GUSTAVO MACIULIS DIP

OTIMIZAÇÃO DE CÉLULAS TEM

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

Área de concentração: Sistemas
Eletrônicos

Orientador: Luiz Cezar Trintinalia

São Paulo

2011

GUSTAVO MACIULIS DIP

OTIMIZAÇÃO DE CÉLULAS TEM

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia Elétrica.

São Paulo

2011

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência do seu orientador.

São Paulo, 03 de janeiro de 2011.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Dip, Gustavo Maciulis

Otimização de células TEM / G.M. Dip. -- ed.rev. -- São Paulo, 2011.

77 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle.

1. Compatibilidade eletromagnética 2. Interferência eletromagnética I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Telecomunicações e Controle II. t.

À minha esposa Simone e aos meus pais.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Luiz Cezar Trintinalia, por esclarecer minhas dúvidas, pela paciência, pelo incentivo.

Ao Prof. Dr. Jose Kleber da Cunha Pinto, à Prof. Dra. Viviane Cristine Silva e ao Prof Dr. Carlos Antonio França Sartori pelo incentivo.

Ao colega e Prof. Dr. Marcelo Perotoni por esclarecer minhas dúvidas na utilização do software de simulação.

Aos colegas Antonio Sandro Verri e Jair Pereira de Souza pelo auxílio nas medidas da célula TEM realizadas em laboratório.

Aos colegas Kennedy Xisto Barros Peixoto e Geraldo Itagiba de Andrade pelo auxílio na construção da célula TEM.

À minha esposa Simone, aos meus pais e às minhas irmãs Renata e Tatiana.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

Resumo

O presente trabalho apresenta resultados de simulações numéricas de uma célula TEM assimétrica aberta com o objetivo de otimizar seu desempenho. Entre as otimizações, é investigado o uso de fendas resistivas para estender a faixa de frequência de operação da célula. Além disso, otimiza-se o casamento de impedância entre o conector coaxial e a célula TEM. São apresentados os resultados medidos da transição otimizada em laboratório. Foi construída, também, uma célula TEM assimétrica e seu desempenho foi verificado em laboratório, obtendo-se uma perda de retorno maior que 10 dB na faixa de operação (30 MHz a 3 GHz).

Palavras-chave: Compatibilidade Eletromagnética, Interferência Eletromagnética

Abstract

This work presents numerical simulations of an open asymmetric TEM cell in order to optimize its performance. Among the optimizations, the use of resistive slots to increase the bandwidth of the TEM cell is investigated. Furthermore, the transition between the coaxial connector and the TEM cell is also optimized. Measurements of this optimized transition were performed in laboratory validating the simulations. A prototype TEM cell was built and its return loss was verified to be above 10 dB over its entire band of operation (30 MHz – 3 GHz).

Keywords: Electromagnetic Compatibility, Electromagnetic Interference

Sumário

Capítulo 1 Introdução.....	16
1.1 Objetivo e Justificativa.....	16
1.2 Revisão da Bibliografia.....	17
1.3 Organização do trabalho.....	20
Capítulo 2 Células TEM/GTEM.....	22
2.1 A célula TEM fechada.....	22
2.2 A célula TEM aberta.....	23
2.3 A célula GTEM.....	23
2.4 Outros tipos de célula TEM.....	24
2.5 Outras variações de célula TEM.....	25
Capítulo 3 Caracterização de células TEM.....	27
3.1 Parâmetros distribuídos de linhas de transmissão.....	27
3.1.1 Métodos de medida de impedância característica.....	28
3.1.1.1 Impedâncias de circuito aberto e de curto circuito.....	28
3.1.1.2 Reflexão no domínio do tempo.....	29
3.1.1.3 Refletometria no domínio da frequência.....	30
3.2 Uniformidade dos campos.....	30
3.2.1 Determinação do volume interno útil em células TEM.....	31
3.3 Um critério opcional para determinação da faixa de frequências em células TEM.....	34
3.4 Limitações de uso de células TEM.....	35
3.4.1 Frequência de Corte de Modos de Propagação de Ordem Superior	35
3.4.2 Frequência de ressonância.....	36
3.5 Caracterização numérica.....	36
3.6 Simulação da reflexão no domínio do tempo.....	36
Capítulo 4 Técnicas de projeto.....	38
4.1 Dimensionamento da geometria da célula TEM.....	38

4.2 Dimensionamento da célula TEM através do Método dos Momentos.....	39
Capítulo 5 Otimização da uniformidade do campo magnético com uso de fendas resistivas.....	43
5.1 Introdução.....	43
5.2 Propagação de modos de ordem superior.....	43
5.3 Resultados da célula assimétrica com fendas.....	49
5.4 Conclusão.....	56
Capítulo 6 Construção do protótipo e comparação dos resultados medidos com simulados.....	57
6.1 Protótipos construídos	57
6.1.1 A transição entre o conector e a célula TEM.....	58
6.2 As transições otimizadas	59
6.3 Comparação de desempenho das transições otimizadas com a transição original.....	62
6.4 O protótipo construído com a transição otimizada.....	66
Capítulo 7 Conclusão.....	69
Apêndice A.....	71

Índice de ilustrações

Figura 2.1 – Célula TEM fechada desenvolvida por Crawford. Figura obtida de [2]..	22
Figura 2.2: Perfil de célula TEM assimétrica estudada por V. H. A. E. Verhagen.....	23
Figura 2.3 – Exemplo de uma célula TEM simétrica aberta. Figura obtida de Satav, S. [21].....	23
Figura 2.4: Foto de célula GTEM mostrando as espumas absorvedoras de campo utilizadas em alta frequência.	24
Figura 2.5: Célula TEM tridimensional desbalanceada. Projetada por Marco Klingler, Stéphane Egot, Jean-Pierre Ghys e Jean Rioult	25
Figura 2.6 - Célula tridimensional balanceada projetada por Marco Klingler, Stéphane Egot, Jean-Pierre Ghys, and Jean Rioult.	25
Figura 2.7 - Célula SCTL projetada por Jaehoon Yun , Hyuckjae Lee, and Hojung Hwang Figura obtida de [26]	26
Figura 3.1: Circuito equivalente para uma linha de transmissão de comprimento diferencial Δz	27
Figura 3.2: Determinação da área de campo uniforme em células TEM simétricas..	32
Figura 3.3: Determinação do volume de teste e do máximo tamanho do EUT permitido, para células TEM simétricas.....	33
Figura 3.4: Determinação da área de campo uniforme em células GTEM	33
Figura 3.5: Determinação do volume de teste e do máximo volume permitido para o EUT.....	34
Figura 3.6: Secção transversal de célula TEM simétrica fechada.....	35
Figura 4.1: Corte transversal de uma célula TEM.....	38
Figura 4.2 - Gráfico que relaciona a impedância característica de células TEM com valores da largura e espessura do septo, largura e distância entre as placas paralelas. Valores para $t/b \leq 0.1$	39
Figura 4.3: Perfil da célula TEM simulado pela Método dos Momentos.....	40
Figura 4.4: Valor dos potenciais no célula TEM assimétrica calculada pelo Método dos Momentos.....	41
Figura 4.5: Campo elétrico indesejado na direção transversal. As curvas em que a intensidade do campo horizontal são 0, 10 e 20 decibéis inferiores à intensidade do campo vertical.....	42

Figura 4.6: Campo elétrico e região da célula TEM com campo elétrico com uniformidade inferior a 2 dB.....	42
Figura 5.1: - Posição dos “probes” no plano $z = 75$ cm da célula sem as fendas.....	44
Figura 5.2: Célula TEM simulada com o uso de fendas resistivas.....	44
Figura 5.3: Campo magnético na direção x no plano situado em $z = 75$ cm na frequência de 100 MHz na célula TEM sem fendas.....	45
Figura 5.4: Campo magnético na direção y no plano situado em $z = 75$ cm na frequência de 100 MHz na célula TEM sem fendas.....	46
Figura 5.5: Campo magnético na direção z no plano situado em $z = 75$ cm na frequência de 100 MHz na célula TEM sem fendas.....	46
Figura 5.6: Campo magnético na direção x em 630 MHz sem uso de fendas resistivas.....	47
Figura 5.7: Campo magnético na direção y em 630 MHz sem o uso de fendas resistivas.....	47
Figura 5.8: Campo magnético na direção z em 630 MHz sem o uso de fendas resistivas.....	48
Figura 5.9: Intensidade das correntes elétricas no septo, associadas ao campo magnético na direção de propagação.....	49
Figura 5.10: Septo da célula TEM com as fendas resistivas e posição $(x;y;z) = (0;0;0)$	49
Figura 5.11: Gráfico da relação entre o campo magnético desejado e o indesejado. Ponto $(x;y;z) = (-9,4;-23;75)$ em cm (“probe” número 7). Separando as estrutura com e sem fendas.....	50
Figura 5.12: Localização dos “probes” na célula TEM. O de número 5 possui coordenadas $(x;y;z) = (0;-15,4;75)$	51
Figura 5.13: Relação entre o campo magnético desejado e o indesejado em 630 MHz sem uso de fendas resistivas.....	52
Figura 5.14: Relação entre o campo magnético desejado e o indesejado em 630 MHz com uso de fendas resistivas.....	53
Figura 5.15: Campo magnético na direção x em 630 MHz com uso de fendas resistivas.....	54
Figura 5.16: Campo magnético na direção y em 630 MHz com o uso de fendas resistivas.....	55

Figura 5.17: Campo magnético na direção z em 630 MHz com o uso de fendas resistivas.....	56
Figura 6.1: Célula TEM assimétrica aberta construída.....	57
Figura 6.2: Célula TEM assimétrica original simulada.....	57
Figura 6.3: Transição entre o conector tipo N e a célula TEM assimétrica aberta construída.....	58
Figura 6.4: Transição entre o conector tipo N e a célula TEM assimétrica aberta simulada.....	58
Figura 6.5: Medida da impedância da célula original através da refletometria no domínio do tempo.....	59
Figura 6.6: Foto do protótipo da transição otimizada.....	59
Figura 6.7: Ilustração da transição simulada otimizada sem dobras adicionais.....	59
Figura 6.8: Dimensões da transição otimizada.....	60
Figura 6.9: Medida da impedância através do TDR da transição melhorada. O valor da impedância varia de 57,52 Ohms até 49,00 Ohms.....	60
Figura 6.10: Transição melhorada que apresenta menor perda de retorno em simulações.	61
Figura 6.11: Perda de retorno da transição original e da célula TEM que a utiliza....	63
Figura 6.12: Perda de retorno da primeira transição otimizada e de célula TEM que a utiliza.....	63
Figura 6.13: Perda de retorno da transição otimizada com uma dobra nas placas externas e recorte na placa central e perda de retorno da célula TEM que a utiliza.	63
Figura 6.14: Comparação da perda de retorno de células TEM assimétricas com diferentes transições simuladas e valor de perda de retorno de célula TEM medido em laboratório.....	65
Figura 6.15: Célula TEM assimétrica com transição que possui menor variação da impedância entre o conector tipo N e as placas paralelas.....	65
Figura 6.16: Célula TEM assimétrica com 92,5 cm de comprimento construída com a transição simples melhorada.....	66
Figura 6.17: Perda de retorno da célula TEM de 92,5 cm de comprimento simulada e construída com a transição simples melhorada.....	66
Figura 6.18: $ S_{12} $ da célula TEM pequena com transição melhorada. Valores simulados e medidos em laboratório.....	67

