

Calibração de sensores de campo eletromagnético, usando a GTEM: a importância do material escolhido para a construção do suporte para fixação dos sensores.

Rubiane H. Oliveira, Ricardo Suterio
Laboratório de Integração e Testes (LIT)
Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE)
Av. Dos Astronautas, 1758, São José dos Campos - SP
rubiane.oliveira@lit.inpe.br, suterio@lit.inpe.br

Resumo— Ensaios de Compatibilidade Eletromagnética, principalmente os testes de imunidade radiada são de grande importância para os equipamentos eletrônicos para assegurar seu pleno funcionamento sem nenhuma degradação do seu desempenho quando submetido a campos de alta frequência. Sensores ou sondas de campo eletromagnético são utilizados para a medição do nível da intensidade de campo. Para garantir a confiabilidade dessas medições, esses sensores devem ser calibrados, de maneira que os níveis medidos estejam dentro de limites de precisão aceitáveis, ditados por normas específicas. Este artigo, apresenta uma primeira parte do estudo que está sendo realizado no Laboratório de Integração e Testes do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais para a implementação de um laboratório de calibração de sensores de campo eletromagnético na faixa de 9 kHz a 1 GHz, com levantamento dos métodos de calibração existentes, ambientes para geração de campos padronizados, instrumentação e materiais necessários para a construção de suportes de fixação para os sensores, de maneira que interfiram minimamente no ambiente de calibração.

Palavras chave— Ensaios de compatibilidade eletromagnética (EMC), Calibração de sensores, células GTEM

I. INTRODUÇÃO

O aumento crescente do número de dispositivos eletrônicos que empregam radiações eletromagnéticas, a necessidade da convivência tecnológica com outros dispositivos (EMC – Compatibilidade eletromagnética) e a utilização intensificada dos serviços de telecomunicações nos últimos anos, ampliou a necessidade do uso de radiofrequências e, conseqüentemente, a instalação de torres de radiocomunicações espalhadas pelas cidades, gerando uma preocupação na população sobre riscos à saúde associados à exposição humana a campos elétricos, magnéticos e eletromagnéticos correspondentes às radiações não ionizantes (RNI). Isso gerou a necessidade de novas técnicas para medições de campo eletromagnético destas radiações (EMF ou Electromagnetic Field). Sensores EMF ou sondas são os instrumentos mais comuns para medição de intensidade de campo amplamente utilizada em teste de conformidade de EMC dos equipamentos eletrônicos [1], [2].

CNPQ (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico)
AEB (Agência Espacial Brasileira)

A calibração deste tipo de sensores é de grande importância para garantir que os campos eletromagnéticos gerados e medidos estão dentro de limites de precisão aceitáveis pelas normas.

II. HISTÓRIA

O Laboratório de Integração e Testes (LIT) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) foi especialmente projetado e construído para atender às necessidades do Programa Espacial Brasileiro. Além de desenvolver atividades no ramo espacial, atualmente, o LIT é considerado um dos instrumentos mais sofisticados e poderosos na qualificação de produtos industriais que exijam alto grau de confiabilidade.

Dentre os muitos laboratórios de calibração e ensaio que integram o LIT, têm-se o Laboratório de Compatibilidade Eletromagnética cujo objetivo é realizar os ensaios de Interferência e Compatibilidade Eletromagnética dos satélites e seus subsistemas, bem como dos equipamentos dos diversos setores industriais, como: eletroeletrônica, automação, informática, eletromédico, telecomunicação, militar, aeroespacial e automobilístico.

Os ensaios de Compatibilidade Eletromagnética têm como objetivo garantir que um sistema, equipamento ou dispositivo eletroeletrônico não provoque perturbações eletromagnéticas, além dos limites estabelecidos pelos documentos normativos aplicáveis aos equipamentos, bem como não sofra uma interferência eletromagnética, quando submetido aos níveis de severidade de perturbações eletromagnéticas determinados na norma técnica [3]. Para assegurar a confiabilidade metrológica dos sistemas e equipamentos de medidas é necessário à calibração desses equipamentos.

