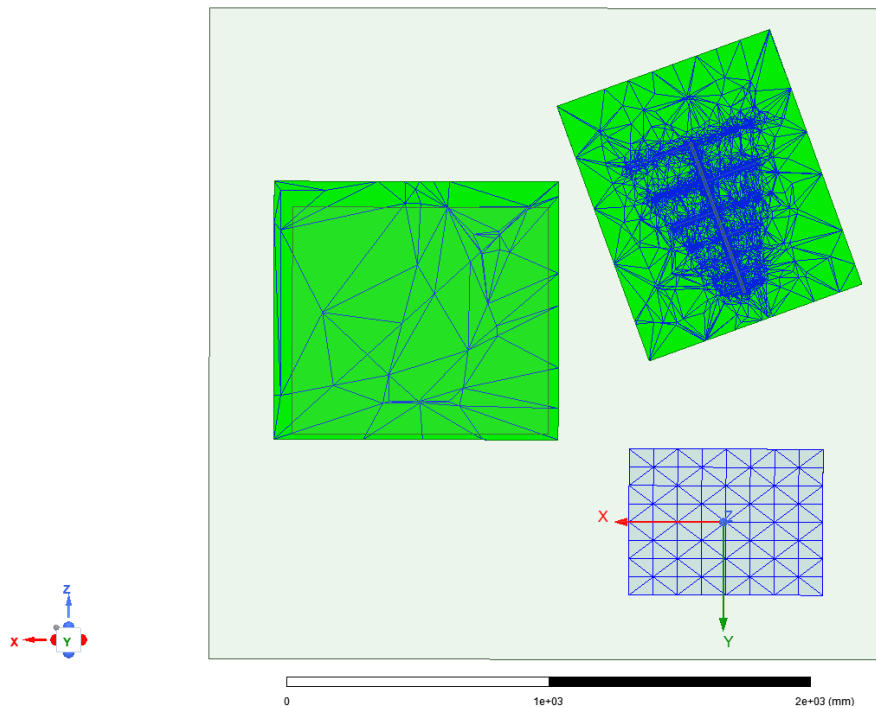
Figura 32 - Malha de elementos câmara modelo 2



Fonte: Do autor via HFSS

A malha de elementos da câmara modelo 2 é apresentada na Figura 32. O número total de elementos é de 49758, sendo 6656 elementos nos planos que modelam as paredes e o misturador. As caixas de ar do WV e da antena transmissora correspondem a 43102 elementos.