Lista de abreviaturas e siglas

CISPR	“Comité International Spécial des Perturbations Radioélectriques”
EMC	“Electromagnetic Compatibility”
EMI	“Electromagnetic Interference”
EUT	“Equipment Under Test” - equipamento em teste
FDTD	“Finite-difference time-domain” - Diferenças finitas no domínio do tempo
FFT	“Fast Fourier Transform” - Transformada Rápida de Fourier
GTEM	“Gigahertz Transverse Electromagnetic” - Gigahertz Transversal Eletromagnética.
IEC	“International Electrotechnical Commission”
IFFT	“Inverse Fast Fourier Transformation”
IFT	“Inverse Fourier Transform” - Transformada inversa de Fourier
MoM	“Method of Moments” - método dos momentos
OAT	“Open Area Test” - testes em campo aberto
RF	Rádio Frequência
SCTL	“Straight Coupled Transmission-Line” - Linha de transmissão diretamente acoplada
STDR	“Synthetic Time Domain Reflectometry”
TDR	“Time Domain Reflectometry” - Reflexão no domínio do tempo
TE	Transversal Elétrico
TEM	Transversal Eletromagnético
TM	Transversal Magnético
VNA	“Virtual Network Analyser”, - Analisador de rede vetorial
VSWR	“Voltage Stand Wave Ratio” - Coeficiente de onda estacionária

Lista de símbolos

α	<i>Constante de atenuação em néper por metro</i>
β	<i>Constante de fase em radianos por metro</i>
γ	<i>Constante de propagação</i>
Δz	<i>Comprimento de um trecho da linha de transmissão</i>
ϵ	<i>Permissividade elétrica</i>
μ	<i>Permeabilidade magnética.</i>
η	<i>Impedância intrínseca do meio</i>
Γ	<i>Coeficiente de reflexão</i>
A_{loss}	<i>Perda de transmissão do guia de onda em dB</i>
C	<i>Capacitância por unidade de comprimento</i>
C'	<i>“Fringe capacitance” - Capacitância de franja</i>
c	<i>Velocidade da luz</i>
E_i	<i>Campo elétrico da onda enviada</i>
E_r	<i>Campo elétrico da onda refletida</i>
F_{corte}	<i>Frequência de corte</i>
$F_{\text{máx}}$	<i>Frequência máxima de simulação</i>
$F_{(m,n)}$	<i>Frequência de corte do modo m,n</i>
G	<i>Condutância por unidade de comprimento</i>
h	<i>Altura do equipamento em teste</i>
H_x	<i>Campo magnético na direção x</i>
H_y	<i>Campo magnético na direção y</i>
H_z	<i>Campo magnético na direção z</i>
I_0	<i>Corrente na linha</i>
j	$(-1)^{1/2}$
l	<i>Posição na linha de transmissão</i>
L	<i>Indutância por unidade de comprimento</i>
L_{EUT}	<i>Comprimento do equipamento em teste</i>
$P_{\text{refletida}}$	<i>Potência refletida</i>

$P_{inserida}$	<i>Potência inserida</i>
R	<i>Resistência por unidade de comprimento</i>
t	<i>Espessura do septo da célula TEM</i>
T	<i>Intervalo de tempo</i>
v	<i>Velocidade de propagação da onda</i>
V_0^+	<i>Onda associada a tensão que se propaga no sentido contrário de z</i>
V_0^-	<i>Onda associada a tensão que se propaga no sentido de z</i>
V_0	<i>Tensão na linha</i>
w	<i>Largura do septo da célula TEM</i>
ω	<i>Frequência em radianos por segundo</i>
W	<i>Largura da célula TEM</i>
z	<i>Distância em relação à origem da linha de transmissão</i>
Z_0	<i>Impedância característica</i>
$Z_{circuito\ aberto}$	<i>Impedância de circuito aberto</i>
$Z_{curto-circuito}$	<i>Impedância de curto-circuito</i>
Z_L	<i>Impedância da carga</i>
$Z(z)$	<i>Impedância da linha de transmissão no ponto z</i>
$Z(z_1)$	<i>Impedância da linha de transmissão no ponto z_1</i>

Capítulo 1 Introdução

1.1 Objetivo e Justificativa

Atualmente as pessoas estão cercadas de equipamentos eletrônicos que influenciam o funcionamento de outros dispositivos para ocorrer a comunicação sem fio tal como ocorre através do rádio, da televisão e do telefone celular. Porém, algumas vezes, esta influência é indesejada, sendo chamada interferência. Pode ser inofensiva como um pequeno ruído no alto falante do rádio a pilhas, um chuvisco na tela de uma televisão, ou extremamente danosa como uma pane em um equipamento hospitalar de suporte à vida. É importante saber qualificar e quantificar estes níveis de interferência através de testes que permitam saber em que condições um equipamento opera normalmente perto de outro. Para isto foram desenvolvidas normas que especificam procedimentos e limites para os campos eletromagnéticos gerados pelos circuitos elétricos desses equipamentos. Exemplo de normas são aquelas da família IEC61000 e CISPR.

Entre os testes descritos por normas, o teste realizado em campo aberto ou OAT (open area test) - é o preferencial segundo normas vigentes de compatibilidade eletromagnética, porém não proporciona um ambiente livre de interferências externas. Para contornar este problema, um teste em ambiente controlado é realizado nas chamadas câmaras anecóicas que simulam o campo aberto por impedirem a reflexão de ondas em seu interior. A sua desvantagem é o alto custo de fabricação e aluguel das câmaras. Testes economicamente mais viáveis podem ser realizados utilizando-se um dispositivo denominado célula TEM – transversal eletromagnética - que são descritos por normas IEC para testes de compatibilidade e interferência eletromagnéticas. Esta célula pode substituir as câmaras anecóicas por proporcionar um ambiente de testes equivalente em determinadas condições [1].

Atualmente, existem algumas variações da célula TEM originalmente desenvolvida por Myron L. Crawford [2]. Uma dessas variações é a célula TEM assimétrica [3] [4]. As células assimétricas podem ser abertas ou fechadas. São chamadas assimétricas por ter uma das câmaras maior do que outra. Uma célula desse tipo foi construída e se encontra no laboratório de Antenas e Microondas da Escola Politécnica da Universidade de São

Paulo. Medidas dos valores dos campos foram realizadas por Massaroppe, L. e Oliveira, L. M. em trabalho de conclusão de curso [5].

Por outro lado, na célula TEM a faixa de frequências de operação é limitada em função do aparecimento de modos de propagação não TEM, que prejudicam a uniformidade do campo em seu interior [6]. Consequentemente, as condições descritas nas normas deixam de ser obedecidas. Assim, torna-se necessária a melhoria de células TEM para que se obtenha a ampliação da sua faixa de frequências em testes de EMI/EMC.

Algumas formas de se alcançar esse objetivo são descritas na literatura, como, por exemplo, o uso de resistores e fendas na placa central da célula, de espuma absorvedora de campos eletromagnéticos [7] e alterações do formato das placas [6].

Além disso, deve-se ter o cuidado de otimizar a transição entre o conector coaxial e a célula TEM. Essa otimização permite que maior potência seja inserida em seu interior, pela diminuição da reflexão do sinal em sua entrada, e aumenta a uniformidade dos campos.

Dessa maneira, considerando os motivos acima apresentados, o objetivo deste trabalho é apresentar técnicas de projeto e de otimização do projeto de células TEM. Projetar, simular e construir uma transição otimizada entre o conector coaxial e a célula TEM. Finalmente, uma célula TEM com a transição otimizada e medir os resultados em laboratório.

1.2 Revisão da Bibliografia

Testes de compatibilidade eletromagnética utilizando-se um equipamento simples, denominado “strip-line”, foram sugeridos em 1974 por Roseberry, B. e Schulz, R. B. [8]. Em seu interior era inserido o equipamento em teste - EUT - para que fosse submetido a campos elétricos e magnéticos em testes de EMC/EMI. O equipamento permitia que se conhecesse a amplitude do campo distante de maneira mais precisa do que através do uso de uma antena como fonte de sinal. O campo elétrico em seu interior era relativamente uniforme e o campo magnético pode ser previsto com simplicidade e precisão melhor que 2dB [8]. No interior do equipamento propagavam-se ondas no modo de propagação TEM que possuíam as mesmas características de ondas no campo distante tal como ocorre em testes de EMI/EMC em campo aberto. Em 1977 P. Groenveld [9] sugeriu a utilização de uma linha de transmissão para testes de EMI/EMC em

equipamentos de áudio. Essas linhas possuíam a desvantagem de serem abertas, isto é, permitiam a entrada de campos externos que interferiam nos testes. A frequência mais alta para testes era a que correspondia a um comprimento de onda duas vezes maior que a distância entre as placas. Para testes em frequências maiores, o autor sugeriu o uso de uma configuração de linha de transmissão mais complexa. Na mesma época, em 1974, Myron L. Crawford [10] sugeriu o uso da célula TEM – transversal eletromagnética – para testes de EMI/EMC. Esta célula, por ser fechada, possuía a vantagem de impedir que campos externos interferissem no EUT [11]. A impedância característica era de fácil controle com a alteração das distâncias entre o septo e as placas superior e inferior. O septo é a placa condutora situada entre ambas que permitia o casamento de impedância em 50Ω - um valor usado pela maioria dos equipamentos de RF. A limitação do uso de células TEM é a frequência de corte determinada pela propagação de modos superiores.

Algumas aplicações das células do tipo TEM incluem testes de absorção de radiofrequência em materiais biológicos [12] [13] [14], testes de EMC em pequenos equipamentos tais como telefones celulares [15] e calibração de pequenas antenas [16] [17].

A célula TEM de secção transversal retangular possui terminações que proporcionam o casamento dos modos TEM. Idealmente o sinal inserido através de um dos conectores deveria se propagar até o conector do lado oposto sem sofrer reflexão em nenhum ponto. Porém, o casamento vale apenas para o modo TEM, e outros modos tais como o TE (transversal elétrico) e o TM (transversal magnético) não são casados com a terminação projetada, causando a reflexão do sinal em seu interior. Assim, a célula passa a funcionar como uma cavidade ressonante observando-se o aumento da energia de outros modos diferentes do TEM tais como o TE e TM. Esses modos, por se refletirem nas terminações, prejudicam a uniformidade do campo no interior da célula que deixa de obedecer os critérios estabelecidos por normas. Diversas alternativas são sugeridas [6] [18] para atenuar esses modos e melhorar tanto a qualidade do campo TEM quanto a blindagem da célula a campos externos.

Entre as alterações sugeridas para o aumento da frequência de corte dos modos de ordem superior da célula TEM temos a diminuição das correntes na direção transversal (associadas ao modo TE) através do uso de fendas longitudinais nas placas inferior, superior e central [4] [6]. Essas fendas interrompem o caminho percorrido pelas correntes associadas a esse modo, atenuando-o. As tiras podem ser realizadas através de corrosão das placas de circuito impresso que podem ser usadas na construção da célula TEM. As

fendas nas placas superior e inferior têm a desvantagem de diminuir a blindagem a campos externos devido à retirada de metal. Para contornar esse problema, uma caixa metálica pode ser usada para envolver externamente a célula [6]. As fendas das paredes da célula recebem resistores para atenuação das correntes associadas aos modos indesejados de propagação. Dessa maneira, essas correntes podem ser atenuadas interrompendo-se o caminho percorrido por elas e dissipando-se parte desta potência em resistores conectados entre as laterais das fendas.