III. OBJETIVO

O objetivo desse trabalho é descrever o estudo realizado - levantamento das normas existentes, padrões exigidos e infraestrutura necessária - para a implementação do ambiente tecnológico requerido para calibração de sensores de radiação eletromagnética na faixa de 9 kHz a 1 GHz. Principalmente,

qual o material que deverá ser usado para a construção do suporte de fixação dos sensores, de maneira que interfira o mínimo possível na leitura do campo eletromagnético.

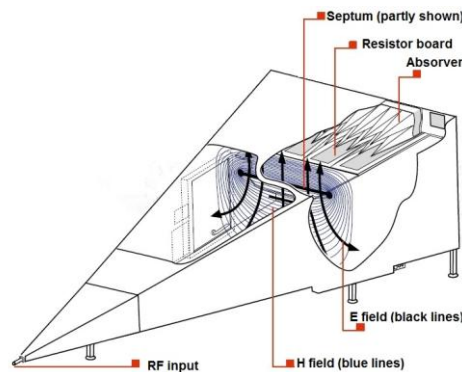
IV. METODOLOGIA

A norma padrão IEEE 1309 de 2005 para calibração de sensores e sondas eletromagnéticas, excluindo antenas, entre 9 kHz a 40 GHz [4], fornece três métodos gerais para a calibração desses sensores, tais como:

- Método A: Calibração usando um Padrão de Transferência (um sensor de campo ou uma sonda similar à Unidade sob calibração), que possui rastreabilidade a um Laboratório Nacional de Metrologia. O padrão de transferência é empregado para medir e "padronizar" o campo usado para calibrar o Sensor de Campo ou sonda sob calibração.
- Método B: Calibração empregando Intensidade de Campo Calculada. A Unidade sob Calibração é colocada em um campo de referência calculado baseado na geometria da fonte do campo e nos parâmetros de entrada medidos desta fonte.
- Método C: Calibração usando um Sensor de Referência Primário, que não contém dispositivos eletrônicos passivos ou ativos e possui calibração rastreável a padrões nacionais ou internacionais. Este sensor é empregado para determinar a intensidade de campo que é usada para calibrar a Unidade sob Calibração.

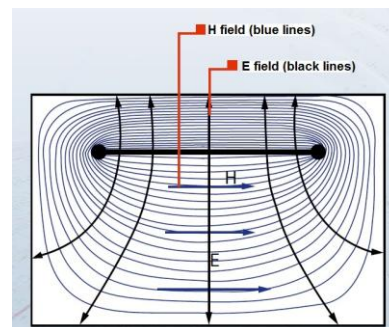
Para qualquer um dos métodos, dependendo da intensidade de campo requerida e da faixa de frequência usada, a norma IEEE 1309 também define as características dos equipamentos e do ambiente de teste que podem ser usados para gerar campos eletromagnéticos padrões para a calibração dos sensores.

Um método para calibração de sondas de campo elétrico para frequências acima de 1 GHz é apresentado no anexo da norma IEC 61000-4-3 [5], que utiliza antenas cornetas com ganho padrão para a calibração, no entanto, para frequências abaixo de 1 GHz, há dificuldade de usar antenas cornetas, devido as suas grandes dimensões. Para essa faixa, um método alternativo para padronização de campo para calibração usando guia de onda TEM (Transverse Electromagnetic), é apresentado na norma IEC 61000-4-20 [6]. Um desses dispositivos usados para a geração de campo eletromagnético padrão na faixa de frequência de 9 kHz a 1 GHz é a célula GTEM (Gigahertz Transverse Eletromagnetic). A distribuição de campos (elétrico e magnético) dentro de uma célula GTEM é apresentada na Fig. 1 e Fig. 2, respectivamente.



Fonte: TESEQ, 2014

Fig. 1- Distribuição de Campos dentro da GTEM (Idealizada) [7].



Fonte: TESEQ, 2014

Fig. 2 - Linhas de Campo Elétrico e Campo Magnético dentro da GTEM (Idealizada) [7].

