
**Uso da Técnica de Validação Seletiva de Recursos para
Correlação entre Medição e Simulação de Campo Elétrico
Radiado por Cabo Coaxial de 1 GHz a 2,2 GHz**
**Use of the Feature Selective Validation Technique for Correlation
of the Measurement and Simulation of Electric Field Radiated by
Coaxial Cable from 1 GHz to 2.2 GHz**

**Kenedy Marconi¹, Marcelo Bender Perotoni², Marcela Silva Novo³, Alexandre
Maniçoba de Oliveira⁴, Tagleorge Silveira⁵, Willian Felipe Silva Maia⁶,
Douglas Oliveira Campos¹**

¹Instituto Federal da Bahia

² Universidade Federal do ABC

³ Universidade Federal da Bahia

⁴ Instituto Federal de São Paulo

⁵ Instituto de Telecomunicações - Universidade de Aveiro

⁶ Universidade Federal de Minas Gerais

Autor para Correspondência: ¹ kenedymarconi@gmail.com

Resumo

Este artigo apresenta um conjunto de medidas e simulações para estudar experimentalmente o Fator de Blindagem (FB) de cabos coaxiais. Os resultados das medições e simulações são quantificados através da técnica de Validação seletiva de recursos (FSV *Feature Selective Validation*). O FB é um importante parâmetro sobre o desempenho dos sistemas quanto à sua compatibilidade eletromagnética. É de suma importância a descoberta de falhas relacionadas à EMC o mais rápido possível, a fim de evitar custos inesperados nas fases posteriores do processo. Neste contexto, observou-se que o modelo computacional simulado neste estudo considerou a carga resistiva como ideal, mas mesmo assim conseguiu-se obter uma boa correlação em amplitude (ADM) e razoável em frequência (FDM) e (GDM).

Palavras-chave Cabo Coaxial; Conectores; Simulação Computacional; Fator de Blindagem; Técnica de Validação Seletiva de Recursos.

Abstract

This paper presents a set of measurements and simulations in order to experimentally study the Shielding Effectiveness (SE) of coaxial cables. The results of measurements and simulations are quantified through the Feature Selective Validation technique. The SE is an important parameter on the performance of systems regarding their electromagnetic compatibility. It is of paramount importance the discovery of EMC-related failures as soon as possible in order to avoid unexpected costs in later design stages. The simulated computational model considered the resistive load as ideal, but it was still possible to obtain a good correlation in amplitude (ADM) and reasonable in frequency (FDM) and (GDM).

Keywords Coaxial cable; Connectors; Computer Simulation; Shielding Effectiveness; Feature Selective Validation Technique.

1 Introdução

É notório na atualidade o aumento contínuo da utilização de sistemas eletrônicos e sensores que possibilitem a troca de dados entre dispositivos móveis. A chamada "Internet das Coisas" (IoT) possui diversas aplicações, tais como a automação de residências, indústrias e em veículos [1]. A utilização desses equipamentos de tecnologia da informação em meios de transporte se torna indispensável para aumento do conforto, entretenimento, confiabilidade e segurança. Não obstante os benefícios e facilidades, diversos níveis e tipos de ruídos eletromagnéticos estão presentes dado o grande número de dispositivos atuando simultaneamente, com diferentes tipos de potência, modulação e faixas de operação. O fator de qualidade da blindagem (FQB) de um condutor coaxial é um parâmetro relevante para assegurar a compatibilidade eletromagnética dos sistemas eletroeletrônicos adjacentes [1, 2]. Neste contexto, o estudo de condutores e conectores blindados ganhou espaço na mitigação desses problemas. Na faixa de VHF (30 MHz a 300 MHz) os condutores presentes em aeronaves e em veículos podem funcionar como antenas [2, 3, 4]. Diante deste cenário uma das maneiras de se aumentar a imunidade e diminuir os ruídos eletromagnéticos radiados é atuar na linha de transmissão, utilizando por exemplo cabos coaxiais [2, 3], os quais possibilitam uma maior robustez do sistema na ótica da compatibilidade eletromagnética. Diante deste cenário, o presente artigo utiliza uma técnica de aplicação simples e eficiente para validar a modelagem computacional. O FSV é uma técnica computacional muito utilizada pela comunidade científica na comparação entre os resultados de simulação e medição para a área de EMC/EMI, o IEEE criou uma norma (IEEE Std 1597.2-2010) [12, 13, 14, 15]. A medição física realizada é referente a qualidade da blindagem dos cabos coaxiais na faixa de UHF, usando uma sonda de campo elétrico (SCE) [4, 5]. O método proposto, ao mesmo tempo, possibilita avaliar a eficiência da blindagem de cabos coaxiais, cabos blindados de duas ou três vias, e verificar se há problemas qualitativos em um conjunto de cabos blindados industrializados. As análises virtuais são muito relevantes na fase inicial de um projeto com ênfase em reduzir custo, tempo e número de ensaios.