Figura 33 - Malha de elementos plano horizontal

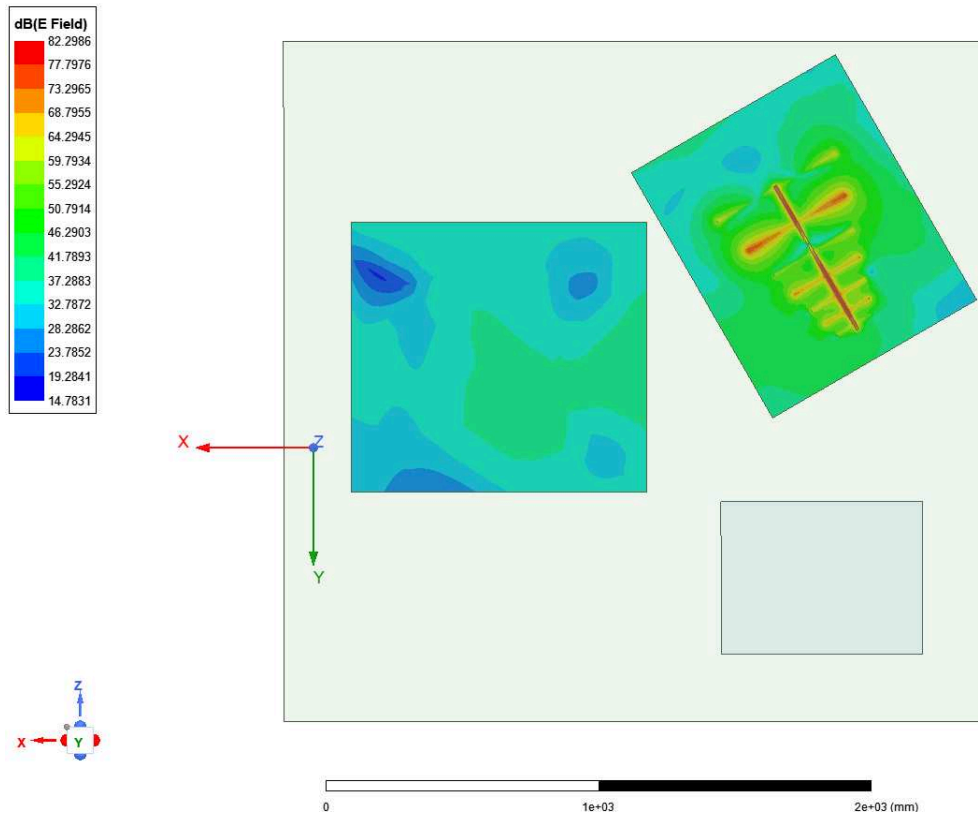


Fonte: Do autor via HFSS

A Figura 33 representa a malha de elementos do modelo 3 da câmara vista a partir de um corte horizontal. Em comparação ao modelo 2, a malha de elementos do modelo 3 é menos densa, com total de 49758 elementos, devido à alteração do tamanho máximo do elemento de 200 mm para 400 mm. Por causa dos efeitos de reflexão nas paredes, os campos eletromagnéticos não são computados com tanta acurácia como no modelo 2.

Na Figura 34, na Figura 35 e na Figura 36 são apresentadas as distribuições de campo elétrico em um plano horizontal para três posições do misturador em 300 MHz.

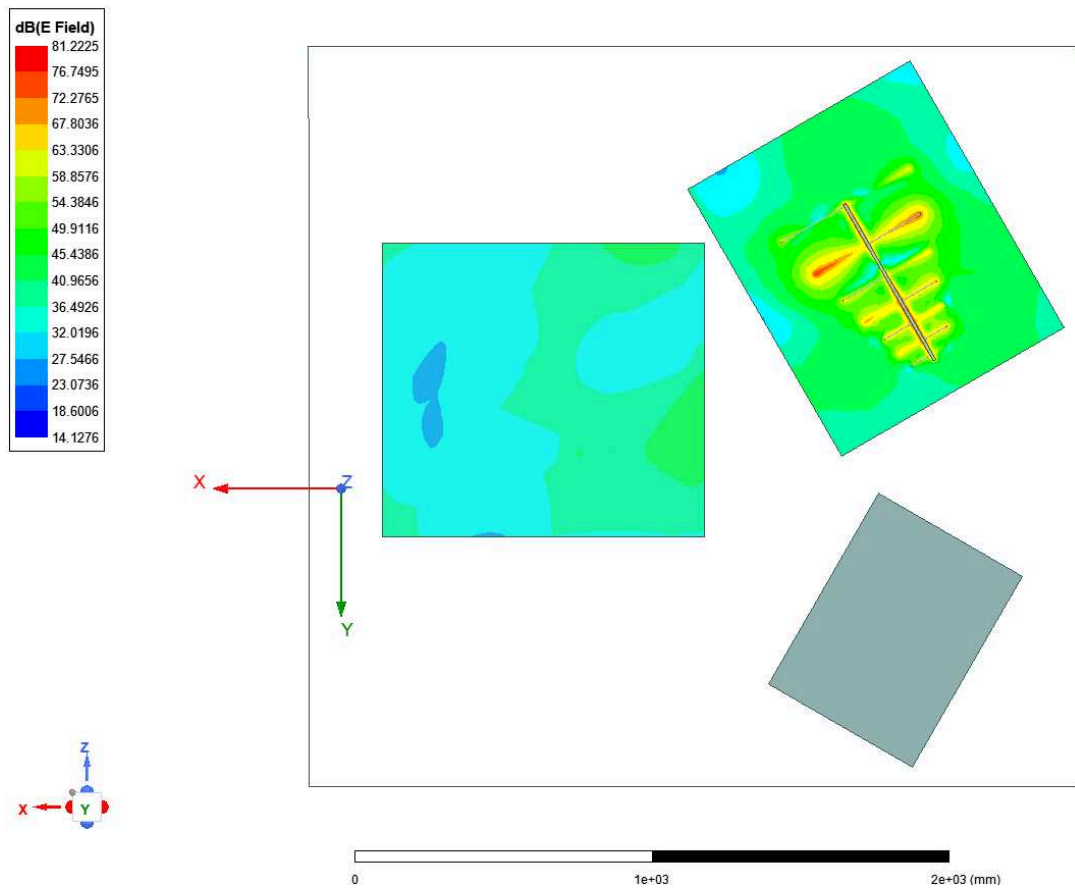
Figura 34 - Distribuição campo elétrico nas caixas de ar posição 1