V. GTEM (GIGAHERTZ TRANSVERSE ELETROMAGNETIC)

As células TEM (Transverse Eletromagnetic) tem sido tradicionalmente usadas para medições de imunidade e de emissão eletromagnética, sendo constituídas basicamente de duas placas paralelas condutoras, com uma tensão aplicada em uma das suas extremidades e terminada com uma impedância de mesma característica do condutor, confinadas no interior de um ambiente blindado. A maioria das TEM são derivadas da clássica "célula Crawford", apresentada pela primeira vez em 1974 [8], constituída basicamente por uma linha de transmissão coaxial de seção central quadrada com conectores em ambas às extremidades cônicas, ou seja, uma rede de duas portas nas quais uma, é entrada e outra a saída. Dentro da célula é estabelecido um campo TEM para toda a faixa de frequência de operação nominal na qual a onda propagante tem impedância de espaço livre que é de 377 ohms. A frente de onda gerada propaga-se em modo transversal e tem as mesmas características de uma onda plana (onda cujo campo elétrico é perpendicular ao magnético). A limitação em frequência destas células é causada por esta transição entre a parte retangular e a parte cônica, devido à excitação de modos de alta ordem e que perturbam a propagação da onda TEM. Para evitar este comportamento de cavidade ressonante, que limita a frequência superior da célula, a Asea Brow LTd., na Suíça [9], desenvolveu em 1984 a célula Gigahertz TEM – GTEM. A célula GTEM compreende apenas uma parte cônica (entrada de RF), terminada com um conjunto de resistores de 50 ohms para baixas frequências e absorvedores piramidais para altas

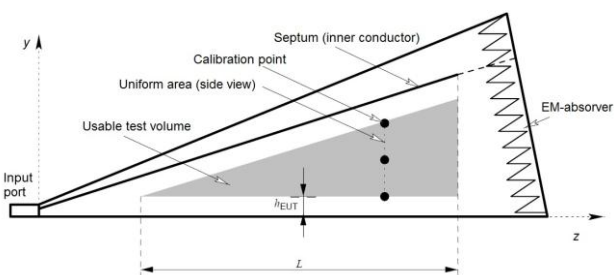
frequências. Nas clássicas “células Crawford”, a placa condutora, ou septum, está localizada na parte intermediária do volume central. Na célula GTEM, o septum está localizado na parte superior do volume central, promovendo uma maior região de teste [10].

A. Alguns requerimentos iniciais para a calibração de sensor de campo elétrico usando guia de onda TEM de acordo com a IEC61000-4-20 [6]

1) Requerimentos para uniformidade de campo

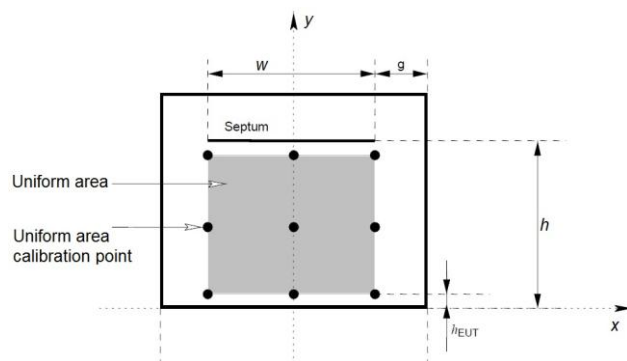
A norma padrão para guia de ondas TEM – IEC 61000-4-20 [6] refere-se à IEC 61000-4-3 [5], onde uma onda plana incidente é necessária para testes de imunidade. Esta norma descreve um teste para avaliar a uniformidade do campo de uma área definida. Em guias de ondas TEM, o modo TEM é equivalente a uma onda plana incidente com um campo elétrico vertical entre as placas. Em uma célula GTEM, o modo TEM têm uma ligeira curvatura esférica, isto implica que componentes de campo secundários (vertical e horizontal) podem estar presentes, o que distorce ainda mais a onda. Portanto, testes de área uniforme devem ser feitos dentro de uma área dentro da GTEM. De acordo com a IEC 61000-4-20 a área uniforme é um plano hipotético vertical (ortogonal) a direção de propagação do campo. Na célula GTEM, este plano é representado por um plano perpendicular ao chão da GTEM. Nesta área, a intensidade do campo tem que ser uniforme, em outras palavras, as variações na intensidade do campo deve ser pequeno. A dimensão do guia de onda TEM determina o tamanho máximo dessa área uniforme.