2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA

A definição da eficácia de blindagem não é determinada de forma exclusiva [4, 5, 6, 7, 8]. A impedância de transferência (ZT) e a admitância são características intrínsecas da própria blindagem. A eficácia de blindagem é um parâmetro que está diretamente relacionado à compatibilidade eletromagnética entre os sistemas. A robustez da imunidade eletromagnética pode ser representada pelo fator de blindagem (FB), sendo representado na Equação (1) e expresso usualmente em decibéis, este parâmetro é utilizado para mensurar a atenuação em salas blindadas, câmaras anecóicas/semianecóicas ou o nível de imunidade eletromagnética de cabos blindados. A medição da impedância de transferência é normalizada, mas não há um método simples e eficiente para medir ZT em frequências acima de 100 MHz [6, 8]. Um dos fenômenos que observa-se, além da complexidade do arranjo triaxial, durante a medição da ZT em altas frequências, é a radiação eletromagnética. Além disso, erros devido à corrente de modo comum tendem a aumentar em frequências mais altas e podem gerar ressonâncias na parte externa do cabo [8, 9, 10, 11]. O parâmetro FB das linhas de transmissão, cabos coaxiais e conectores é um item importante para assegurar o funcionamento correto de dispositivos eletroeletrônicos e para classificar uma blindagem como eficiente, em geral recomenda-se um FB de 100 dB ou mais [12, 13, 14, 15]. Eventuais problemas na blindagem ineficiente podem gerar distúrbios eletromagnéticos indesejáveis. Em geral, um problema de Compatibilidade Eletromagnética (EMC) em um sistema pode ser decomposto em três tipos principais: fonte de ruído, acoplamento e receptor (vítima). Nesta

pesquisa, o meio de acoplamento será particularmente investigado para mitigar as interferências eletromagnéticas radiadas.

$$FB_{dB} = 20 \cdot \log \frac{E_0}{E_1} \quad (1)$$

Onde,

E_0 = Campo elétrico radiado pelo cabo com abertura na malha;

E_1 = Campo elétrico radiado pelo cabo sem abertura na malha.

O FB também pode ser representado pela Equação(2), baseada nos campos magnéticos:

$$FB_{dB} = 20 \cdot \log \frac{H_0}{H_1} \quad (2)$$

Onde,

H_0 = Campo magnético radiado pelo cabo com abertura na malha;

H_1 = Campo magnético radiado pelo cabo sem abertura na malha.

A Figura 1 apresenta um fluxograma, que é uma síntese da metodologia proposta, para a realização do ensaio de cabos coaxiais e blindados[4].

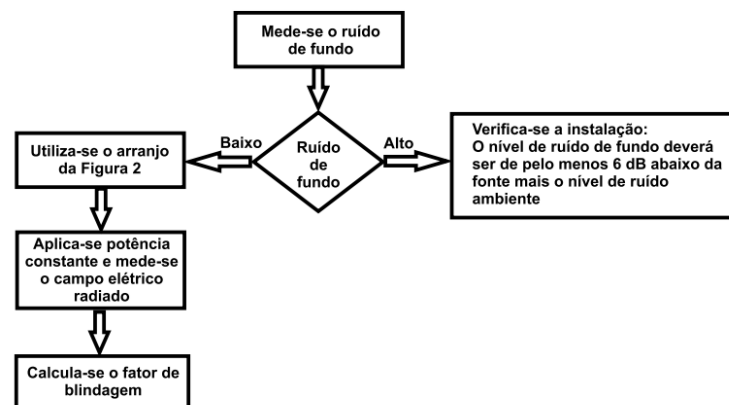


Figura 1: Fluxograma referente a síntese da metodologia proposta [4]