Em [6] foi sugerido também que próximo às paredes sejam colocadas bobinas para atenuar campos magnéticos que eventualmente se propaguem na direção longitudinal. A mesma publicação sugeriu também que nos cantos, paredes e interior da célula sejam colocadas barras de ferrite e espumas absorvedoras para atenuação dos campos magnéticos associados aos modos indesejados de propagação.

Assim, os artigos apresentam resultados melhores quando se compara uma célula sem as alterações propostas com outras que as incorporem, aumentando, em um dos casos, a frequência de operação de uma célula TEM de 1 GHz para até 2,5 GHz [6]. Essa célula possuía 29,6 cm de largura, 130 cm de comprimento e aproximadamente 20 cm de altura. A inclusão de resistores nas fendas também produziu bons resultados no desempenho dessa célula [6]. Em células GTEM, as espumas absorvedoras proporcionaram melhores resultados em frequências acima de 500 MHz [7], assim, espera-se que o uso dessas espumas absorvedoras faça efeito em células TEM também somente acima dessa frequência. Andrew J. Walters [4] inseriu duas fendas na placa central da célula para eliminar as correntes indesejadas. As fendas funcionam como antenas por alterar o caminho das correntes. A largura e comprimento dos cortes foram calculados para que a frequência de operação dessas antenas criadas correspondessem à frequência de primeira ressonância da célula. Essas fendas foram posicionadas no septo por ser esta a região onde ocorrem as correntes de maior intensidade na frequência de ressonância. O resultado obtido foi a redução de até 20 dB na primeira frequência de ressonância da célula [4].

Segundo K. Ishihara, M. Tokuda [19] apud Shaowei Deng, et al [6] a construção do septo com fios condutores no lugar de uma placa inteiriça, diminui as correntes transversais e atenua o modo TE

Para a verificação da impedância da célula TEM em cada posição da célula, pode-se usar o método TDR - Reflexão no Domínio do Tempo – conforme utilizado por Crawford [2]. Outra técnica que também pode ser utilizada é a reflexão sintética no

domínio do tempo ou STDR – “Synthetic Time Domain Reflectometry” – essa técnica foi utilizada por Borsero, M [20] através do uso de um analisador de rede vetorial (VNA) para medição de impedância de uma célula GTEM. A maioria desses analisadores permite a medida do coeficiente de reflexão e a determinação da impedância através de dados obtidos no domínio da frequência convertidos para o domínio do tempo através da transformada inversa de Fourier. Dessa maneira, pode-se descobrir em quais regiões da célula são necessárias alterações em sua geometria para correção da impedância característica. As medidas realizadas por Borsero mostram que o VNA é uma boa ferramenta para a verificação das imperfeições no casamento de impedâncias em células do tipo TEM ou GTEM.

1.3 Organização do trabalho

O presente trabalho está organizado de maneira a permitir ao leitor uma compreensão da necessidade do uso de células TEM em testes de compatibilidade eletromagnética, na compreensão da propagação dos campos em seu interior, na sua otimização para aumentar a uniformidade dos campos e a atenuação de modos de propagação diferentes do TEM e, finalmente, na otimização da construção das terminações entre o conector do cabo coaxial e a célula TEM.

Assim, o segundo capítulo deste trabalho apresenta os tipos de células TEM existentes hoje para a realização dos testes de compatibilidade eletromagnética.

O terceiro capítulo apresenta métodos de caracterização de células TEM. Entre as características mais importantes de uma célula TEM temos a sua impedância característica e a uniformidade dos campos em seu interior.

A impedância característica é medida em laboratório através de diversos métodos, entre eles temos o método da impedância de circuito aberto e curto-circuito, desenvolvido a partir da teoria de linhas de transmissão. São descritos em seguida o método da reflexão no domínio do tempo e o método da refletometria no domínio da frequência. Esses métodos têm a vantagem de informar o valor da impedância característica em cada ponto da linha de transmissão – informação útil para descobrir onde ocorrem imperfeições a serem corrigidas.

Ainda no mesmo capítulo descreve-se como determinar a área útil da secção transversal da célula em função da relação entre os campos desejado e o indesejado em seu interior - informação necessária para estabelecer a conformidade com a norma que versa sobre as células TEM. Um método alternativo para a determinação da faixa útil de operação de células TEM de duas portas é descrito em seguida.

A faixa para utilização da célula é limitada em função do surgimento de modos de propagação diferentes do TEM. Esses modos surgem em frequências que dependem das dimensões físicas da célula; assim, fórmulas dessas frequências de corte para células TEM simétricas fechadas são mostradas.

São mostrados detalhes do método numérico TDR simulado que obtém a impedância característica da célula projetada no software CST.

O capítulo 4 descreve técnicas de projeto de células TEM. O primeiro método de projeto, desenvolvido por Crawford [2], fornece o valor da impedância característica através de uma fórmula semi-empírica, isto é, um dos termos é obtido por tentativa e erro, tornando o método pouco eficiente na prática. Outros métodos são descritos com base em tabelas prontas cujas variáveis são as relações entre largura, distâncias entre placas e espessura da placa central.

Em seguida, a impedância é obtida através do método dos momentos, também descrito. Este método foi utilizado para o cálculo do campo elétrico em duas dimensões também.

O capítulo 5 descreve uma técnica para otimizar a uniformidade do campo magnético no interior da célula TEM em frequências nas quais se propagam modos diferentes do TEM. A corrente elétrica na direção associada ao modo indesejado TE é atenuada através do uso de fendas resistivas. São apresentados resultados de área útil da célula com maior uniformidade dos campos.

Por sua vez, o capítulo 6 apresenta resultados simulados e medidos em laboratório da perda de retorno da transição entre o conector do cabo coaxial e a célula TEM. São apresentadas três geometrias diferentes dessa transição, com o objetivo de diminuir as reflexões nessas terminações. Resultados de simulações são comparados. A transição otimizada mais simples foi construída e o valor da impedância característica foi medido com o TDR – reflexão no domínio do tempo - em laboratório. Finalmente, uma nova célula TEM foi simulada e construída com uso dessa nova transição. O desempenho dessa célula foi verificado em laboratório.

O último capítulo apresenta a conclusão e sugestões para novos trabalhos.

Capítulo 2 Células TEM/GTEM

Em 1974, Myron L. Crawford criou a célula TEM para testes de EMI e EMC [2]. É uma linha coaxial retangular com suas extremidades terminadas com resistências de 50 Ohms. Sua frequência de corte é limitada pela propagação de modos de ordem superior ao TEM que prejudicam a uniformidade dos campos especificada por normas.

2.1 A célula TEM fechada

A célula TEM criada por Crawford é fechada, isto é, o EUT permanece imune as interferências externas. O sinal é inserido através de um conector coaxial que liga o cabo coaxial à célula TEM. Esse sinal se propaga em seu interior até chegar à carga resistiva em outra terminação, idealmente, sem sofrer reflexão. Na prática, parte da onda é refletida nas terminações, viajando no sentido contrário, formando uma onda estacionária que prejudica as condições necessárias para testes descritos por normas de EMI/EMC. A figura 2.1 mostra a célula desenvolvida por Crawford. As duas aberturas da figura são utilizadas para a inserção do equipamento em seu interior.

Figura 2.1 – Célula TEM fechada desenvolvida por Crawford. Figura obtida de [2]

Algumas alterações foram realizadas no projeto original com o objetivo de aumentar o volume útil de teste [3] [7], entre elas o posicionamento do septo mais próximo de um dos condutores externos, tornando a célula assimétrica com uma das cavidades maior do que a outra, conforme mostrado na figura 2.2.

Figura 2.2: Perfil de célula TEM assimétrica estudada por V. H. A. E. Verhagen

Figura obtida de [3]

2.2 A célula TEM aberta

Uma célula TEM aberta é uma célula TEM que não tem as paredes laterais [21] [5]. O presente trabalho verificou em laboratório possíveis otimizações no projeto de uma célula TEM aberta simétrica existente no Laboratório de Antenas e Microondas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Pelo fato de a célula não possuir as paredes laterais o EUT em seu interior está sujeito a interferências externas e a própria célula TEM pode emitir campos para o ambiente. A sua vantagem em comparação às células fechadas é sua facilidade de construção, por não exigir a fabricação de uma porta blindada especial. Um exemplo deste modelo está mostrado na figura 2.3. Para maior aproveitamento do volume interno, é possível a construção de células TEM abertas assimétricas. Um exemplo de célula TEM assimétrica é estudado nos capítulos 5 e 6.

Figura 2.3 – Exemplo de uma célula TEM simétrica aberta. Figura obtida de Satav, S. [21]

2.3 A célula GTEM

A célula GTEM é uma variação da célula TEM assimétrica. Foi apresentada e patenteada por Hansen D. e Koenigstein D. [22] Uma de suas terminações é semelhante a de uma célula TEM utilizando um conector para cabo coaxial. A outra terminação é feita de espumas absorvedoras de campo para casamento da impedância em frequências altas. Esta variação permite que sejam realizados testes equivalentes aos testes de

campo aberto e especificados por normas de EMI/EMC. Este tipo de célula também apresenta limitações devido a propagação de outros modos. A figura 2.4 mostra uma célula GTEM [23] projetada por D.C. Pande e P.K. Bhatt com as espumas absorvedoras de campo deslocadas para melhor visualização de seu interior. Existem fórmulas aproximadas para o cálculo da impedância característica de uma célula GTEM em função de suas dimensões físicas conforme descrito em [23]. As fórmulas serão detalhadas nos capítulos seguintes.

Figura 2.4: Foto de célula GTEM mostrando as espumas absorvedoras de campo utilizadas em alta frequência.

Figura obtida de D. C. Pande [23]

2.4 Outros tipos de célula TEM

A célula TEM tridimensional desbalanceada (figura 2.5) é uma combinação de três células TEM [24]. Três campos TEM perpendiculares são acoplados proporcionando um volume de teste útil – com campos suficientemente uniformes - relativamente pequeno. A medida da potência total é obtida através da combinação de medidas das seis portas da célula, facilitando os testes, afinal, o EUT não precisa ser girado no interior da mesma. Uma desvantagem deste tipo de célula é que o espaço útil em seu interior é relativamente pequeno em comparação ao tamanho da célula.

Figura 2.5: Célula TEM tridimensional desbalanceada.
Projetada por Marco Klingler, Stéphane Egot, Jean-Pierre Ghys e Jean Rioult

Figura obtida de [24]

Uma evolução da célula TEM tridimensional desbalanceada é a célula TEM tridimensional balanceada - figura 2.6. Esta última apresenta melhor uniformidade do campo e um volume interno útil maior do que célula TEM tridimensional desbalanceada [24].

Figura 2.6 - Célula tridimensional balanceada projetada por Marco Klingler, Stéphane Egot, Jean-Pierre Ghys, and Jean Rioult.

Figura obtida de [24]

2.5 Outras variações de célula TEM

A célula SCTL, - ("straight coupled transmission-line") - linha de transmissão diretamente acoplada - mostrada na figura 2.7 é semelhante a célula TEM, porém, com dois septos.

Testes mostram que se pode obter maior banda de frequências e menor potência inserida para uma mesma intensidade de campo elétrico em seu interior, quando comparada com uma célula TEM de mesmo volume. Nesta célula, a potência é inserida em duas portas simultaneamente, enquanto as outras duas são terminadas com cargas de $50 \, \Omega$. Este tipo de célula tem maior uniformidade de campo e faixa de operação que uma célula TEM de secção transversal equivalente [25].