A IEC 61000-4-20 tem um procedimento de medição do modo TEM e uniformidade de campo dada pelo item A. Um exemplo de área uniforme de acordo com o item B.2.3 do Anexo B da norma IEC 61000-4-20 [6] é apresentado pela Fig. 3 e Fig. 4, respectivamente.



Fonte: IEC 61000-4-20, 2010

Fig. 3 - Exemplo de pontos de calibração para medidas de área de campo uniforme (vista Lateral) [6].



Fonte: IEC 61000-4-20, 2010

Fig. 4 - Exemplo de pontos de calibração para medidas de área de campo uniforme (Corte Transversal) [6].

2) Medidas de distribuição espacial de campo (Volume de Calibração)

Uma configuração típica de ensaio para medições de uniformidade e distribuição espacial de campo, utilizando a célula GTEM, é mostrada na Fig. 5.

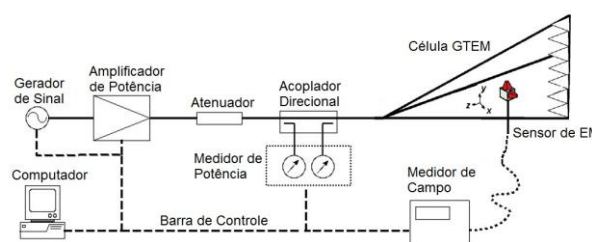
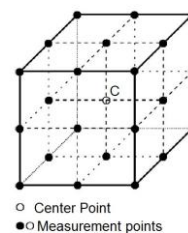


Fig. 5 - Configuração para medição de distribuição espacial de campo e uniformidade de campo.

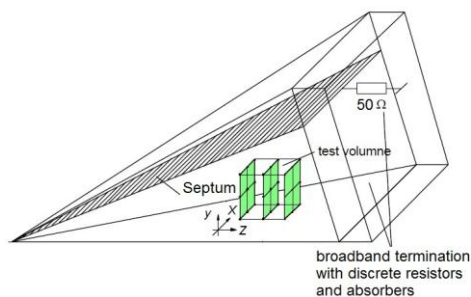
Células GTEM proporcionam uma repetibilidade de uniformidade de campo ao longo de um determinado volume de calibração. As dimensões do volume de calibração deve ser a mais retangular possível, por exemplo, cúbico e deve ser menor do que 20 % da distância entre o condutor interno e externo (altura do septum). O centro do volume onde o sensor ou sonda de campo pode ser calibrado deve ser posicionado no centro da altura do septum (ponto C na Fig. 6). A validação do volume deve ser realizada nos pontos de grade do cubo, como o exemplo da Fig. 6 (pontos de calibração considerando uma célula GTEM com um volume de calibração de 20 cm como exemplo). O procedimento para validação do volume de calibração é apresentado no Anexo E da norma IEC 61000-4-20 [6]. Onde, o desvio padrão das medidas de campo elétrico deve ser menor do que 1 dB.



Fonte: IEC 61000-4-20, 2010

Fig. 6 - Exemplos de pontos de medidas para validação do volume de calibração [6].

Na Fig. 7, temos um exemplo do volume de calibração dentro da GTEM.



Fonte: Garbe and Käst, 2014

Fig. 7 - Exemplo de um volume de calibração dentro da GTEM [11].