Observa-se que é fundamental no processo medir, conhecer e mitigar o ruído de fundo do ambiente. Caso o ambiente tenha um ruído de fundo menor que 6 dB quando comparado com o sinal radiado pelo cabo, conforme as recomendações da CISPR 25 [5], sugere-se aumentar a potência do sinal aplicado ao cabo blindado sob ensaio. Este procedimento irá melhorar a relação sinal/ruído do ambiente, ou seja, será factível a realização de uma medição com confiabilidade e repetitividade. Antes de realizar a pequena abertura, furo circular no centro do cabo com diâmetro de 1 cm conforme ilustram as Figuras 2 e 4, no condutor deve-se medir a impedância característica do cabo, o ruído de fundo e o campo radiado pelo cabo sob ensaio sem o furo. Neste caso, se a ênfase do ensaio for a medição do fator de qualidade da blindagem do cabo, deve-se colocar os conectores na parte externa do arranjo conforme é ilustrado na Figura 2. Se houver necessidade, ou seja, se mesmo assim for identificado que há valores significativos de ondas eletromagnéticas radiadas em valores proibitivos pelos conectores, eles deverão ser blindados. A Figura 2 apresenta o arranjo utilizado e verifica-se que os conectores foram instalados na parte externa do plano de massa, ou seja, o equipamento sob ensaio nesse caso é o cabo coaxial isolado.

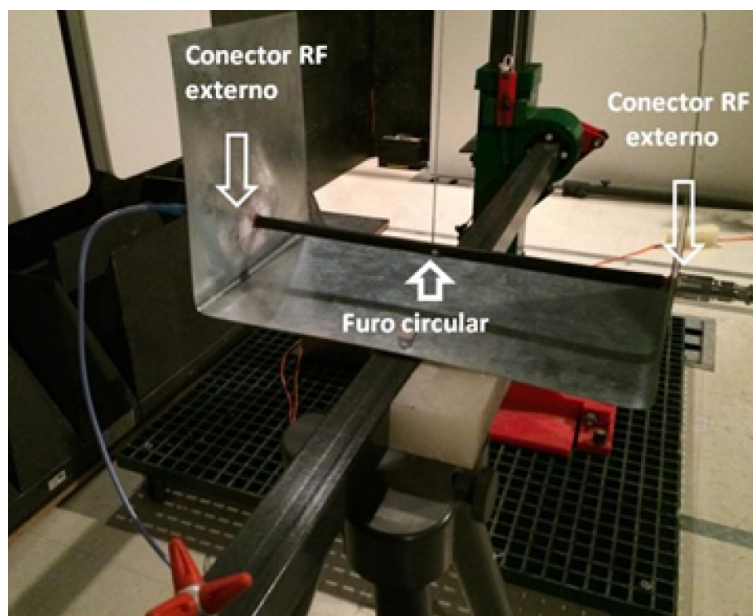


Figura 2: Arranjo instalado na câmara semianecóica do SENAI CIMATEC, em Salvador

A Figura 3 apresenta o arranjo, os equipamentos usados e as dimensões do plano de massa. O cabo sob ensaio foi instalado a uma altura de 5 cm do piso do plano de massa com o objetivo de atender à solicitação da normativa vigente internacional CISPR 25 [5]. O objetivo é criar um arranjo o mais próximo possível do veículo, o que coloca o dispositivo sob ensaio em uma condição muito próxima da realidade.

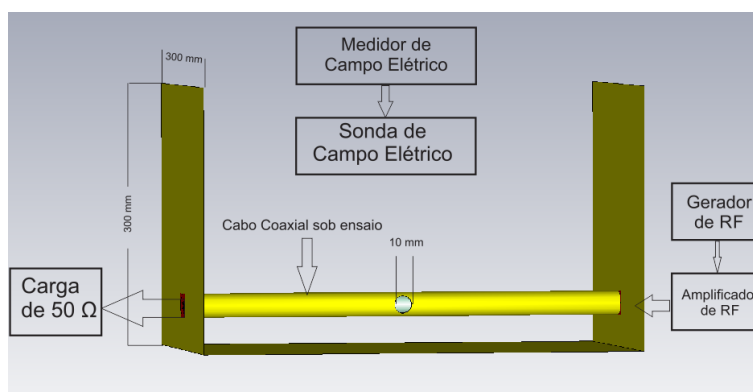


Figura 3: Arranjo e as dimensões do plano de massa

3 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

A modelagem computacional foi realizada com o uso do CST-MWS [11]. Esta ferramenta utiliza o método FIT (*Finite Integration Technique*), método numérico que utiliza uma representação discreta das equações de Maxwell no formato integral. Um modelo virtual com ênfase no plano de massa e cabo foi criado, com o objetivo de representar, no ambiente virtual, os ensaios realizados em laboratório. Espera-se que as simulações computacionais apresentem as mesmas frequências