Figura 2.7 - Célula SCTL projetada por Jaehoon Yun , Hyuckjae Lee, and Hojung Hwang Figura obtida de [26]

Capítulo 3 Caracterização de células TEM

Uma vez construída, é necessário medir as características da célula TEM para verificar se elas correspondem às especificações. A impedância característica é uma das mais importantes características. Importante também é a razão entre o campo elétrico vertical pelo campo elétrico horizontal que deve ser no mínimo 6 dB na faixa de frequência de operação. Além disso, a uniformidade do campo vertical não deve variar mais que 6 dB na área útil de teste para apresentar conformidade com as normas que versam sobre sua utilização tal, como a IEC 61000-4-20 [1]. Nas próximas seções discutiremos sobre parâmetros distribuídos de linhas de transmissão.

3.1 Parâmetros distribuídos de linhas de transmissão

Linhas de transmissão são formadas por condutores separados por material dielétrico. Os condutores podem ser um par de fios, placas, cilindros paralelos ou concêntricos, entre outras configurações. Um modelo que utiliza teoria de circuitos com indutores, capacitores e elementos resistivos distribuídos pela linha é utilizado para compreensão do fenômeno das ondas que se propagam por ela. Existe uma relação entre o valor do campo elétrico e a diferença de potencial entre condutores, e uma relação entre o campo magnético e as correntes que passam por eles. A dedução das equações consiste na resolução de duas equações utilizando-se a lei dos nós e a lei das malhas no circuito da figura 3.1. Fazendo-se o comprimento Δz de um trecho da linha tender a zero e integrando-se as equações obtidas chega-se ao seguinte resultado [27]:

Figura 3.1: Circuito equivalente para uma linha de transmissão de comprimento diferencial Δz

$$V(z) = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z} \quad (1)$$

e

$$I(z) = I_0^+ e^{-\gamma z} - I_0^- e^{\gamma z} \quad (2)$$

sendo $V(z)$ e $I(z)$ a tensão e a corrente na linha, no ponto z . e

$$\gamma = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} = \alpha + j\beta \quad (3)$$

Sendo α a constante de atenuação em néper por metro e β a constante de fase em radianos por metro, γ é chamada constante de propagação. Os parâmetros distribuídos R , G , L e C são respectivamente a resistência, condutância, indutância e capacitância por unidade de comprimento.

A impedância característica da linha que é análoga a impedância intrínseca do meio é dada por

$$Z_0 = \frac{V_0^+}{I_0^+} = -\frac{V_0^-}{I_0^-} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (4)$$

Para cada linhas sem perdas com dielétrico homogêneo, vale também a relação

$$LC = \mu\epsilon \quad (5)$$

Sendo ϵ a permissividade elétrica e μ a permeabilidade magnética.

A velocidade de propagação da onda é dada por

$$v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (6)$$

3.1.1 Métodos de medida de impedância característica

3.1.1.1 Impedâncias de circuito aberto e de curto circuito

O método das impedâncias de circuito aberto e de curto circuito permite que se meça a impedância característica através de duas medidas específicas: uma com a linha terminada em aberto e outra com a linha terminada em curto-circuito.

Primeiramente, lembramos que a impedância de entrada de uma linha de transmissão de comprimento l terminada por uma impedância Z_l é dada por [27]:

$$Z_{entrada} = Z_0 \left[\frac{(Z_l + j \cdot Z_0 \tan \beta(l))}{Z_0 + j \cdot Z_l \tan \beta(l)} \right] \quad (7)$$

sendo Z_0 a impedância característica e β a constante de defasagem. Quando a linha está terminada em curto-circuito, a impedância na carga Z_l é nula, assim, a impedância de entrada de curto circuito da linha é dada por

$$Z_{curto-circuito} = \lim_{Z_l \rightarrow 0} Z(z) = Z_0 \frac{\lim_{Z_l \rightarrow 0} Z(z_l) + j \cdot Z_0 \cdot \tan(\beta \cdot l)}{Z_0 + j \cdot \lim_{Z_l \rightarrow 0} Z(z_l) \cdot \tan(\beta \cdot l)} = j \cdot Z_0 \cdot \tan(\beta \cdot l) \quad (8)$$

De maneira análoga, terminada por uma resistência infinita (linha terminada em aberto) apresenta uma impedância de entrada:

$$Z_{curto-circuito} = \lim_{Z_l \rightarrow \infty} Z(z) = Z_0 \frac{\lim_{Z_l \rightarrow \infty} Z(z_l) + j \cdot Z_0 \cdot \tan(\beta \cdot l)}{Z_0 + j \cdot \lim_{Z_l \rightarrow \infty} Z(z_l) \cdot \tan(\beta \cdot l)} = j \cdot Z_0 \cdot \tan(\beta \cdot l) \quad (9)$$

Multiplicando-se a equação 8 pela equação 9 obtemos:

$$Z_{curto-circuito} \cdot Z_{circuito-aberto} = Z_0^2 \quad (10)$$

Isto é, a impedância característica Z_0 fica determinada pela raiz quadrada do produto da impedância da linha em curto-circuito pela impedância da linha em circuito aberto.

$$Z_0 = \sqrt{Z_{curto-circuito} \cdot Z_{circuito-aberto}} \quad (11)$$

3.1.1.2 Reflexão no domínio do tempo

Esta técnica consiste em aplicar um pulso na entrada de uma linha de transmissão e medir a amplitude das ondas refletidas e o intervalo de tempo total da reflexão ao ponto de origem do pulso. Com essas informações, consegue-se o valor da impedância em cada ponto da linha. O método compara o valor do pulso E_i enviado na entrada da linha com o valor do pulso E_r refletido de volta à entrada. Conhecido o valor da velocidade de propagação da onda na linha e medido o intervalo de tempo de ida e volta da onda, consegue-se saber em qual local ocorre variação da impedância que causa reflexão de sinal.

O valor do coeficiente de reflexão Γ é dado pela razão entre a amplitude da onda refletida pela enviada:

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} \quad (12)$$

O tempo de viagem medido é referente à onda que percorreu o dobro da distância entre a entrada da linha de transmissão e o ponto onde ocorre reflexão do sinal. Assim a distância D entre a porta de entrada e o ponto onde ocorre o descasamento de impedância é dado por

$$D = \frac{c \cdot T}{2} \quad (13)$$

sendo c a velocidade da luz na célula TEM e T o intervalo de tempo de ida e volta da onda. É possível também obter o valor da impedância no local onde ocorreu a reflexão uma vez conhecidos os valores da impedância característica da linha Z_0 e do coeficiente de reflexão Γ , pois

$$Z_L = Z_0 \frac{(1 + \Gamma)}{1 - \Gamma} \quad (14)$$

Esta técnica no domínio do tempo é utilizada nos equipamentos chamados TDR “*Time Domain Reflection*” ou reflexão no domínio do tempo - sendo útil em projeto de células TEM, GTEM, guias de onda e detecção de defeitos em cabos coaxiais [28].

3.1.1.3 Refletometria no domínio da frequência

Esta técnica utilizada no analisador de rede vetorial informa o valor do coeficiente de reflexão na entrada da linha no domínio da frequência de maneira mais precisa que a técnica TDR. Varre-se uma faixa de frequências na entrada da linha de transmissão e o sinal refletido é medido. Através da IFFT (Transformada Rápida de Fourier Inversa) consegue-se a informação do sinal no domínio do tempo.

3.2 Uniformidade dos campos

A distribuição dos campos no interior da célula TEM não é perfeitamente uniforme, sendo mais intenso na região central da câmara [29] [30]. A variação da intensidade do

campo não deve ser maior que 6 dB conforme a norma IEC61000-4-20 [1]. Além disso, o equipamento deve estar em uma região específica da célula TEM conforme descrito na próxima seção.

3.2.1 Determinação do volume interno útil em células TEM

A norma 61000-4-20 [1] que versa sobre testes de emissão em células TEM descreve um método para determinação do volume interno útil (figuras 3.2 a 3.5) de células TEM e GTEM. O volume máximo aceitável para um EUT é função do volume interno útil, assim, a largura do EUT não deve ultrapassar 60% da largura do mesmo. Da mesma maneira, o comprimento do EUT também não pode ultrapassar 60% do comprimento do volume interno útil para células TEM simétricas em cortes longitudinal e transversal conforme mostrado respectivamente nas figuras 3.2 e 3.3. A figura 3.4 mostra a célula GTEM em corte longitudinal. A altura do EUT, por sua vez, não deve ultrapassar um terço da distância entre o septo e o condutor inferior da célula TEM conforme evidenciado na figura 3.5.

Para se determinar o volume interno útil da célula, é necessário determinar a área útil definida por um plano perpendicular ao plano de propagação da onda TEM a diversas distâncias do conector por onde é inserido o sinal. Este processo deve ser repetido algumas vezes em distâncias diferentes do primeiro plano já determinado. São estes os planos que determinam o volume interno útil em questão, lembrando ainda que o volume do equipamento de teste não pode ser maior do que aquele especificado no início desta seção. No plano resultante desse processo o campo elétrico deve ser medido em um número determinado de pontos que é função das dimensões da célula conforme a tabela 1. O campo vertical deve estar no mínimo 6 dB acima do campo horizontal para 75% dos pontos medidos no plano. A faixa de frequências de teste inicia-se em 30 MHz e termina na faixa de frequências em que se deseja utilizar a célula.

Finalmente, é necessário verificar também se neste plano a intensidade do campo elétrico vertical não está variando mais do que 6 dB em pelo menos 75 % dos pontos da tabela 1. Esta área uniforme é válida somente para a distância em que foi medida.

Dimensões da área útil. Altura e largura.	Número de pontos uniformemente distribuídos no plano a serem medidos	Número de pontos que devem satisfazer o critério 0 a -6 dB
1,5 m x 1,5 m	$4 \times 4 = 16$	12
1,0 m x 1,5 m	$3 \times 4 = 16$	9
1,0 m x 1,0 m	$3 \times 3 = 9$	7
0,5 m x 1,0 m	$2 \times 3 = 6$	5
0,5 m x 0,5 m	$4 + 1$ (central) = 5	4
0,25 m x 0,25 m	$4 + 1$ (central) = 5	4

Tabela 1: Número de pontos a serem calibrados para área uniforme em células TEM e GTEM [1]

Figura 3.2: Determinação da área de campo uniforme em células TEM simétricas
Figura obtida da IEC6100-4-20 [1]

Figura 3.3: Determinação do volume de teste e do máximo tamanho do EUT permitido, para células TEM simétricas

Figura 3.4: Determinação da área de campo uniforme em células GTEM
Figura obtida da IEC6100-4-20 [1]

Figura 3.5: Determinação do volume de teste e do máximo volume permitido para o EUT

Figura obtida da IEC6100-4-20

3.3 Um critério opcional para determinação da faixa de frequências em células TEM

Outro critério para determinação da faixa de frequências em células TEM de duas portas consiste em determinar a faixa de frequência para a qual a equação 15 é obedecida, com o EUT desligado e inserido no guia de onda:

$$A_{loss} = \left| 10 \log \frac{P_{refletida} + P_{saida}}{P_{inserida}} \right| \leq 1 \text{ dB} \quad (15)$$

Sendo $P_{inserida}$ a potência inserida na porta de entrada, P_{saida} a potência medida na porta de saída e $P_{refletida}$ a potência refletida na porta 1. Finalmente, A_{tloss} é a perda de transmissão do guia de onda em dB.