3) Requerimentos para a instrumentação de Calibração

a) Especificação do Guia de onda TEM

Um guia de onda TEM pode ser usado para estabelecer campos padrões para a calibração de sensores ou sondas de campo. O campo gerado no centro de um guia de onda TEM entre o septum e a placa superior ou inferior é aproximadamente calculada pela equação (1):

$$E_{approx} = \frac{\sqrt{Z_o P_{net}}}{h} \text{ em } V/m \quad (1)$$

Onde Z_o é a impedância característica da célula TEM (tipicamente 50 ohms), h é a distância entre o septum e a placa superior ou inferior (em m) e P_{net} é a potência líquida, determinada pela equação (2):

$$P_{net} = P_{fwd} - P_{rev} \text{ em } W \quad (2)$$

Onde P_{fwd} e P_{rev} são as potências diretas e reversas em W , respectivamente. A equação (1) é válida somente para o modo TEM (onda Plana) [12].

b) Fixação do Sensor ou Sonda de Campo

De acordo com as referências [4], [5] e [6] o material usado para a fixação do sensor ou sonda de campo pode causar reflexões de campo eletromagnético durante a sua calibração. A fixação deve ser feita de um material com uma permissividade relativa menor do que 1,2 e uma perda dielétrica menor do que 0,005. Dessa maneira, o material usado para fixação, deve interferir muito pouco no ambiente de calibração dos sensores de campo.

Como as normas não definem nenhum material específico que deverá ser usado como material para a construção da fixação dos sensores, e depois de algumas medidas feitas de potência e campo elétrico dentro da célula GTEM, verificou-se que tanto o material, quanto o formato da fixação usada para o posicionamento do sensor, interferiam no resultado das

medidas. Então foi necessário realizar alguns experimentos, com alguns materiais e formatos, para descobrir qual o impacto que eles apresentariam no ambiente de calibração. No caso, usando a GTEM como um ambiente de calibração.

A escolha dos materiais que seriam usados nos experimentos foi baseada na literatura [13][14][15], usando como parâmetro inicial a permissividade relativa (ϵ) e o fator de perda dielétrica ($\tan \delta$), apresentados na TABELA I a seguir:

TABELA I - PROPRIEDADES DIELÉTRICAS DE ALGUNS POLÍMEROS.

Propriedade	Nylon	Poliestireno	Polipropileno	Poli tetrafluoretileno PTFE (Teflon)
Permissividade Relativa (ϵ)	3,2-5	2,5-2,6	2,2	2,0-2,1
Fator de perda dielétrica ($\tan\delta$)	0,03-0,3	0,0001 0,00033	0,0002	0,0005 0,00028
Peso Específico (g/cm^3)	1,13	1,04	0,90	2,20
Resistência ao Impacto (kgf/cm^2)	5,5-10,9	1,35	2,2-34,1	13,6-21,7
Resistência à Tração (kg/cm^2)	720-860	435	330	70-280
Resistência a Compressão (g/cm^2)	840	800-1100	600-700	119
Dureza Rockwell	R 103-118	M 65-90	D 72	D 50-65
Resistência Dielétrica (KV/mm)	17,3-20,1	19,7-27,6	31,6	15,8-23,7
Resistência ao Calor Contínuo ($^{\circ}C$)	78-174	80-120	119-158	260

A configuração utilizada para os experimentos foi à mesma apresentada na Fig. 5 e os detalhes dos equipamentos de testes utilizados estão apresentados na TABELA II.

TABELA II - INSTRUMENTOS DE TESTES NECESSÁRIOS PARA CALIBRAÇÃO.

Equipamento	Marca/Modelo
Gerador de Sinal	Rohde Schwarz / SMC 100A
Amplificador	Rohde/Schwarz / BB100
Medidor de Potência	Rohde/Schwarz / NRP2
Sensores de Potência	Rohde/Schwarz / NRP-Z91
Célula GTEM	ETS-LINDGREN / GTEM 5405
Sensor Isotrópico	ETS-LINDGREN / HI 4122
Acoplador Direcional	Amplifier Research / DC 3400 AM1

Foram realizados experimentos com três materiais: poliestireno (isopor), polipropileno e teflon. Todos os experimentos foram realizados utilizando o método de campo constante de 9 V/m [5], [6], e todos na mesma posição indicada pelo ponto de medida da Fig. 8.