de ressonâncias das medições e amplitudes aproximadas. Todos os parâmetros, exceto o VSWR da carga de 50 ohms do arranjo proposto foram devidamente representados na simulação, tais como o comprimento, o diâmetro do furo na parte externa do cabo, a localização do medidor de campo elétrico para a obtenção dos dados, o material utilizado e entre outros. A Figura 4 ilustra o modelo computacional criado.

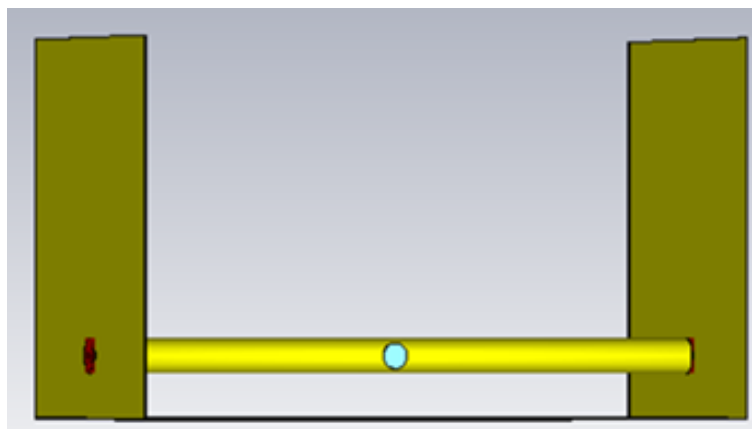


Figura 4: Modelagem computacional de um cabo com blindagem constante e com uma abertura circular na malha com diâmetro de 1 cm

4 RESULTADO DAS MEDIÇÕES E SIMULAÇÕES

A Figura 5 apresenta uma análise no domínio da frequência do campo elétrico medido juntamente ao simulado. A modelagem computacional validou as medições realizadas. Observa-se que há uma correlação relevante, principalmente com ênfase na amplitude, dos valores medidos versus simulados.

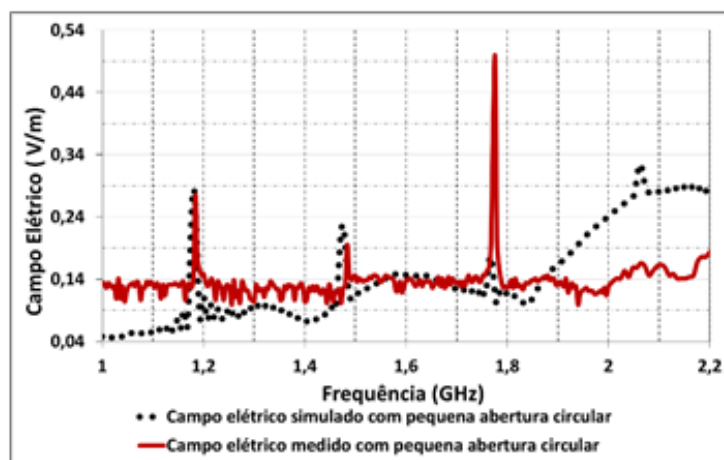


Figura 5: Campo elétrico radiado por uma pequena abertura circular de 0.5 cm de raio - valores medidos e simulados.

É importante deixar claro que no modelo computacional, utilizou-se uma carga resistiva ideal, ou seja, o “Voltage Standing Wave Ratio” (VSWR) é constante e igual a um em toda a faixa de

frequência simulada. A Figura 6 ilustra o VSWR medido.