Fonte: Do autor via HFSS

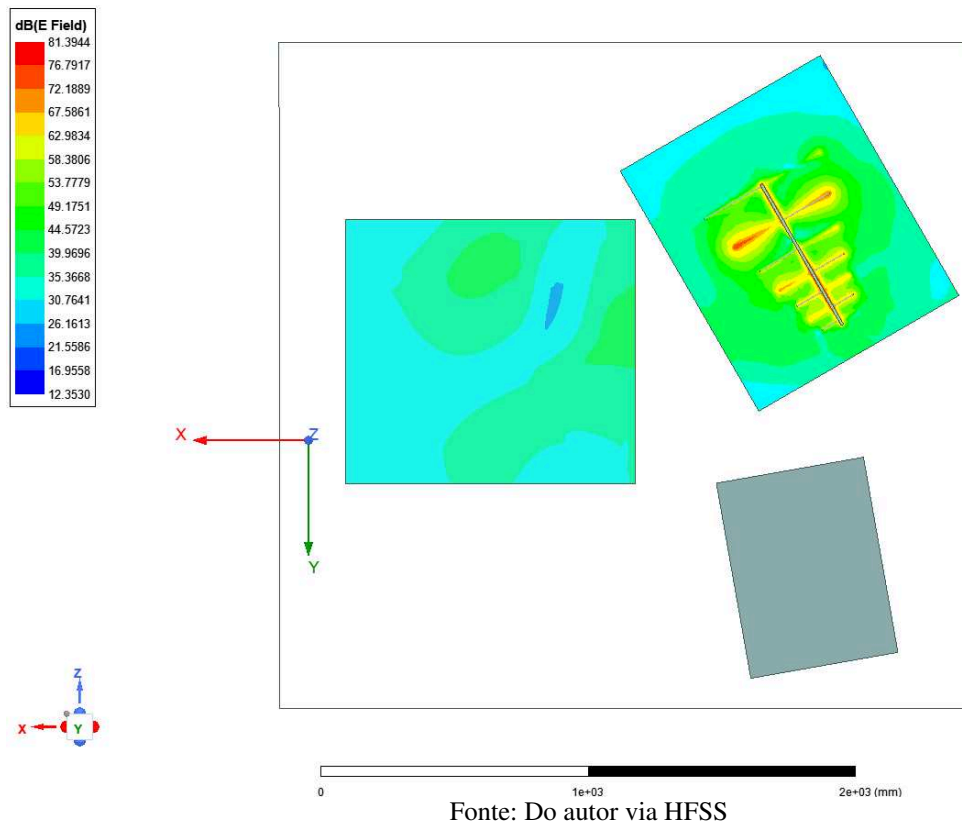
A Figura 34 mostra a distribuição do campo elétrico no interior das caixas de ar vista a partir de um plano horizontal. A posição 1 do misturador corresponde ao ângulo de 0° , como foi utilizado no modelo 2. O campo no interior do WV varia de intensidade aproximadamente entre 40 dB e 20 dB.