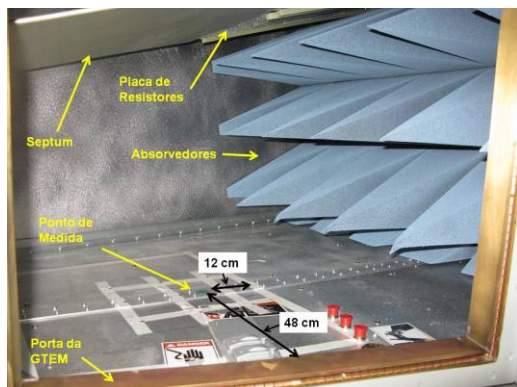


Fig. 8 – Ponto de referência para as medidas realizadas.

A seguir estão descritos os experimentos realizados:

• **Experimento 1:**

Material usado: Poliestireno (isopor)

Dimensões: (43 x 12 x 10) cm – linha azul
(11 x 12 x 10) cm – linha vermelha

Resultado

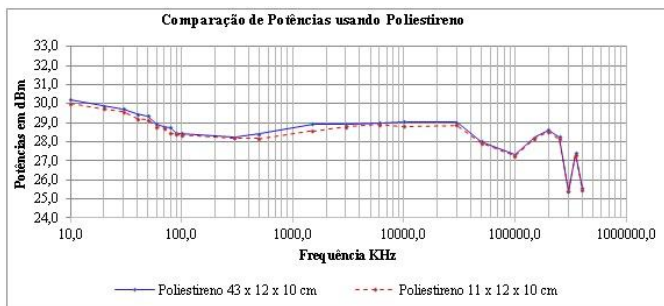


Fig. 9 - Comparação de potências usando Poliestireno com comprimentos diferentes.

Verificamos através da Fig. 9, que variando apenas o comprimento do material, foi necessária uma potência menor para manter o campo constante (na média a potência ficou 3,31% menor). De maneira geral, isso é de grande importância, pois quanto menor a potência necessária para a geração do campo, menor a necessidade de amplificação da mesma. Pois, dentre a instrumentação necessária para a calibração de sensores ou sondas de campo eletromagnético, o amplificador, apresenta um dos maiores custos. Podemos concluir que as dimensões da fixação suporte para os sensores, deverão ser os menores possíveis (desde que suportem o peso e formato do sensor sob calibração).

• **Experimento 2:**

Material usado: Poliestireno (isopor) e Polipropileno

Dimensões:

(11 x 7 x 7) cm – linha azul (poliestireno - isopor)

(11 x 7 x 7) cm – linha vermelha (polipropileno)

Resultado

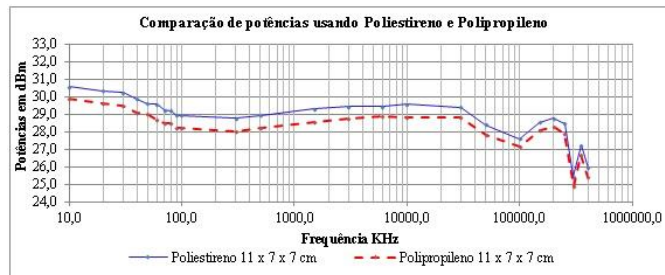


Fig. 10 - Comparação de potências usando dois materiais diferentes (Poliestireno e Polipropileno).

Através da Fig. 10, verificamos que usando dois materiais diferentes (poliestireno e polipropileno) com exatamente as mesmas dimensões (11x 7 x7 cm) e na mesma posição, o resultado da potência necessária para manter o campo constante foi menor usando o polipropileno comparado com o poliestireno (na média a potência ficou 14,1% menor). Sendo assim, é melhor usar o polipropileno para a construção da fixação do sensor quando comparado ao poliestireno.

• **Experimento 3:**

Material usado: Poliestireno (isopor), Polipropileno e Teflon.