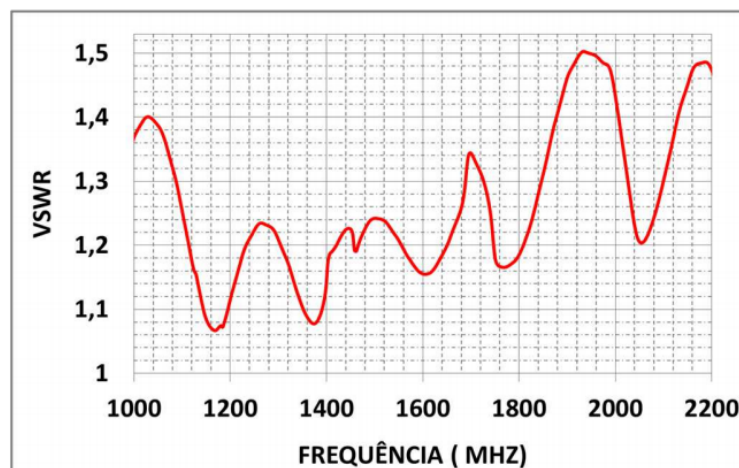


Figura 6: Voltage standing wave ratio (VSWR) medido na carga de 50 ohms.

Com a finalidade de realizar uma análise objetiva dos dados medidos versus simulados, utilizou-se o algoritmo *Feature Selective Validation* (FSV). Esta ferramenta computacional é utilizada pela comunidade científica na comparação entre os resultados de simulação e medição para a área de EMC/EMI [12, 13, 14]. Este método permite analisar separadamente as características de amplitude e frequência de uma forma de onda arbitrária. Para este algoritmo são necessários dois vetores de dados, com unidades arbitrárias e equivalentes, que são processados e comparados seguindo os passos abaixo:

- Amostram-se os dois vetores de maneira a obter o mesmo número de pontos sobre uma faixa de frequência coincidente;

- Separa-se as componentes Dc, Baixa Frequência e Alta Frequência por transformação de Fourier dos sinais, extraindo respectivamente:

- 1) Região Dc: Os primeiros 4 pontos;
- 2) Região Lo: O quinto ponto seguido de quarenta por cento dos pontos remanescentes;
- 3) Região Hi: todos os pontos restantes.

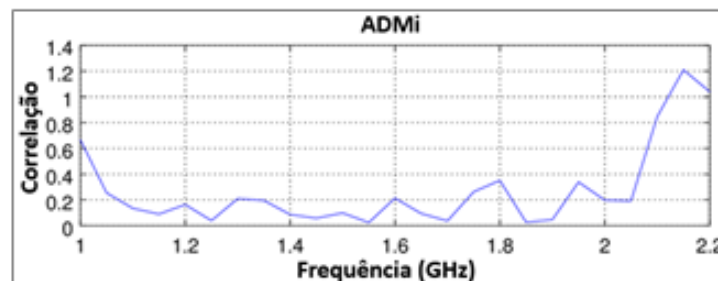


Figura 7: Medida de diferença de amplitude - ADMi

Transformam-se, novamente, essas 3 regiões para o domínio original e na sequência cria-se uma Medida de Diferença de Amplitude (ADM) a partir da diferença normalizada dos dados de baixa frequência. O ADM está representado por um gráfico ponto a ponto (ADMi) conforme ilustra a Figura 7. A Equação 3 descreve o ADM, onde $Lo1$ e $Lo2$ são os componentes de baixa frequência dos dados originais e n é o número total de pontos considerados.

$$ADM(n) = \left[\frac{\alpha}{\beta}\right] + \left[\frac{\chi}{\delta}\right] \exp\left[\frac{\chi}{\delta}\right] \quad (3)$$

Onde,

$$\alpha = ([Lo_1(n)] - [Lo_2(n)]) \quad (4)$$

$$\beta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ([Lo_1(i)] + [Lo_2(i)]) \quad (5)$$

$$\chi = ([Dc_1(n)] - [Dc_2(n)]) \quad (6)$$

$$\delta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N ([Dc_1(i)] + [Dc_2(i)]) \quad (7)$$

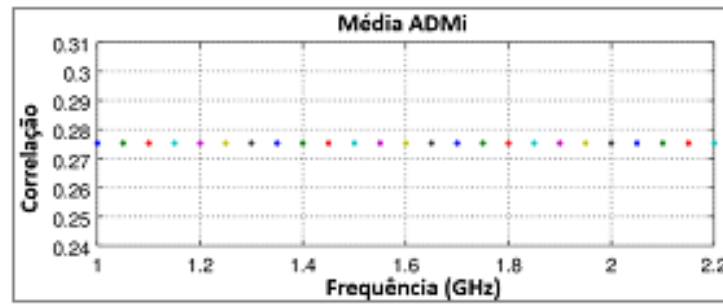


Figura 8: Média referente às diferenças de amplitude - ADMi

A Figura 8 ilustra a média referente às diferenças de amplitude do sinal medido versus simulado do experimento. Conforme pode-se observar na Tabela 1, referente a classificação de qualidade de correlação, a média referente às diferenças de amplitude apresentaram um bom resultado, ou seja, está entre 0,2 e 0,4.