3.4 Limitações de uso de células TEM

As células TEM tem faixa de frequência de uso limitada pela propagação de modos diferentes do TEM. Esse modos surgem em frequências que são função das dimensões físicas da célula.

3.4.1 Frequência de Corte de Modos de Propagação de Ordem Superior

Com o aumento da frequência do sinal inserido na célula TEM, outros modos diferentes do TEM passam a se propagar, conseqüentemente, o critério para o volume útil de teste exigido pela norma IEC61000-4-20 [1] deixa de ser obedecido.

Para células TEM fechadas simétricas, os modos de propagação $TE_{m,2n}$ e $TM_{m,2n}$ não são alterados pela posição da placa central [31] , assim são obtidas diretamente da teoria de guias de onda e dadas pela equação :

$$F_{corte(m,n)} = \frac{c \sqrt{b^2 m^2 + W^2 n^2}}{2bW} \quad (16)$$

sendo m e n números inteiros correspondentes ao modo de propagação, c a velocidade da luz no vácuo, W a largura da célula e b a sua altura conforme figura da figura 3.6 sendo a espessura t desprezível.

Figura 3.6: Secção transversal de célula TEM simétrica fechada

Figura obtida de [2].

Para a célula TEM, a primeira frequência de corte em geral corresponde ao modo TE_{10} . Assim, a equação 16 fica simplificada para a equação :

$$F_{\text{corte}(1,0)} = F_{10} = \frac{c}{2W} \quad (17)$$

Isto é, a frequência de corte é função da largura da célula, sua maior dimensão física.

3.4.2 Frequência de ressonância

A célula TEM fechada pode ser considerada como uma câmara reverberante com alto fator de qualidade. Isto é, ela ressoa em frequências bem definidas. Assim, PERRY F. WILSON [32] descreveu fórmulas aproximadas para calculá-las. Uma vez que as ressonâncias prejudicam as condições de testes especificadas por normas, o autor sugere que a célula poderia ser usada nos intervalos entre essas ressonâncias. Esse cálculo possui um fator de correção que é função das dimensões da célula e do modo de ressonância.

3.5 Caracterização numérica

O software CST Studio foi utilizado para simular a célula TEM. Através dele foram obtidos valores da perda de retorno, perda de inserção, intensidade do campo eletromagnético, do VSWR e impedância da célula TEM. Este software utiliza o método da integração finita [33].

O método da integração finita é um método numérico que prevê o valor do campo elétrico e magnético das estruturas simuladas através de um conjunto de equações análogas às equações de Maxwell na forma integral. As equações resultantes do método da integração finita são idênticas às equações resultantes do método FDTD - “Diferenças finitas no domínio do tempo” [34] - em muitos casos [35].

3.6 Simulação da reflexão no domínio do tempo

O software CST permite realizar a simulação do método TDR, estimando a impedância em diferentes pontos da estrutura. Para se obter uma certa resolução, calcula-se a frequência máxima de operação em função da velocidade da onda no meio e do tempo de subida de um pulso retangular. A resolução é função da distância percorrida

pela onda durante o tempo de subida do pulso. Caso o pulso utilizado seja o Gaussiano, a frequência máxima para simulação é dada pela fórmula:

$$F_{\text{máx}} = \frac{0,876}{T_{\text{subida pulso retangular}}} = 0,876 \cdot \frac{c}{\Delta z} \quad (18)$$

sendo c a velocidade da luz e Δz o tamanho da resolução espacial desejada [43]. Assim, deve-se ajustar a frequência máxima das simulações para que o método TDR simulado satisfaça a resolução espacial desejada. Assim, para que se consiga uma resolução espacial de 8,7 cm é necessário estender a frequência máxima de simulação para 3 GHz para medidas no espaço livre.

Capítulo 4 Técnicas de projeto

4.1 Dimensionamento da geometria da célula TEM

Diversos autores descrevem fórmulas para a obtenção da impedância característica para projeto de células TEM. Crawford [2] apresenta uma fórmula para a impedância característica de células TEM simétricas fechadas que é dada por

$$Z_0 \approx \frac{94.15}{(\epsilon_r)^{1/2} \frac{w}{b(1-t/b)} + \frac{C^f}{0.0885 \epsilon_r}} (\text{ohms}) \quad (19)$$

Esta equação contém uma capacitância que funciona como fator de correção, mas que não fornece uma maneira prática ao projetista para a construção da célula, uma vez que o valor desta capacitância é obtido experimentalmente durante a construção da célula em um processo iterativo de medição e remodelamento desta. Os parâmetros geométricos da célula se referem à figura 4.1, sendo w a largura do septo, t a espessura do septo, W a largura da célula e b a altura da célula.

Figura 4.1: Corte transversal de uma célula TEM

Figura obtida de [2].

Outros autores fornecem fórmulas analíticas para o cálculo da capacitância por metro da célula TEM. O artigo de T. Chen [36] calcula a capacitância total por metro da linha de transmissão com o condutor central com auxílio da capacitância de franja – C^f . Por sua vez, H. Riblet [37] realiza o cálculo da capacitância total por metro da linha através de transformação conforme. Tippet e J.C [38] calculam a capacitância total de maneira aproximada através da transformação de Schwarz–Christoffel [38]. As fórmulas são complexas, assim, Weil, C.M [39] publicou uma série de curvas para simplificar o projeto

de uma célula TEM. Um gráfico relaciona a impedância característica desse tipo de célula a valores das dimensões físicas tais como largura e distâncias entre placas e espessura da placa central, conforme a figura 4.2.

Figura 4.2 - Gráfico que relaciona a impedância característica de células TEM com valores da largura e espessura do septo, largura e distância entre as placas paralelas. Valores para $t/b \leq 0.1$, sendo t a espessura da placa central e b a altura da célula TEM fechada.

Figura obtida de [39]

Para se obter maior volume útil para testes de EMI/EMC em células TEM, podem-se utilizar células TEM assimétricas conforme proposto por V. Verhagen [3]. Nesse tipo de célula, o septo separa as câmaras em volumes diferentes. A sua impedância característica pode ser calculada através de métodos numéricos como por exemplo, através do método dos momentos explicado a seguir.

4.2 Dimensionamento da célula TEM através do Método dos Momentos

O método dos momentos [40] [41] [34] apresenta uma forma prática para o dimensionamento de uma célula TEM simétrica ou assimétrica.

Neste método a incógnita é a distribuição da carga em cada ponto das paredes condutoras. Primeiramente deve-se determinar, através do MoM, a capacitância por metro

de comprimento entre o septo e as placas externas da célula. Em seguida, o valor de Z_0 é determinado por

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\sqrt{\mu_0 \cdot \epsilon_0}}{C} = \frac{I}{v \cdot C} \quad (20)$$

Esse cálculo foi realizado através de um código escrito em Matlab (incluído no apêndice A) por Trintinalia, Luiz C.

Observa-se que, com esse método deve-se variar as dimensões da célula e repetir-se as simulações até que se obtenha o valor de Z_0 desejado.

O corte transversal de uma célula TEM foi simulado em duas dimensões através do método do momentos – MoM. Esse método é relativamente rápido em comparação aos métodos tridimensionais para o cálculo da impedância característica da secção transversal da célula tal como o método da integração finita. Através desse método foi possível prever as larguras das placas e as distâncias entre elas que garantem uma impedância característica de 50 Ohms – valor utilizado pela maioria dos equipamentos de microondas. A figura 4.3 mostra o perfil simulado.

Figura 4.3: Perfil da célula TEM simulado pela Método dos Momentos

Figura 4.4: Valor dos potenciais no célula TEM assimétrica calculada pelo Método dos Momentos

A figura 4.4 evidencia a função potencial no interior da célula através do MoM. A placa central tem o potencial de 1 Volt. As curvas equipotenciais de valores menores aparecem mais distantes da placa.

O valor do campo elétrico na célula TEM foi obtido a partir do gradiente do potencial conforme ilustrado na figura 4.6, que mostra o campo elétrico com uniformidade de 2 dB no interior da célula. Idealmente deveria existir apenas o campo elétrico na direção vertical sem a existência de campo elétrico na direção transversal ou longitudinal. A figura 4.5 mostra o campo elétrico indesejado na célula TEM.

Figura 4.5: Campo elétrico indesejado na direção transversal. As curvas em que a intensidade do campo horizontal são 0, 10 e 20 decibéis inferiores à intensidade do campo vertical.

Figura 4.6: Campo elétrico e região da célula TEM. Curvas com indicação +2 dB e -2 dB comparam o campo por onde passam com a região central da célula.

Capítulo 5 Otimização da uniformidade do campo magnético com uso de fendas resistivas

5.1 Introdução

A célula TEM – transversal eletromagnética – criada por Crawford [2] é adequada às normas de compatibilidade eletromagnética tal como a IEC 61000-4-20 e apresenta uma boa alternativa para testes, sendo economicamente mais viável do que as câmaras anecóicas, em especial para equipamentos pequenos tais como um telefone celular. Em seu interior a onda eletromagnética propaga-se no modo TEM, que não apresenta campo elétrico ou magnético na direção de propagação. Idealmente somente este modo deveria se propagar, porém com o aumento da frequência do sinal propagado em seu interior observa-se a presença de modos de ordem superior. Esses modos distorcem a uniformidade dos campos [42] deixando de atender à referida norma. Além disso, a frequência de corte desses modos é inversamente proporcional às dimensões da célula, limitando seu uso para equipamentos de maiores dimensões. Assim, este capítulo descreve uma técnica para atenuar modos de propagação de ordem superior que distorcem a uniformidade dos campos. Essa técnica procura atenuar a corrente elétrica associada ao campo magnético na direção de propagação H_z , com o intuito de se estender a faixa de frequência de utilização da célula. O uso de resistores e fendas em uma célula TEM fechada simétrica foi proposto por Shaowei Deng et.al [18]. Este capítulo mostra seu uso em células TEM assimétricas abertas.

Nota-se que a célula TEM assimétrica torna-se economicamente vantajosa em relação à simétrica por utilizar menor quantidade de material em sua construção para a mesma área útil de teste (considerando-se a seção transversal da maior câmara da célula assimétrica).

5.2 Propagação de modos de ordem superior

Uma célula TEM assimétrica foi simulada usando o software CST Microwave Studio. A célula simulada – figura 5.1 – possui 1,65 m de comprimento. A distância entre as placas paralelas que limitam a cavidade menor é de 11,2 cm e a distância entre as placas que limitam a outra cavidade é de 29,8 cm. A largura da placa intermediária (septo) é de 37,6 cm e a largura das placas superior e inferior é de 65 cm cada uma - figura 5.2. A célula possui impedância característica de 50 Ohms e foi simulada utilizando-se um material perfeitamente absorvedor no plano z onde as três placas paralelas terminam abruptamente no lado oposto da transição triangular, reduzindo assim a reflexão de ondas.

Figura 5.1: - Posição dos “probes” no plano $z = 75$ cm da célula sem as fendas.

Figura 5.2: Célula TEM simulada com o uso de fendas resistivas.