Dimensões:

(11 x 7 x 7) cm – linha azul (Poliestireno - isopor)

(11 x 7 x 7) cm – linha vermelha (Polipropileno)

(11 x 7 x 7) cm – linha preta pontilhada (Teflon)

Resultado

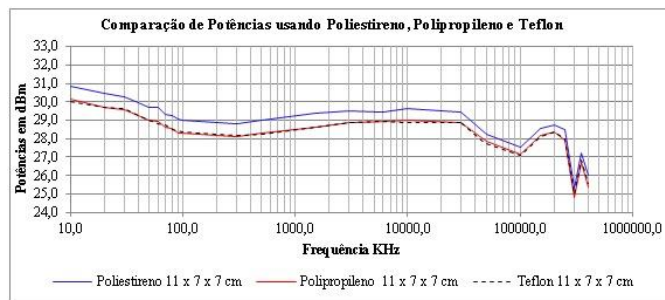


Fig. 11 - Comparação de potências usando três materiais diferentes (Poliestireno, Polipropileno e Teflon).

Podemos observar da Fig. 11, que usando três materiais diferentes (poliestireno, polipropileno e teflon) com exatamente as mesmas dimensões (11x 7 x7 cm) e realizando todas as medidas na mesma posição, o resultado da potência necessária para manter o campo constante, usando tanto o polipropileno quanto o teflon, não tiveram diferenças muito significativa entre eles (na média o resultado da potência usando o teflon ficou 1,81% menor do que usando o polipropileno), porém ambos apresentaram menores potências comparadas com o poliestireno (a potência ficou em média 13,22% menor usando

o polipropileno quando comparado com o poliestireno e 13,17% menor quando comparado com o teflon). Com essa informação e também através da Eq. (1), pode-se verificar que modificando a potência elétrica, isso interfere diretamente na uniformidade do campo e também na validação do volume de calibração do sensor.

Dessa maneira o suporte de fixação dos sensores deve ser confeccionado de material adequado, neste caso, pode ser usado tanto o teflon quanto o polipropileno, pois apresentaram bons resultados com relação ao nível de potência necessária para manter o campo elétrico constante. Ambos possuem boas propriedades elétricas e mecânicas [13][14], porém, optou-se por utilizar o polipropileno, principalmente devido ao seu peso específico que é de $0,95 \text{ g/cm}^3$ (comparada com a do teflon que é de $2,4 \text{ g/cm}^3$), uma das mais baixas entre todos os materiais plásticos disponíveis comercialmente, permitindo assim obter suportes mais leves. Além do peso específico, pode-se observar da TABELA I, que o polipropileno apresenta também melhor resistência ao impacto, melhor resistência à tração, melhor resistência à compressão entre outros, e por isso apresenta maior estabilidade para a construção do suporte para fixação dos sensores de campo eletromagnéticos.

VI. CONCLUSÃO

O sistema completo para implantar um sistema de calibração de sensores de campo eletromagnético desde a faixa de 9 kHz a 40 GHz, é um tanto quanto complexo e envolve várias etapas. Como primeira parte, após os estudos comparativos das normas pertinentes IEC 61000-4-3, IEC 61000-4-20 e IEEE 1309 optou-se por adotar o método da substituição na faixa de 9kHz a 1 GHz, onde o sensor de teste será responsável pela rastreabilidade das medições e uma célula GTEM é usada como método para geração de campo padrão para garantir a estabilização e homogeneidade do campo eletromagnético dentro da GTEM melhorando a repetibilidade dos resultados das medições.

Antes de realizar a calibração propriamente dita dos sensores, alguns procedimentos devem ser feitos para garantir a confiabilidade das medidas. O primeiro procedimento que deve ser feito é a medida da área de campo uniforme, garantindo que as variações na intensidade do campo naquela determinada área sejam pequenas. O próximo procedimento é realizar a validação do volume de calibração (cubo), garantindo assim, que o desvio padrão das medidas feitas nos pontos de validação do cubo seja menor do que 1 dB, no caso da célula GTEM [6].