Figura 35 - Distribuição campo elétrico nas caixas de ar posição 2



A Figura 35 ilustra a distribuição do campo elétrico no interior das caixas de ar vista a partir de um plano horizontal. A posição 2 do misturador corresponde a 45° de rotação em relação à posição 1. O campo elétrico no interior do WV mantém a variação de intensidade da posição anterior, entre 40 dB e 20 dB, aproximadamente. A rotação do misturador apenas alterou a distribuição do campo no interior da câmara.

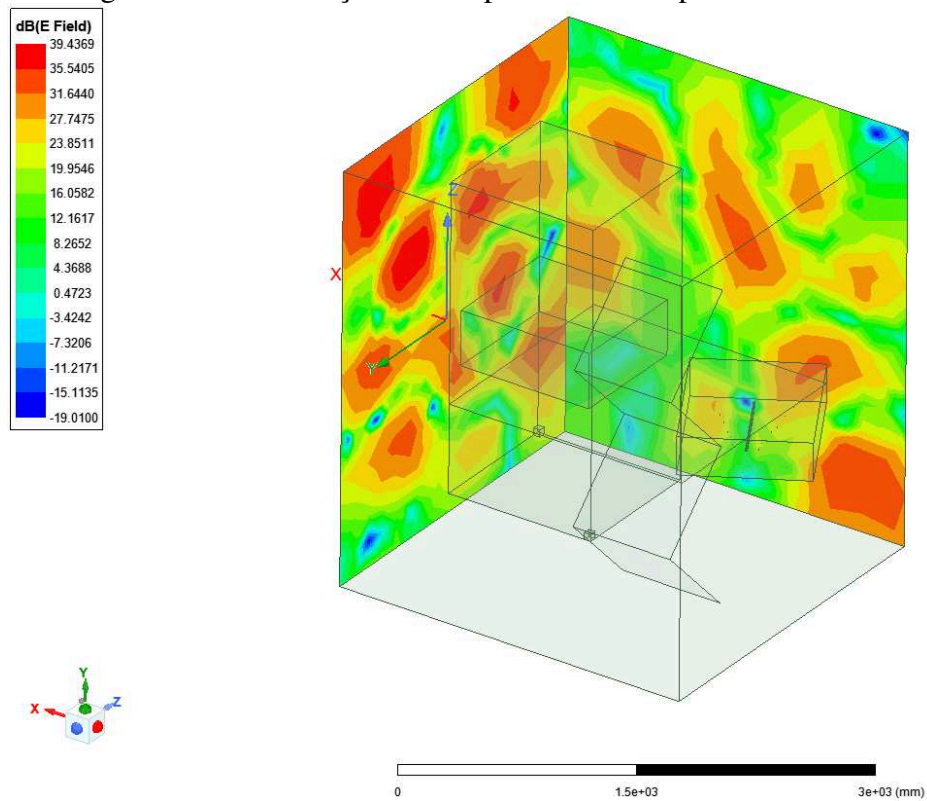
Figura 36 - Distribuição campo elétrico nas caixas de ar posição 3



A Figura 36 ilustra a distribuição do campo elétrico no interior das caixas de ar vista a partir de um plano horizontal. A posição 3 corresponde a -30° em relação à posição 1. Como ocorre nas posições anteriores, o campo elétrico varia entre 40 dB e 20 dB de intensidade no interior do WV. A rotação do misturador modifica a distribuição do campo, alterando as posições de máximos e mínimos das ondas eletromagnéticas.

As distribuições de campo elétrico nas paredes da câmara modelo 3 são representadas abaixo pelas Figura 37, Figura 38 e Figura 39 para frequências 300 MHz, 600 MHz e 900 MHz.