Em baixa frequência o modo de propagação dominante é o TEM. As figuras 5.3, 5.4 e 5.5 mostram as componentes na direção x (transversal), y (vertical) e z (longitudinal) respectivamente na frequência de 100 MHz do campo magnético. Observa-se que a componente transversal (direção x) do campo magnético predomina em grande parte na região central da célula, como esperado para o modo TEM. Porém com o aumento da frequência surgem outros modos de propagação que causam a deformação dos campos e a consequente diminuição da área útil de testes. Esse efeito pode ser observado para a frequência de 630 MHz nas figuras 5.6, 5.7 e 5.8 para as componentes x, y e z respectivamente. Estes gráficos comparam a intensidade do campo em cada ponto com a intensidade do campo onde ele é mais intenso. Assim, as curvas com os valores 3, -3, 6 e -6 indicam a variação do campo em relação a região central da célula no mesmo plano.

Podemos ver que, agora, existe uma componente de campo magnético da direção z e que o campo na direção x não é mais tão uniforme quanto em 100 MHz.

Simula-se então, para as frequências de 0 até 900 MHz a estrutura da figura 5.2 plotando-se a intensidade da componente x da corrente no septo em diferentes posições.

Figura 5.3: Campo magnético na direção x no plano situado em $z = 75$ cm na frequência de 100 MHz na célula TEM sem fendas.

Figura 5.4: Campo magnético na direção y no plano situado em $z=75$ cm na frequência de 100 MHz na célula TEM sem fendas.

Figura 5.5: Campo magnético na direção z no plano situado em $z=75$ cm na frequência de 100 MHz na célula TEM sem fendas.

Figura 5.6: Campo magnético na direção x em 630 MHz sem uso de fendas resistivas.

Figura 5.7: Campo magnético na direção y em 630 MHz sem o uso de fendas resistivas.

Figura 5.8: Campo magnético na direção z em 630 MHz sem o uso de fendas resistivas.

Os gráficos obtidos estão mostrados na figura 5.9. Essas correntes deveriam ser nulas para modos TEM. Observa-se porém que as correntes na direção x associadas a modos de propagação diferentes do TEM tornam-se mais intensas a partir de 200 MHz aproximadamente.

Assim, foi escolhida uma região para a abertura de fendas resistivas com objetivo de atenuar as correntes elétricas associadas aos modos de propagação de ordem superior [4]. Foi observado que em 800 MHz a intensidade das correntes é maior à distância de 14,2 cm do eixo de simetria da célula e, nessa mesma região, ela é também bastante intensa em 630 MHz.

Dessa maneira, foi essa a distância escolhida para a localização das fendas resistivas com o intuito de atenuar as correntes associadas a modos de propagação de ordem superior para ampliar a faixa de operação da célula e sua área útil.

As fendas resistivas são paralelas no septo, mas passam a convergir para o eixo central na região triangular do mesmo acompanhando a direção das correntes associadas ao

modo TEM e atenuando as correntes associadas a outros modos que ocorrem nessa região conforme mostrado na figura 5.10.

5.3 Resultados da célula assimétrica com fendas

O campo magnético foi então monitorado em diversos “probes” posicionados como mostrado na figura 5.1. para toda faixa de frequência simulada para a célula com e sem fendas resistivas. O valor da resistividade das fendas é de 0.3 S/m. A largura das fendas é de 1 cm.

Figura 5.9: Intensidade das correntes elétricas no septo, associadas ao campo magnético na direção de propagação. A origem está no eixo de simetria da placa central

Figura 5.10: Septo da célula TEM com as fendas resistivas e posição $(x;y;z) = (0;0;0)$

Plotou-se então o gráfico da figura 5.11. Esse gráfico mostra a razão entre o campo magnético desejado na direção x (H_x) e os campos magnéticos indesejados nas direções y e z (H_y e H_z respectivamente). Esta razão é dada pela fórmula:

$$\frac{H_x}{\sqrt{H_y^2 + H_z^2}} \quad (21)$$

Figura 5.11: Gráfico da relação entre o campo magnético desejado e o indesejado. Ponto $(x;y;z) = (-9,4;-23;75)$ em cm ("probe" número 7). Separando as estrutura com e sem fendas.

Vemos que a razão entre o campo magnético desejado na direção x e os campos magnéticos indesejados nas direções y e z foi aumentada com a inclusão das fendas. Pode-se observar que no ponto $(x;y;z) = (-9,4;-23;75)$ em cm ("probe" número 7 da figura 5.12), a partir de 450 MHz até 630 MHz e mais significativamente acima de 720 MHz, há uma sensível melhora. Essa melhora chega a 8.5 dB em 800 MHz e ocorreu porque as

fendas foram posicionadas a 14.2 cm do eixo de simetria do septo com intuito de atenuarem as correntes de maior intensidade associadas ao campo magnético na direção de propagação nessa frequência.

Figura 5.12: Localização dos “probes” na célula TEM. O de número 5 possui coordenadas $(x;y;z) = (0;-15,4;75)$.

As figuras 5.13 e 5.14 mostram a relação entre o campo magnético desejado e o indesejado sem e com fendas respectivamente. Observou-se que ocorreu aumento da área útil (região em que a razão entre os campos magnéticos desejado e o indesejado é maior que 6 dB) para o campo magnético na frequência 630 MHz. A área útil com o uso de fendas resistivas aumentou 13,14% de 704 cm² para 797 cm² - figuras 5.13 e 5.14 - sempre considerando somente a região interna abaixo do septo da maior câmara da célula TEM.

Figura 5.13: Relação entre o campo magnético desejado e o indesejado em 630 MHz sem uso de fendas resistivas.

Figura 5.14: Relação entre o campo magnético desejado e o indesejado em 630 MHz com uso de fendas resistivas.

A figura 5.15 mostra a componente desejada na direção x do campo magnético da célula TEM com as fendas em 630 MHz. Comparando-se essa figura com a figura 5.6 (sem fendas), verifica-se que a região de campo uniforme entre +3 dB a -3 dB foi ampliada de maneira significativa com o uso das fendas.

Figura 5.15: Campo magnético na direção x em 630 MHz com uso de fendas resistivas

A figura 5.16 mostra a componente indesejada do campo magnético na direção y. Comparando-se essa figura com a figura 5.7 (sem fendas) verifica-se que a componente indesejada do campo magnético na direção y não sofreu mudança significativa nessa região

Com Fendas - Campo Magnético (dB) na direção y :630 MHz

Figura 5.16: Campo magnético na direção y em 630 MHz com o uso de fendas resistivas.

Finalmente, a figura 5.17 mostra a intensidade da componente z do campo magnético nessa mesma frequência com o uso de fendas. Comparando essa figura com a figura 5.8 vemos que ocorreu uma diminuição do campo magnético indesejado na direção z de maneira significativa com o uso das fendas resistivas.

Figura 5.17: Campo magnético na direção z em 630 MHz com o uso de fendas resistivas.

As simulações mostram portanto que o uso de fendas resistivas proporciona uma atenuação do campo magnético não associado ao modo TEM.

5.4 Conclusão

Observou-se que as fendas resistivas aumentaram a área útil do campo magnético, considerando-se o critério de campo desejado 6 decibéis acima do campo indesejado. Aumentou também a uniformidade do campo magnético desejado (H_x) para frequências na faixa de 400 a 630 MHz.

Capítulo 6 Construção do protótipo e comparação dos resultados medidos com simulados

6.1 Protótipos construídos

O primeiro protótipo foi construído por Massaroppe, L. e Oliveira, L. M. em trabalho de conclusão de curso [5]. O protótipo foi construído com placas de alumínio e é ilustrado na figura 6.1. As dimensões são 1,85 m de comprimento, 50 cm de altura e 50 cm de largura. A placa central tem largura de 45 cm e as distâncias entre a placa central e as placas superior e inferior são de 13 cm e 33 cm respectivamente. Um conector tipo N foi colocado em cada uma das duas terminações da célula TEM. Esta célula simulada no software CST é ilustrada da figura 6.2. A transição desta célula foi otimizada e é descrita nas próxima seções.

Figura 6.1: Célula TEM assimétrica aberta construída

Figura 6.2: Célula TEM assimétrica original simulada

6.1.1 A transição entre o conector e a célula TEM

A onda proveniente do gerador de sinais propaga-se pelo cabo coaxial em direção à célula TEM. Parte de sua potência é refletida de volta ao gerador quando varia a impedância do meio por onde ela passa. Idealmente, a onda deveria se propagar por um meio de impedância constante, porém, na prática, sempre existe alguma variação neste valor no caminho percorrido por ela.

No caso dessa célula TEM, a maior variação da impedância ocorre na transição entre o conector tipo N e a célula TEM. A figura 6.3 mostra a transição que precisa ser otimizada. Por sua vez, a figura 6.4 mostra a mesma transição da célula original que foi simulada no software CST.

Para o primeiro protótipo, nessa transição, a impedância chega a 80 Ohms (figura 6.5). Idealmente, esse valor deveria se manter constante em 50 Ohms, que é o valor da impedância da célula TEM. Esses valores foram medidos com uso do osciloscópio digital 11801B Tektronix utilizando-se a técnica TDR. Essa figura apresenta dois picos na posições referentes a cada uma das transições dos conectores tipo N existentes na célula TEM original. Cada um dos picos indicam a variação da impedância em cada uma das transições.

Para se conseguir alcançar os resultados otimizados, foram realizadas simulações utilizando o software CST para diminuir a variação da impedância nessas transições.

Figura 6.3: Transição entre o conector tipo N e a célula TEM assimétrica aberta construída

Figura 6.4: Transição entre o conector tipo N e a célula TEM assimétrica aberta simulada.

A figura 6.8 detalha a transição mais simples otimizada. Ela foi construída com um conector tipo N que possui o condutor central envolvido por um cilindro de teflon com 7 mm de diâmetro. As placas superiores são apoiadas no cilindro de teflon e soldadas no condutor externo do conector. A distância entre as placas externas é de 7 mm, no início da transição. A largura inicial dessas duas placas externas é de 25 mm. O condutor central da célula TEM foi construído com 6,65 mm de largura, e é ligado ao condutor central do conector. O ângulo de abertura entre a placa superior e a placa central é 11 de graus, por sua vez, o ângulo de abertura entre a placa inferior e a placa central é 30 de graus.

Figura 6.8: Dimensões da transição otimizada.

Final da transição.

Variação da impedância na transição do conector tipo N Com 57 Ohms.

Figura 6.9: Medida da impedância através do TDR da transição melhorada. O valor da impedância varia de 57,52 Ohms até 49,00 Ohms.

A impedância dessa transição otimizada foi medida em laboratório. A figura 6.9 ilustra que o valor da impedância medido com o osciloscópio digital 11801B Tektronix utilizando-se a técnica TDR variou de 49 a 57,52 Ohms. Esse resultado é melhor que o apresentado pelas medidas da transição existente na célula original, sem otimização.

Após a comprovação em laboratório do melhor desempenho da transição otimizada, foi simulada e construída uma célula TEM com essa transição que será detalhada na seção 6.4.

Uma segunda opção de transição otimizada foi projetada com auxílio de simulações no software CST. Essa transição contém uma dobra adicional nas placas externas e um recorte na placa central conforme ilustrado na figura 6.10. Essa transição foi projetada para diminuir a variação da impedância na transição do conector tipo N e as placas paralelas da célula TEM.

Comparações do desempenho da transição original com as duas opções de transições otimizadas são realizadas na próxima seção.

Figura 6.10: Transição melhorada que apresenta menor perda de retorno em simulações.

a) vista lateral

b) vista superior do septo

6.3 Comparação de desempenho das transições otimizadas com a transição original

Foram realizadas simulações com o software CST da transição original e das duas opções de transições otimizadas. Para cada transição, foram simulados e comparados os valores da perda de retorno da transição isolada com o valor da perda de retorno da célula TEM completa - simulada com a respectiva transição.