Tabela 1: Classificação de Qualidade de Correlação

FSV (Quantitativo)	FSV (Qualitativo)
Menor que 0.1	Excelente
Entre 0.1 e 0.2	Muito bom
Entre 0.2 e 0.4	Bom
Entre 0.4 e 0.8	Razoável
Entre 0.8 e 1.6	Pobre
Maior que 1.6	Muito pobre

Na sequência cria-se uma Medida de Diferença de Frequência (FDM), a partir da diferença normalizada de uma combinação de derivadas dos dados de média e alta frequência. O FDM está representado por um gráfico ponto a ponto (FDMi) conforme ilustra a Figura 9. As Equações correspondentes estão descritas em (8), (9), (10) e (11):

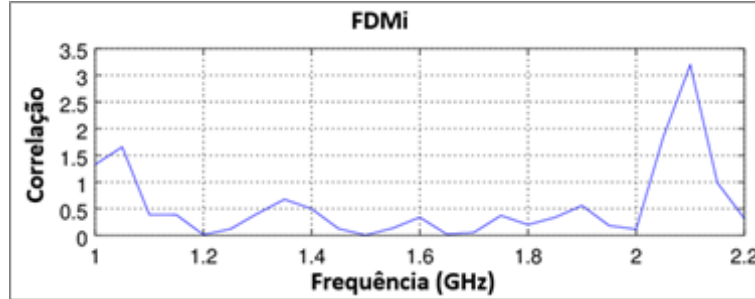


Figura 9: Medida de diferença de frequência - FDMI

$$FDM(n) = 2(|(FDM)_1(n) + (FDM)_2(n) + (FDM)_3(n)|) \quad (8)$$

$$FDM_1(n) = \frac{([Lo'_1(n)] - [Lo'_2(n)])}{\frac{2}{N} \sum_{i=1}^N ([Lo'_1(i)] + [Lo'_2(i)])} \quad (9)$$

$$FDM_2(n) = \frac{([Hi'_1(n)] - [Hi'_2(n)])}{\frac{6}{N} \sum_{i=1}^N ([Hi'_1(i)] + [Hi'_2(i)])} \quad (10)$$

$$FDM_3(n) = \frac{([Hi''_1(n)] - [Hi''_2(n)])}{\frac{7.2}{N} \sum_{i=1}^N ([Hi''_1(i)] + [Hi''_2(i)])} \quad (11)$$

O FDM está representado por um gráfico ponto a ponto (FDMi) conforme ilustra a Figura 9. A Figura 10 apresenta o resultado da média, no domínio da frequência, referente as diferenças de frequência. Conforme a Tabela 1, o resultado encontra-se dentro da faixa de classificação denominada razoável.

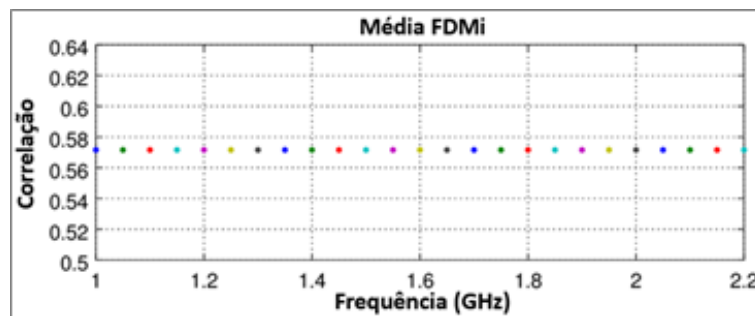


Figura 10: Média referente a diferença de frequência-FDMI

A Figura 10 apresenta o resultado da média, no domínio da frequência, referente as diferenças de frequência. Conforme a Tabela 1, o resultado é igual a 0,57 e qualitativamente razoável.

Uma das representações mais úteis é a análise ponto a ponto. Esta análise faz um estudo pontual por ponto ao longo dos conjuntos de dados, destacando as áreas onde existem grandes diferenças. As Figuras 8, 10 e 12 são os resultados, no domínio da frequência de 1 GHz a 2.2 GHz, referentes as médias: ADMi, FDMi e GDMi.