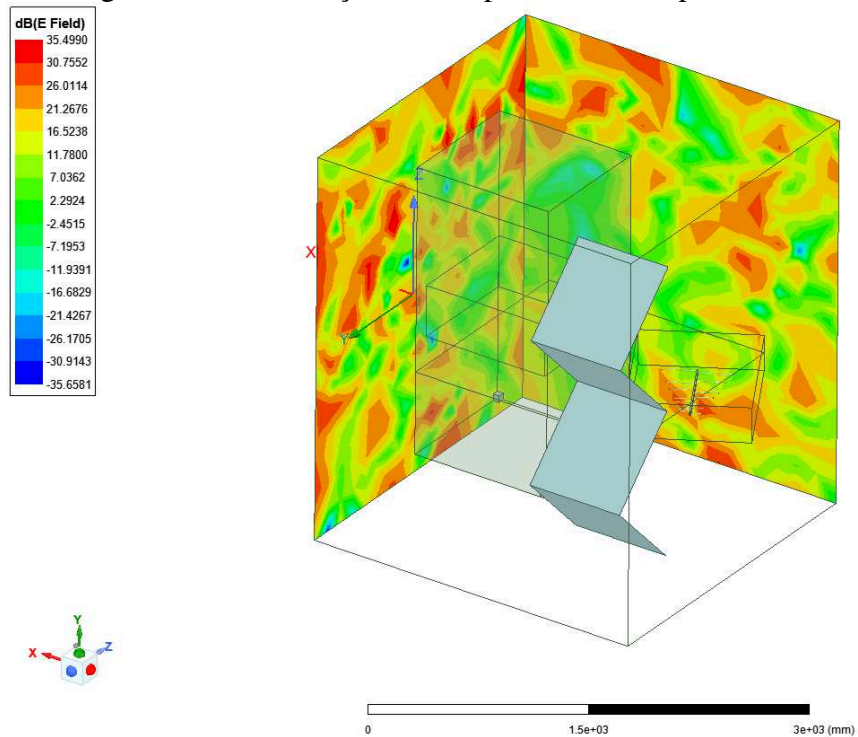
Figura 37 - Distribuição do campo elétrico nas paredes em 300 MHz



Fonte: Do autor via HFSS

A Figura 37 ilustra a distribuição de campos elétricos nas paredes metálicas da câmara reverberante em 300 MHz. Devido às modificações realizadas nas malhas, o campo elétrico sofreu perda de acurácia nas paredes da câmara. A intensidade de campo elétrico varia entre 39 dB e -11 dB.

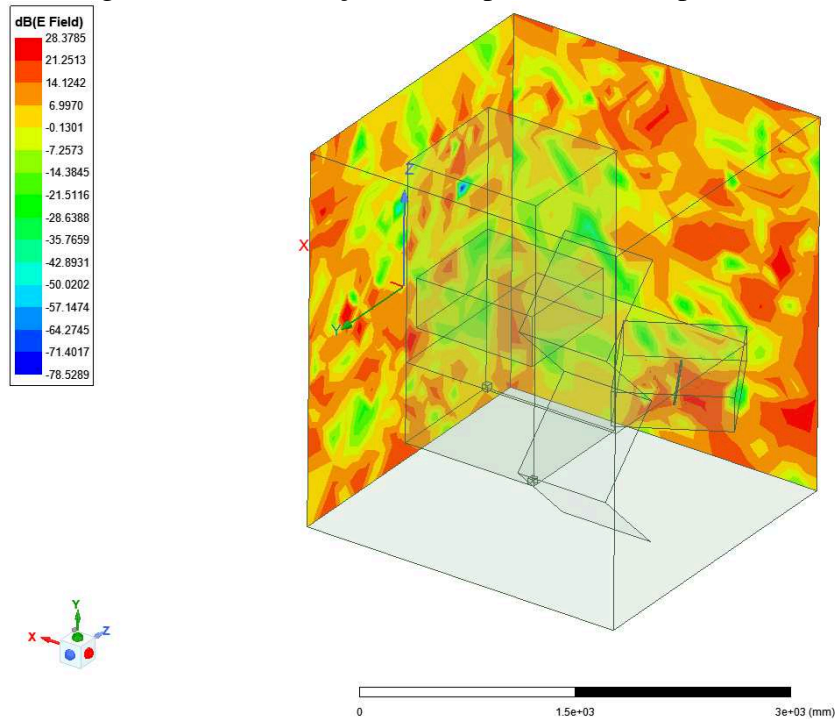
Figura 38 - Distribuição do campo elétrico nas paredes em 600 MHz