Assim, a figura 6.11, ilustra a perda de retorno - obtida por simulação - da transição original sem otimização e perda de retorno da célula TEM simulada com a mesma transição.

Figura 6.11: Perda de retorno da transição original e da célula TEM que a utiliza.

Em seguida, a figura 6.12 ilustra a perda de retorno - obtida por simulação - da primeira transição otimizada (sem dobras nas placas externas ou recortes na placa central) e a perda de retorno da célula TEM simulada com a essa mesma transição otimizada.

Figura 6.12: Perda de retorno da primeira transição otimizada e de célula TEM que a utiliza.

Por sua vez, a perda de retorno - obtida por simulação - da segunda alternativa de transição otimizada (que contém dobras nas placas externas e recortes na placa central) é comparada com a perda de retorno da célula TEM simulada com a essa mesma transição otimizada (figura 6.13).

Figura 6.13: Perda de retorno da transição otimizada com uma dobra nas placas externas e recorte na placa central e perda de retorno da célula TEM que a utiliza.

Observando os últimos três gráficos referentes ao desempenho das três transições, observa-se que as duas alternativas de transição otimizadas possuem melhor desempenho que a transição original. Isto é, a perda de retorno nas células TEM que utilizam as transições otimizadas é inferior àquela apresentada pela célula TEM original.

Em um mesmo gráfico (figura 6.14) compara-se o valor da perda de retorno medido em laboratório da célula TEM original sem otimização, construída em alumínio, com a sua

respectiva simulação - também sem otimização. Ainda no mesmo gráfico, para comparação dos resultados, é sobreposto o valor da perda de retorno de uma célula TEM simulada com a primeira alternativa de transição otimizada. Finalmente, a perda de retorno da segunda alternativa de transição otimizada é sobreposta. Esse gráfico evidencia o desempenho superior da célula TEM construída com a primeira alternativa de otimização em toda faixa de frequência. Por sua vez, a célula construída com a segunda alternativa de transição (figura 6.15) também apresenta um desempenho superior ao apresentado pela célula TEM original sem otimização, e superior ao desempenho da célula TEM construída com a transição otimizada mais simples, em especial em frequências mais altas.

Observa-se também, nesse gráfico, que a perda de retorno obtida na simulação da célula TEM original, sem otimização, apresenta um desempenho inferior ao da célula TEM original sem otimização, medido em laboratório. Isto é, os resultados medidos em laboratório apresentam um desempenho um pouco superior ao observado em simulações. Isto se deve ao fato de que os materiais simulados possuem perdas que não são idênticas às perdas dos materiais reais.

Figura 6.14: Comparação da perda de retorno de células TEM assimétricas com diferentes transições simuladas e valor de perda de retorno de célula TEM medido em laboratório.

Figura 6.15: Célula TEM assimétrica com transição que possui menor variação da impedância entre o conector tipo N e as placas paralelas.

6.4 O protótipo construído com a transição otimizada

Um protótipo foi construído com a primeira alternativa de transição otimizada, conforme ilustra a figura 6.16.

Figura 6.16: Célula TEM assimétrica com 92,5 cm de comprimento construída com a transição simples melhorada.

Este protótipo tem metade da altura, largura e comprimento do primeiro protótipo construído em alumínio. A transição entre o conector tipo N e a célula TEM tem as mesmas dimensões nos dois protótipos.

A perda de retorno medida em laboratório desse protótipo foi comparada com a perda de retorno da célula de mesmo tamanho simulada. A figura 6.17 mostra que a perda

Figura 6.17: Perda de retorno da célula TEM de 92,5 cm de comprimento simulada e construída com a transição simples melhorada.

de retorno do protótipo da célula TEM construído com a transição otimizada é compatível com os resultados obtidos em simulações. Dessa maneira fica evidenciado que a transição otimizada apresentou um desempenho superior à transição original. Nota-se que existe diferença na perda de retorno em cada uma das duas portas da célula TEM

otimizada. Essa diferença ocorre devido a pequenas diferenças na construção das duas portas.

O valor da perda de inserção que também foi medido em laboratório confirmou os resultados obtidos em simulações, apresentando resultados próximos, conforme mostrado na figura 6.18.

Figura 6.18: $|S_{12}|$ da célula TEM pequena com transição melhorada. Valores simulados e medidos em laboratório.

Capítulo 7 Conclusão

Este trabalho apresentou um estudo sobre células TEM ressaltando suas principais características, vantagens e limitações. Foram apresentadas técnicas de projeto de células TEM. Dentre as técnicas, foram apresentadas tabelas pesquisadas na bibliografia para o seu dimensionamento em função da impedância característica. Foi apresentada também para o seu projeto, uma técnica numérica que utiliza o método dos momentos. Esse método permite o cálculo da impedância característica em função das dimensões da secção transversal da célula TEM. Além disso, esse método simulou a configuração do campo elétrico e magnético no interior da célula quando o modo de propagação dominante é o TEM.

Para a previsão dos campos em frequências de operação mais elevadas, foi utilizado o software CST Microwave Studio que utiliza o método da integração finita. Este software permitiu a simulação dos campos no interior da célula TEM em frequências acima da frequência de corte de modos de propagação distintos do modo TEM. Essas simulações foram necessárias para aplicar técnicas de otimização em células TEM.

Entre elas, foram utilizadas técnicas de atenuação das correntes associadas aos modos de propagação distintos do TEM. Isto foi possível através da inserção de fendas resistivas em regiões onde essas correntes ocorrem. Essa atenuação permitiu um aumento da área com campo magnético uniforme na secção transversal da célula. Dessa maneira, foi obtido aumento da área útil (região em que a razão entre os campos magnéticos desejado e o indesejado é maior que 6 dB) para o campo magnético.

Outra otimização foi realizada na transição entre o conector coaxial e a célula TEM. Essa região apresentava grande variação de impedância que diminuía a potência inserida em seu interior e gerava uma onda estacionária que prejudicava a uniformidade dos campos.

Para se conseguir isso, foram simuladas diversas transições em células TEM. A solução otimizada obtida destas simulações foi medida em laboratório confirmando os resultados simulados. Em seguida, foram realizadas simulações de célula TEM com a transição otimizada. Entre os resultados simulados, foi obtido um valor de perda de retorno de 10 dB. Finalmente, foi construído um protótipo de TEM célula assimétrica aberta de 91 cm de comprimento por 25 cm de largura e 23 cm de altura utilizando-se a transição otimizada. As medidas em laboratório apresentaram valores de perda de retorno

um pouco melhores do que aqueles resultantes das simulações, inferiores a 10 dB até a frequência de 3 GHz.

São propostas para trabalhos futuros:

- Simulações e medidas em laboratório do desempenho da célula TEM assimétrica aberta otimizada, com e sem o EUT.
- Aprimoramento de técnicas de atenuação de modos não TEM em células TEM por exemplo utilizando-se material absorvedor.

Apêndice A

Código em Matlab para cálculo da impedância característica e dos campos da secção transversal de uma célula TEM assimétrica ou simétrica

% calculo de capacitancia e Z0 de uma linha de placas paralelas

$$\% \leftarrow \text{w1} \rightarrow$$
% Λ

0%

% | h1

%

% y

$$\frac{\%}{\text{<---w2--->}} \wedge$$

% lh2

%

$$\% \quad \leftarrow \text{----- } w_3 \text{-----} \rightarrow$$

% permissividade do meio:

```
eps0=8.854e-12;
```

% distancia entre as placas planas

h1=0.5;

```
h2=0.177;
```

w1=1.00; %largura da placa superior

w2=0.757; % largura da placa central

w3=1.00; %largura da placa inferior

% define largura de discretização = $2a$:

```
%a=1e-3;
```

% calcula numero de tiras necessárias para representar o(s) corpos

```
N1=round(w1/2/a);
```

```
N2=round(w2/2/a);
```

```
N3=round(w3/2/a);
```

% distribui as tiras uniformemente sobre o(s) corpo(s)

% determinando as coordenadas dos seus eixos - x e y :

$$i=1:N1;$$
$$\mathbf{i} = \mathbf{i}(:);$$
$$dx = 2 \cdot a;$$

```
x=[i*dx-w1/2-dx/2];
```

```
y=[h1*ones(N1,1)];
```

```
N=N1;
```

```
i=1:N2; i=i(:);
```

$$x = [x; i \cdot dx - w^2/2 - dx/2];$$

```
y=[y;0*ones(N2,1)];
```

```
N=N+N2;
```

```

i=1:N3; i=i(:);

x=[x;i*dx-w3/2-dx/2];
y=[y;-h2*ones(N3,1)];
N=N+N3;

figure(1), plot(x,y,'.'); axis equal;
% axis([-0.3 0.3 9.7 10.3]);
% caso haja M corpos (cilindro ou plano ou qualquer outra coisa) calcular
% as coordenadas dos cilindros de carga para cada um deles e adicionar aos vetores x e
y acima
% sendo então  $N=N_1+N_2+\dots+N_M$ 

% cria matriz de índices i e j, de dimensão NxN :
i=1:N;
j=i;
[i,j]=meshgrid(i,j);

% calcula os valores de r1 e r2 para cada par i,j.
xx=x(i)-x(j); yy=y(i)-y(j);

%r2=sqrt((x(i)+w2).^2+(y(i)).^2); % distancia do ponto (i,j) ao ponto de referência (-w2,0)
% Note que a escolha de r2 (acima) é arbitrária e todas as N equações são
% somadas a um termo do tipo  $\log(r2)/2/\pi/\epsilon_0$ . Assim, se subtrairmos essa
% linha de todas as equações o valor das incógnitas não se modifica e o
% termo independente (vetor de potenciais) fica subtraído de uma constante.
% Como o que interessa é a diferença de potencial entre as placas, e não o
% valor absoluto do potencial, o resultado não se altera. Portanto,
% esse termo é eliminado.

% calcula matriz S (por metro de comprimento):
% Última linha de S impõe carga total nula (somando as 3 placas)
% a incógnita N+1 é o potencial do ponto de referência
%  $S=\log(r2./r1)/2/\pi/\epsilon_0$ ;
S = (xx-a).*log((xx-a).^2+yy.^2)-(xx+a).*log((xx+a).^2+yy.^2);

S = S -2*yy.*(atan((a-xx)./yy)+atan((a+xx)./yy));
S = S/4/pi/eps0;
S(N+1,:)=S(1,1);
S(:,N+1)=-1;
S(N+1,N+1)=0;

% define potencial dos condutores. Caso haja mais de um corpo, V terá valores diferentes
% dependendo de em qual corpo se encontra o cilindro i.
% potencial dos condutor 2 = 0 V.

V=zeros(N,1);
V(1:N1)=0; % diferença de potencial
V((N1+1):(N1+N2))=1;