A medida da diferença global (GDM) é obtida através dos valores ADM e FDM conforme ilustram as Figuras. 12 e 13. A Equação correspondente está descrita em (11):

$$GDM(n) = \sqrt{(ADM(n))^2 + (FDM(n))^2} \quad (12)$$

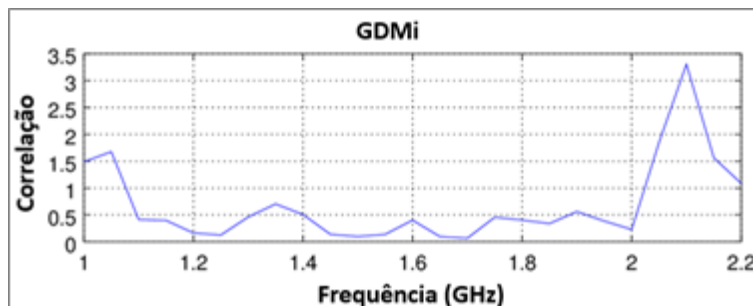


Figura 11: Diferenças global-GDMI de 1 GHz a 2.2 GHz

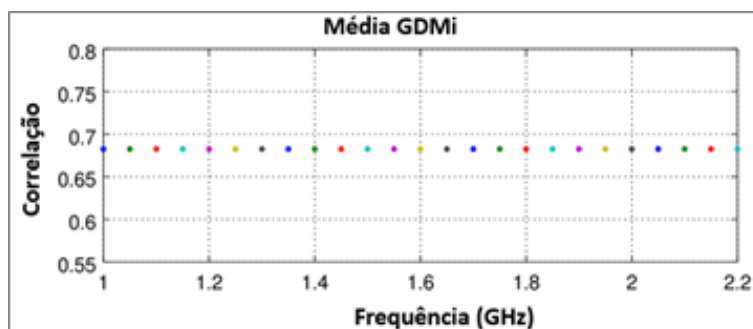


Figura 12: Média referente às diferenças globais – GDMi 1 GHz a 2.2 GHz

Observando-se a Figura 12 e correlacionando com os dados presentes na Tabela 1, conclui-se que o resultado global médio foi razoável.

A Figura 13 apresenta o ruído de fundo e os campos elétricos radiados medidos com e sem a abertura circular de 0,5 cm de raio.

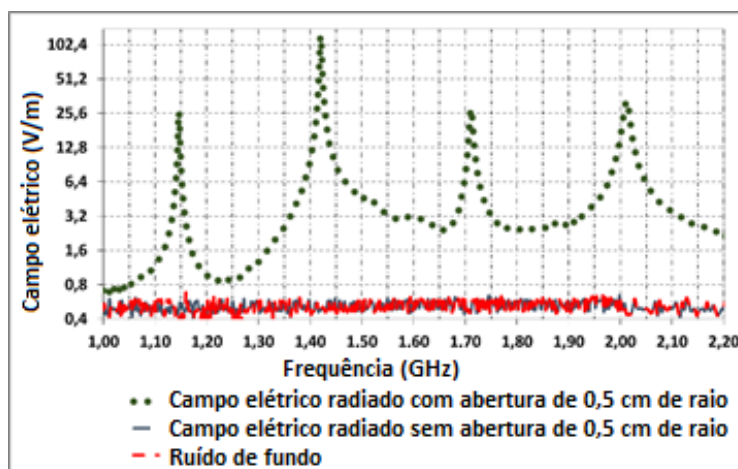


Figura 13: Ruído de fundo e os campos elétricos radiados medidos com e sem a abertura circular de 0,5 cm de raio

Com o uso da Equação (1), calculou-se o fator de blindagem na frequência de 1,4 GHz e obteve-se 48,14 dB. Observa-se que nessa frequência o campo elétrico medido, com a abertura

circular, apresenta a máxima amplitude, ou seja, 122,57 (V/m).

$$FB_{dB} = 20 \cdot \log \frac{122,57}{0,480} = 48,14 \text{ dB} \quad (13)$$

O FB blindagem máximo calculado através dos dados de medições apresentou o valor de 48,14 por cento do valor especificado pela norma do IEEE [15,16].