Fonte: Do autor via HFSS

A Figura 38 representa a distribuição de campo elétrico nas paredes metálicas do modelo 3 de câmara reverberante em 600 MHz. Mais modos de propagação estão presentes, comparado à frequência de 300 MHz. A intensidade do campo elétrico varia entre 35 dB e -26 dB.

Figura 39 - Distribuição do campo elétrico nas paredes em 900 MHz

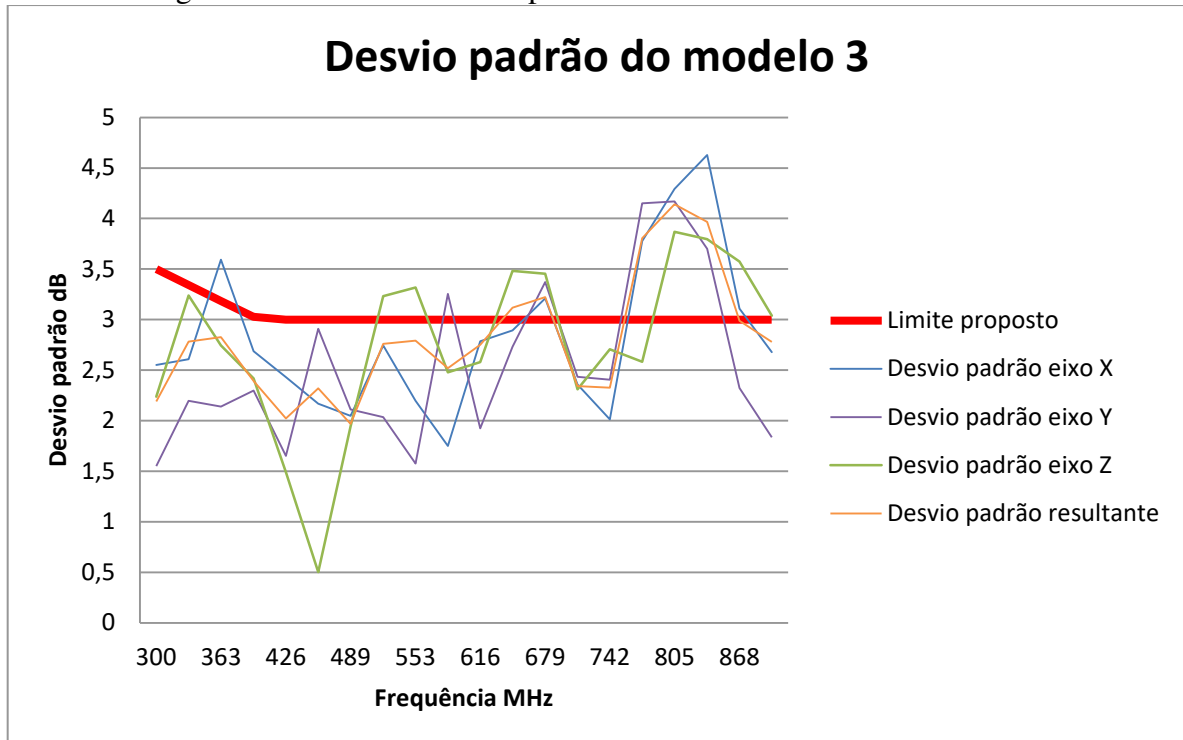


Fonte: Do autor via HFSS

A Figura 39 representa a distribuição de campo elétrico nas paredes metálicas do modelo 3 de câmara reverberante em 900 MHz. As distribuições de campo verificadas nas Figura 37, Figura 38 e Figura 39 indicam que modos de propagação suficientes estão presentes na RC. O modelo 3 teve uma redução do tempo de simulação de 4 horas para apenas 1 hora e 15 minutos.