Como pequenas variações na medida de intensidade de campo podem levar a distorções da área uniforme e no volume de calibração dentro da GTEM, os materiais usados como suporte de fixação dos sensores e até mesmo a dimensão dos sensores, devem interferir minimamente nas medidas, dessa maneira, foram necessários os experimentos apresentados neste artigo, com diferentes materiais e formatos, que levaram a conclusão de que o melhor material para a confecção dos suportes é o polipropileno. Dessa mesma forma, estão sendo adquiridos Sensores de alto desempenho e pequenas dimensões, que serão usados como padrão de transferência,

adotando-se o método de substituição. A partir dessas informações, os próximos passos da pesquisa será medir a área uniforme dentro da GTEM, validar o volume de calibração (cubo) no centro do qual o sensor sob teste será calibrado pelo método de substituição na faixa de 9KHz a 1 GHz. Os resultados serão apresentados em publicações futuras, bem como o estudo dos métodos de calibração para a faixa de 1 GHz a 40 GHz.

AGRADECIMENTO

A primeira autora agradece ao CNPQ pela bolsa de estudo concedida.

REFERÊNCIAS

- [1] H. I. Bassen and G. S. Smith, "Electric Field probes—A review," IEEE Trans. Antennas Propag., vol. AP-31, no. 5, pp. 710–718, Sep. 1983.
- [2] K. Matloubi, "A method for calibration of isotropic, E-field probes," IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pp. 277–278, Cherry Hill, NJ, Aug. 1991.
- [3] Laboratório de Integração e Testes. [Em linha]. Disponível em: <http://www.lit.inpe.br/> e acessado em 13 de março de 2014.
- [4] IEEE Std 1309 – 2005: IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes, Excluding Antennas, from 9 kHz to 40 GHz, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, 1996.
- [5] IEC 61000-4-3, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-3: "Testing and measurement techniques – Radiated, radio-frequency, electromagnetic field immunity test". 2007.
- [6] IEC 61000-4-20, Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-20: "Testing and measurement techniques – Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguide. 2010.
- [7] GTEM CELLS: "Emissions and immunity testing in a single, shielded environment" (Teseq). [Em linha]. Disponível em: <http://www.teseq.com/search/index.php?searchTerm=GTEM+cells&x=4&y=18>. Acessado em 13 de março de 2014.
- [8] M. L. Crawford. "Generation of standard EM field using TEM transmission cells". IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, EMC-16:189-195, November. 1974.
- [9] D. Hansen, P. Wilson, D. Königstein, and H. Schaer. "A broadband alternative EMC test chamber based on a TEM-cell anechoic-chamber hybrid concept". In Proceedings of the 1989 International Symposium on Electromagnetic Compatibility, pages 133-137, Nagoya, Japan, September 1989.
- [10] National Physical Laboratory - The use of GTEM Cells for EMC Measurements; Measurement Good Practice Guide 65 - Janeiro 2003 - UK.:45p.
- [11] H. Garbe and J. P. Kärst. "TEM Waveguides - Principles, Evaluation criteria and Examples". Germany, 2000. [Em linha]. Disponível em: http://cispra.iec.ch/Docs_2003/Attachments_to_CIS_A_445_DC/Cal_field.pdf. Acessado em 13 de março de 2014.
- [12] S. Ishigami and M. Hirata, "A New Calibration Method for an E-field Probe using TEM Waveguides", The 20th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Zurich 2009), January 2009.
- [13] Z. Ahmad, "Polymeric Dielectric Materials". [Em linha]. Disponível em: http://cdn.intechopen.com/pdfs/39574/InTechPolymer_dielectric_materials.pdf. Acessado em 13 de março de 2014.
- [14] Y.S. Jin, G.J. Kim and S.G. Jeon, "Terahertz Dielectric Properties of Polymers". Journal of the Korean Physical Society, Vol. 49, No. 2, pp. 513-517, August 2006.
- [15] Plastmetal (Ferrosos e não ferrosos). [Em linha]. Disponível em: <http://jatodagua.plastmetal.com.br/> e acessado em 13 de março de 2014.