5 Considerações finais

O algoritmo “Feature Selective Validation” (FSV) com ênfase em análises qualitativas e quantitativas é muito eficiente, entretanto há variáveis que existem na medição, como por exemplo o VSWR da carga resistiva, que na maioria das vezes não são levados em consideração na simulação computacional e poderão pesar de maneira pejorativa nos resultados das correlações. O modelo computacional simulado considerou a carga resistiva como ideal, mas mesmo assim conseguiu-se obter uma boa correlação em amplitude (ADM) e razoável em frequência (FDM) e (GDM). O Cabo sob ensaio poderá ser utilizado com conectores eficientes e em aplicações onde não ocorra radiação em modo comum [4]. A metodologia proposta é eficiente para a medição do fator de blindagem de cabos coaxiais de 1 GHz a 2.2 GHz [2, 4].

6 Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Senai Cimatec pelo uso dos equipamentos e da câmara blindada semianecóica. A CAPES, CNPq e a FAPESB pelo apoio financeiro.

Referências

- [1] BHAT, Omkar; BHAT, Sagar; GOKHALE, Pradyumna. Implementation of IoT in smart homes. *Int. J. Adv. Res. Comput. Commun. Eng.*, v. 6, n. 12, p. 149-154, 2017;
- [2] Ott, Henry W., *Electromagnetic Compatibility Engineering*, John Wiley & Sons, 2011. y
- [3] Xiao, Pei; Du, Ping-An; Zhang, Bingxue. An Analytical Method for Radiated Electromagnetic and Shielding Effectiveness of Braided Coaxial Cable. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, VOL.61,n.1, p.121-127, Feb.2019
- [4] Kenedy Marconi G. Santos, Marcela Silva Novo, Glauco Fontgalland, Marcelo Bender Perotoni, "A simple test for measuring the shielding effectiveness of coaxial cables and connectors", *International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics*, p. 1-16,2017.
- [5] CISPR 25: Edition 3.0 2008-03: Vehicles, boats and internal combustion engines - Radio Disturbance Characteristics – Limits and methods for the protection on board receiver;
- [6] MORA, Nicolas et al. An improved formula for the transfer impedance of two-layer braided cable shields. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, v. 57, n. 3, p. 607-610, 2015.
- [7] C. Tremola and M. Aurelio Azpurua and E. Javier Paez and G. Moruga, *Electromagnetic Compatibility in Latin America - A technological and regulatory perspective*, journal IEEE Latin America Transactions, 2013, volume 11, number 6, pages 1307-1317.
- [8] B. Demoulin and L. Kon, Shielded Cable Transfer Impedance Measurements, *IEEE-EMC Newsletter* (Fall 2010), 30–37.
- [9] B. Demoulin and L. Kon, Shielded Cable Transfer Impedance Measurements in the Microwave Range of 1 GHz to 10 GHz, *IEEE-EMC Newsletter* (Winter 2011), 52–61.

-
- [10] L. Martens et al., Comparison of test methods for the characterization of shielding of board-to-backplane and board to cable connectors, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility 42(4) (Nov 2000), 427–440.
 - [11] CST Microwave Studio® - 2019 CST Computer Simulation Technology AG.
”, <<https://www.cst.com/Applications/Category/Connectors>>, 27/04/2019.
 - [12] Santos, K. M. G. et al. Shielding Effectiveness Measurements of Coaxial Cable and Connectors Using Compact Open Area Test Site. Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, v. 16, n. 4, p. 997-1011, 2017.
 - [13] Ogundapo, O., Charles Nche, Alistair Duffy, and Gang Zhang. 'Application of the Feature Selective Validation Method and Kolmogorov-Smirnov Test to Evaluate Handling Effects on Crosstalk of Ethernet Cables.' American Journal of Electrical and Electronic Engineering 6, no. 1 (2018): 32-37.
 - [14] Ruzek, Vaclav; Drinovsky, Jiri; Cupak, Jan. Feature Selective Validation of Automotive EMC Pre-compliance Tests. Radioengineering, v. 27, n. 1, p. 135, 2018.
 - [15] IEEE Recommended Practice for Validation of Computational Electromagnetics Computer Modeling and Simulations, IEEE Std 1597.2-2010, pp. 1-124, 2011.
 - [16] Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE, Standard Method for Measuring the Effectiveness of Electromagnetic Shielding Enclosures. IEEE, 2006.