O modelo 3 foi utilizado para realizar o processo de calibração com a câmara vazia. Para esse modelo, o movimento do misturador foi parametrizado ao longo de 36 posições, resultando em um tempo de simulação de 46 horas. Os campos elétricos no interior da câmara foram computados ao longo de 36 posições do misturador. Os valores de campo foram extraídos dos vértices do WV, correspondente às posições da sonda de campo. A partir desses dados foram calculados os desvios padrão, conforme processo de validação exposto em 2.4.4. A Figura 40 apresenta as curvas dos desvios em relação à frequência.

Figura 40 - Curvas de desvio padrão modelo 3 de câmara reverberante



Fonte: Do autor

O desvio padrão, calculado a partir dos valores de campo elétrico nos vértices do volume de trabalho, não apresentou resultado dentro do limite estabelecido pela norma IEC 61000-4-21. Apesar de respeitar o limite estabelecido em alguns intervalos, os desvios calculados não estão contidos no limite ao longo de toda a faixa de frequência. É notado o acréscimo do desvio padrão conforme o aumento da frequência, o que pode ser explicado pela diminuição do comprimento de onda para frequências mais altas. Nesse caso, a malha de elementos deve ser ajustada para garantir a precisão dos campos computados. Sendo assim, o campo elétrico não é uniforme no interior da câmara reverberante e, portanto, o modelo 3 não pode ser utilizado para operação.

Em relação à modelagem, para se obter uma RC capaz de operar na faixa de frequência desejada, a malha deve ser configurada com atenção. O refinamento da malha nas superfícies metálicas é realizado para computar com os campos eletromagnéticos com maior acurácia. Simulações numéricas de câmaras reverberantes necessitam de máquinas de cálculo robustas. Modelos de câmaras com frequência de operação na ordem de centenas de MHz requerem muito volume, portanto o poder computacional deve ser levado em consideração no desenvolvimento.

Em relação aos aspectos construtivos, o aumento do número de posições do misturador é a primeira medida a ser tomada para a nova verificação da uniformidade de campo. Além disso, a diminuição do volume de trabalho é outra medida utilizada para a obtenção de campo uniforme. A modificação das posições do misturador e da antena transmissora também pode ser realizada para tentar atingir a uniformidade.

4.4 CONCLUSÃO

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos da simulação dos modelos desenvolvidos no módulo HFSS, do programa *Ansys Electronics Desktop*.

Através dos gráficos de distribuição de campo elétrico, foi verificado o deslocamento dos modos com a rotação do misturador. Além disso, com o aumento da frequência mais modos de propagação são excitados, como era esperado pela equação 2. O modelo 3 foi utilizado para verificar a uniformidade de campo no WV através do processo de calibração de câmara vazia. Apesar da uniformidade não ter sido alcançada, as curvas de desvios padrão calculadas não estão distantes dos limites estabelecidos. Foram abordadas algumas medidas que podem ser tomadas para obter um modelo com uniformidade de campo.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi estudada a teoria de câmaras reverberantes de modos misturados para a modelagem de câmaras com frequências de operação distintas. Modelos numéricos foram obtidos e simulados através de *software* de modelagem. Os resultados computados foram analisados em relação à distribuição de campo elétrico e um dos modelos foi utilizado para verificar a uniformidade de campo através do processo de calibração estabelecido pela norma IEC 61000-4-21.

O capítulo 2 apresentou a teoria envolvida em câmaras reverberantes. O princípio de funcionamento e aspectos construtivos foram abordados pelo trabalho. O processo de calibração, necessário para a verificação da uniformidade de campo, foi descrito.

No capítulo 3 foi apresentado o módulo de simulação numérica HFSS do *software Ansys Electronics Desktop*. As principais funcionalidades foram abordadas e o processo para obtenção de um modelo básico genérico no HFSS foi descrito. Além disso, foram apresentados os modelos de câmaras reverberantes com base nos conceitos expostos no capítulo 2.