```

```

V((N1+N2+1):(N1+N2+N3))=0;
V(N+1)=0;

% resolve o sistema, calculando o vetor de cargas (por metro):
gamma=S\V;

% calcula a carga total em cada corpo:
Q(1)=sum(gamma(1:N1))*2*a;
Q(2)=sum(gamma((N1+1):(N1+N2)))*2*a;
Q(3)=sum(gamma((N1+N2+1):(N1+N2+N3)))*2*a;

figure(6);
subplot(3,1,1), plot(x(1:N1),gamma(1:N1));
subplot(3,1,2), plot(x(N1+1:N1+N2),gamma(N1+1:N1+N2));
subplot(3,1,3), plot(x(N1+N2+1:N),gamma(N1+N2+1:N));
% calcula Cij :
C=Q(2);
mu0=4e-7*pi;
v2=1/(mu0*eps0);
L=1/(v2*C);
Z0=sqrt(L/C);
disp(Z0);

% calculo de E:

max_x=max(x)*1.5;
min_x=min(x)*1.5;
max_y=max(y)*1.5;
min_y=min(y)*1.5;
dd=dx*10;
Xv=min_x:(dd):max_x;
Yv=min_y:(dd):max_y;
% if(min(abs(Yv))<a),
%   Yv=Yv+dx*5;
% end;
[X,Y]=meshgrid(Xv,Yv);

phi=zeros(size(X));
Ex=phi; Ey=phi;
for i=1:N,
    xx=X-x(i); yy=Y-y(i);
    pp = (xx-a).*log((xx-a).^2+yy.^2)-(xx+a).*log((xx+a).^2+yy.^2);
    pp = pp -2*yy.*(atan((a-xx)./yy)+atan((a+xx)./yy));
    pp = pp/4/pi/eps0*gamma(i);
    phi=phi+pp;
    Ex=Ex+gamma(i)*(log((a+xx).^2+yy.^2)-log((a-xx).^2+yy.^2))/(4*pi*eps0);
    Ey=Ey+gamma(i)*(atan((a-xx)./yy)+atan((a+xx)./yy))/(2*pi*eps0);
end;
figure(2), imagesc(Xv,Yv,phi), title('potencial - V'), axis xy
colorbar;

```

```

%[Ex,Ey]=gradient(-phi,dd);
Eref=1/h1; %valor de referência do campo
Ex=Ex/Eref;
Ey=Ey/Eref;
figure(3); clf;
contour(Xv,Yv,phi), title('campo elétrico e equipotenciais');
hold on
quiver(Xv,Yv,Ex,Ey);
hold off;

figure(4), imagesc(Xv,Yv,20*log10(abs(Ex)));

caxis([-40 10]); colorbar, axis xy, hold on
figure(4), cs=contour(Xv,Yv,20*log10(abs(Ex)),-20 -10 0,'k'); axis xy
title(['campo indesejado - Ex (dBV/m)']);
clabel(cs), hold off
figure(5), imagesc(Xv,Yv,20*log10(abs(Ey)));

caxis([-40 10]); colorbar, axis xy, hold on
figure(5), cs=contour(Xv,Yv,20*log10(abs(Ey)),-2 0 2,'k'); axis xy
clabel(cs), hold off
title(['campo desejado - Ey (dBV/m)']);

```

- [1] "IEC 61000-4-20 Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-20: Testing and measurement techniques – Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides."
- [2] M. Crawford, "Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 16, n. 4, pp. 189-195, 1974.
- [3] V. Verhagen, "Analysis of an asymmetric TEM-cell for immunity testing," in *Electromagnetic Compatibility, 1990. Seventh International Conference on*, pp. 157-161, 1990.
- [4] A. Walters e C. Leat, Control of the TE₁₁₁ Resonance in an Asymmetric TEM Cell, *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 50, 2008, pp. 431-434.
- [5] Massarope, L.; Oliveira, L. M., Célula TEM/GTEM. Monografia de projeto de conclusão de curso (PTC/EPUSP)., 2008.
- [6] Shaowei Deng, D. Pommerenke, T. Hubing, e Dongshik Shin, "An Experimental Investigation of Higher Order Mode Suppression in TEM Cells," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 50, n. 2, pp. 416-419, 2008.
- [7] K. Malaric, J. Bartolic, e B. Modlic, "Absorber and resistor contribution in the GTEM-cell," in *Electromagnetic Compatibility, 2000. IEEE International Symposium on*, vol. 2, pp. 891-896 vol.2, 2000.
- [8] B. E. Roseberry e R. B. Schulz, "A Parallel-Strip Line for Testing RF Susceptibility," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 7, n. 2, pp. 142-150, 1965.
- [9] P. Groenveld Pjilips Resarch Laboratories Eindhoven, Netherlands de Jong Dr, e Neher Laboratory, "A Simple R.F Immunity Test Set Up."
- [10] M. Crawford, "Generation of Standard EM Fields Using TEM Transmission Cells," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 16, n. 4, pp. 189-195, 1974.
- [11] M. L. Crawford, "Techniques for measurement of electromagnetic radiation and susceptibility of electronic equipment," 1975. [Online]. Available: <http://adsabs.harvard.edu/abs/1975elco.proc...38C>. [Accessed: 18-Nov-2009].
- [12] F. P. de Gannes et al., "Effects of Head-Only Exposure of Rats to GSM-900 on Blood-Brain Barrier Permeability and Neuronal Degeneration," *Radiation Research*, vol. 172, n. 3, pp. 359-367, 2009.
- [13] Morega M., Miclaus S., Electromagnetic environment generated in a TEM cell for biological dosimetry applications, Proceedings of ISEF 2007 – XIII International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic

Engineering, ISBN 978-80-01-03784-3, Prague, Czech Republic, September 13-15, 2007 .

- [14] M. Bozzetti G. Calo, A. D'orazio, M. De Sario, L. Mescia, V. Petruzzelli, e F. Prudenzeno, "Investigation of biological effects by a novel GTEM cell," presented at the 2° Convegno Nazionale Microonde nell'Ingegneria e nelle Scienze Applicate, Ancona, p. p 26, 2004.
- [15] Kirawanich Boriraksantikul e N. E. Islam, "Near-Field Radiation From Commercial Cellular Phones Using a TEM Cell," *Progress In Electromagnetics Research B*, Vol. 11, 15–28, 2009.
- [16] B. Turetken, "Monopole antenna calibration in GTEM cell," in *Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, 2004. 10th International Conference on*, pp. 298-300, 2004.
- [17] C. Icheln, P. Vainikainen, e P. Haapala, "Application of a GTEM cell to small antenna measurements," in *Antennas and Propagation Society International Symposium, 1997. IEEE., 1997 Digest*, vol. 1, pp. 546-549 vol.1, 1997.
- [18] S. Deng et al., "Mode Suppressed TEM Cell Design For High Frequency IC Measurements," *Electromagnetic Compatibility, 2007. EMC 2007. IEEE International Symposium on*, vol., no., pp.1-6, 9-13 July 2007.
- [19] T. Masamitsu, I. Ktsuo "The Development of PW(Parallel Wired) Cell." Journal Title;IEIC Technical Report (Institute of Electronics, Information and Communication Engineers) Journal Code:S0532B ISSN:0913-5685 VOL.98;NO.661(EMCJ98 104-116);PAGE.57-63(1999). Pub. Country;Japan
- [20] M. Borsero, G. Vizio, D. Parena, e V. Teppati, "Synthetic TDR Measurements for TEM and GTEM Cell Characterization," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 56, n. 2, pp. 271-274, 2007.
- [21] A. V. Satav, S., "Cost-effective In-house Fabrication of an Open TEM Cell For EMC Precompliance:," *Do it Yourself!. IEEE EMC Society Newsletter*, 66-71., Jun-2009.
- [22] Ping Hui, "Application of GTEM cells to wireless communication transceiver designs.," *Microwave Journal* 46:99, 168-170, 200, 01-Set-.
- [23] D. Pande e P. Bhatt, "Characterization of a gigahertz transverse electromagnetic cell (GTEM cell)," in *Electromagnetic Interference and Compatibility '97. Proceedings of the International Conference on*, pp. 31-38, 1997.

- [24] M. Klingler, S. Egot, J. Ghys, e J. Rioult, "On the use of 3-D TEM cells for total radiated power measurements," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 44, n. 2, pp. 364-372, 2002.
- [25] J. Y. Jongsuk Chae e Hyuckjae Lee, "Straight CTL cell with 3x3 cm test zone for calibrating EM field probes in air," *Electronics Letters*, vol. 39, pp. 190 - 192, Jan. 2003.
- [26] Jaehoon Yun, Hyuckjae Lee, e Hojung Hwang, "Straight coupled transmission-line cell for generating standard electromagnetic fields," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 44, n. 4, pp. 515-521, 2002.
- [27] MARIOTTO, P. A, *Ondas e linhas*. São Paulo: EPUSP, 2001.
- [28] Rohde & Schwarz, "Time Domain Measurements Using Vector Network Analyzer ZVR. Munich, Germany: , Appl. Note 1EZ44_0E, May 19, 1998.."
- [29] K. Slattery e J. Neal, "Field uniformity in standard TEM cells," in *Electromagnetic Compatibility, 1995. Symposium Record. 1995 IEEE International Symposium on*, pp. 534-537, 1995.
- [30] B. J. Malaric, Kresimir, "Design of a TEM-cell with increased usable test area," *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*, v 11, n 2, p 143-154, 2003.
- [31] J. Z. JUNMEI,, "F. Higher order mode cut-off frequencies in TEM cells calculated with TLM method. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, (EMC), v. 3, n. 4, p. 563-567, Nov. 1988.." [Online]. Available: about:blank. [Accessed: 06-Set-2010].
- [32] P. F. Wilson, "Simple Approximate Expressions for Higher Order Mode Cutoff and Resonant Frequencies in TEM Cells," *Electromagnetic Compatibility, IEEE Transactions on*, vol. 28, n. 3, pp. 125-130, 1986.
- [33] C. M. T. Weiland, "Discrete electromagnetism with the finite integration technique," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 32, 65-87, 2001.
- [34] Sadiku, M, *Numerical Techniques in Electromagnetics*, 2 ed. CRC Press Boca Raton, 2001.
- [35] R. Marklein, "The Finite Integration Technique as a general tool to compute acoustic, electromagnetic, elastodynamic, and coupled wave fields," *W.R. Stone (Ed.), Review of Radio Science 1999–2002, IEEE Press/Wiley, Piscataway/New York, 2002, pp. 201–244.*

- [36] T. Chen, "Determination of the Capacitance, Inductance, and Characteristic Impedance of Rectangular Lines," *Microwave Theory and Techniques, IRE Transactions on*, vol. 8, n. 5, pp. 510-519, 1960.
- [37] S. Cohn, "Shielded Coupled-Strip Transmission Line," *Microwave Theory and Techniques, IRE Transactions on*, vol. 3, n. 5, pp. 29-38, 1955.
- [38] J. Tippet e D. Chang, "A New Approximation for the Capacitance of a Rectangular-Coaxial-Strip Transmission Line (Short Papers)," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 24, n. 9, pp. 602-604, 1976.
- [39] C. Weil, "The Characteristic Impedance of Rectangular Transmission Lines with Thin Center Conductor and Air Dielectric," *Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on*, vol. 26, n. 4, pp. 238-242, 1978.
- [40] "Introducing undergraduates to the moment method," *Education, IEEE Transactions on*, pp. 385 - 389, Nov-1995.
- [41] "Simple examples of the method of moments in electromagnetics," *Education, IEEE Transactions on*, vol. 31, n. 3, pp. 193-200, Ago. 1988.
- [42] R. Lorch e G. Monich, "Mode suppression in TEM cells," in *Electromagnetic Compatibility, 1996. Symposium Record. IEEE 1996 International Symposium on*, pp. 40-42, 1996.
- [43] CST Microwave Studio, Computer Simulation Technology, Darmstadt, Germany.
<http://www.cst.com>