O capítulo 4 apresentou os resultados dos modelos desenvolvidos no módulo HFSS. Em relação aos modelos de antenas, foram apresentados os parâmetros de antena pertinentes à transmissão de ondas eletromagnéticas. Em relação aos modelos de câmaras, foram apresentados os resultados dos campos elétricos e a malha de elementos finitos. Os modelos das câmaras reverberantes não apresentaram os resultados esperados, porém ajustes do modelo numérico podem ser suficientes para obter uma câmara reverberante capaz de operar.

De acordo com o que foi apresentado no decorrer deste trabalho, os modelos de simulação desenvolvidos utilizando método híbrido que alia o FEM ao MoM não apresentaram resultados satisfatórios. No entanto, a disposição dos modos no interior das câmaras e o cálculo do desvio padrão do modelo 3 indicam que o modelo ideal pode ser obtido através de modificações da simulação numérica. Para trabalhos futuros, recomenda-se o refinamento da malha nas regiões de reflexão, isso é, as paredes e o misturador metálico para que o campo eletromagnético incidente e refletido seja computado com maior exatidão. Medidas em relação aos aspectos construtivos também podem ser tomadas, como a diminuição do volume de trabalho e a modificação das posições dos equipamentos no interior da câmara.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1] IEEE Standard Dictionary of Electrical and Electronics Terms, ANS/IEEE Std 100-1977, 1977.
- [2] J. Patterson, "Electromagnetic Compatibility," 2016.
- [3] M.T. Ma, M. Kanda, M.L. Crawford, E.B. Larsen, "A Review of Electromagnetic Compatibility/Interference Measurement Methodologies," 1985.
- [4] M.I. Nakauchi, E.M. Montrose, "Testing for EMC Compliance Approaches and Techniques": Wiley, 2004.
- [5] C. Burns, "Three-Dimensional Simulation and Experimental Verification of a Reverberation Chamber", 2005.
- [6] G. Cerri, R. De Leo, F. Moglie, V. Mariani Primiani, "Theoretical and Experimental Analysis of the Field-to-Line Coupling in a Reverberation Chamber", 2006.
- [7] C. L. Holloway, D. Hill, J. M. Ladbury, G. Koepke, "Requirements for an effective reverberation chamber: unloaded or loaded," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions*, 2006.
- [8] IEC 61000-4-21, "Electromagnetic Compatibility (EMC) - Part 4-21: Testing and measurement techniques - Reverberation chamber test methods", 2005.
- [9] B.H. Liu, D.C. Chang, M.T. Ma., "Eigenmodes and composite quality factor of reverberation chamber", 1983.
- [10] M.L. Crawford, G., Koepke, "Design, evaluation, and use of a reverberation chamber for performing electromagnetic susceptibility/vulnerability measurements", 1986.
- [11] G. Koepke, C.L. Holloway, J. Ladbury, D. Hill, "Reverberation Chambers for EM Applications".
- [12] P. Démoulin, B. Besnier, "Electromagnetic reverberation chambers": John Wiley & Sons, 2013.
- [13] A. Marvin, F. Moglie, W. M. Primiani, A. Cozza, R. Serra, "Reverberation Chambers à la carte: An overview of the different mode-stirring techniques".
- [14] M.T. Ma, "Understanding reverberating chambers as an alternative facility for EMC testing", 1988.

- [15] ANSYS, HFSS Help, 2021.
- [16] P. Gaikwad, S.V. Chopade, "Design and Analysis of Log Periodic Dipole Array Antenna".
- [17] K.K. Mistry, P.I. Lazaridis, Z.D. Zaharis, T.D. Xenos, E.N. Tziris, I.A Glover, "An optimal design of printed log-periodic antenna for L-band EMC applications", 2018.
- [18] J. P. A. Bastos, "Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática". Florianópolis: Ed. da UFSC, 2004.
- [19] P. Corona, J. Ladbury, G. Latmiral, "Reverberation-Chamber Research—Then and Now:A Review of Early Work and Comparison With Current Understanding," 2002.