

# Parâmetros S do Teflon<sup>®</sup>: comparação entre simulação computacional e valores experimentais

Adriano Luiz DE PAULA<sup>1,2</sup>, Mirabel Cerqueira REZENDE<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial – CTA / Instituto de Aeronáutica e Espaço – IAE / Divisão de Materiais – AMR

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisa Espaciais-INPE / Laboratório de Computação e Matemática Aplicada - LAC

José Jesus PEREIRA<sup>3</sup>

<sup>3</sup> Comando-Geral de Tecnologia Aeroespacial– CTA/Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA/Física e Química dos Materiais Aeroespaciais – PG-EAM-M

Evandro Luis NOHARA<sup>4</sup>

<sup>4</sup> Universidade de Taubaté – UNITAU / Departamento de Engenharia Mecânica

Joaquim J. BARROSO<sup>5</sup>

<sup>5</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE / Laboratório Associado de Plasma

**Resumo** — Nos dias atuais, a simulação computacional adquire importância cada vez maior na área de materiais, uma vez que é possível prever características e comportamento dos mesmos, em diferentes setores da engenharia, por exemplo, mecânica, eletrônica, elétrica. O objetivo deste trabalho é apresentar um estudo comparativo dos parâmetros S de corpos-de-prova de poli(difluoroetileno) – Teflon<sup>®</sup>, em cinco espessuras diferentes, obtidos experimentalmente pelo uso da técnica de linha de transmissão em guia de ondas retangular, na faixa de frequências entre 8,2 e 12,4 GHz, e por simulação computacional com base no uso do software *Microwave Studio* (MS) da CST (*Computer Simulation Technology*). Os resultados obtidos mostram que a simulação computacional apresenta boa concordância com os valores obtidos experimentalmente.

**Palavras-chaves** — Caracterização Eletromagnética, Parâmetros S, Simulação Eletromagnética.

## I. INTRODUÇÃO

O conhecimento da permissividade e permeabilidade complexas de materiais é de grande interesse em aplicações científicas e industriais. A medição de  $\epsilon_r$  e  $\mu_r$  em frequências de microondas encontra aplicação direta, por exemplo, no estudo de efeitos biológicos da radiação eletromagnética [1], em sinterização de cerâmicas, em soldagem de plásticos, em setores da indústria aeroespacial, microeletrônica, telecomunicações e, em particular, na pesquisa de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE) [1-2]. Neste caso, o conhecimento desses parâmetros permite prever as características eletromagnéticas dos materiais via simulações computacionais, de modo a otimizar o seu desenvolvimento e processamento, bem como a sua utilização para fins específicos [2-3].

A simulação eletromagnética adquire relevância à medida que os resultados confirmam e reproduzem os dados experi-

mentais. Uma forte associação entre simulação e experimento contribui para aumentar a confiabilidade do aplicativo desenvolvido para a finalidade específica [4]. Uma das finalidades da simulação computacional é reconstruir as medidas experimentais, com a finalidade de entender o comportamento e avaliar os parâmetros das medidas, obter novos parâmetros em situações diferentes, porém consistentes com a análise experimental [4].

Em situações em que uma análise modal completa torna-se muito complexa e de difícil solução, utilizam-se métodos numéricos, tais como Métodos de Elementos Finitos (FEM) e Diferença Finita (FDM) e, mais recentemente, está sendo popularizado no meio científico, um software para simulação com características próprias para análises e projetos eletromagnéticos, em uma banda de frequências específica, o M.S. CST (*Microwave Studio Computer Simulation Technology*) [4-6].

## II. SIMULADOR COMPUTACIONAL

O MS-CST utiliza para simulação o método PBA (*Perfect Boundary Approximation*) e uma extensão do TST (*Thin Sheet Technique*) em todos os domínios [4-6]. Este software contém quatro diferentes técnicas de simulação; *transient solver*, *frequency domain solver*, *eigenmode solver* e *modal analysis solver*. Estas técnicas são utilizadas conforme as aplicações específicas [4-6].

Inédito no Brasil, este trabalho utiliza a ferramenta computacional MS-CST para simulação, análise e desenvolvimento de Materiais Absorvedores de Radiação Eletromagnética (MARE). Este estudo tem como objetivo verificar a convergência entre resultados obtidos experimentalmente e pela simulação computacional dos parâmetros S ( $S_{11}$  e  $S_{21}$ ), apresentado na Figura 1, do poli(difluoroetileno) com diferentes espessuras.

A Figura 1 representa a simulação do campo elétrico e do campo magnético com condições de contorno de um guia de ondas da faixa de frequências entre 8,2 e 12,4 GHz. O vetor campo elétrico é indicado por B, o vetor campo magnético por H e o vetor corrente por I, as cores de verde para vermelho indicam o aumento dos campos: elétrico em V/m e magnético em A/m.

Adriano Luiz de Paula, alpaula@iae.cta.br; José Jesus Pereira, jesusp\_99@yahoo.com.br; Mirabel Cerqueira Rezende, mirabel@iae.cta.br, Tel +55-12-3947-6420, Fax +55-12-3947-6405; Joaquim J. Barroso, barroso@plasma.inpe.br, Tel +55-12- 3645-6696; Evandro Luis Nohara, evandro@unitau.br, Tel +55-12-3625-4194.

Este trabalho foi financiado pelo FINEP, por meio do Projeto No. 1757/03 e CNPq (Processo: 301583/06-3)

## IV. MATERIAIS E MÉTODOS

Os valores de permissividade e permeabilidade complexas do poli(difluoroetileno), comercialmente conhecido como Teflon®, estão disponíveis na literatura [10-11] por se tratar de um material com propriedades eletromagnéticas bem conhecidas. Por este motivo, esse material foram escolhido como referência.

Para as medidas dos parâmetros S ( $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{12}$  e  $S_{22}$ ), é adotada a configuração de medida apresentada na Figura 3, o qual o sistema é fechado com o porta-amostra entre o adaptador da porta 1 e a extremidade do trecho de guia de ondas da porta 2, mantendo como plano de referência o adaptador da porta 1 [3,8].



Fig. 3. Instrumentação para medida dos parâmetros S [3,8].

## V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 4 são apresentadas as medidas dos parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$  em decibéis (dB). Os parâmetros  $S_{11E}$  e  $S_{21E}$  referem-se aos dados experimentais e  $S_{11S}$  e  $S_{21S}$  aos valores simulados, na faixa de frequências compreendida entre 8,2 a 12,4 GHz, do corpo-de-prova de poli(difluoroetileno), com espessura igual a 0,88 mm. Pode-se observar pelo gráfico da Figura 4 que há boa concordância entre as medidas experimentais e simuladas dos valores de  $S_{21}$ , que se apresentam próximos de zero e dos valores  $S_{11}$  simulados que se mostram com um ligeiro acrive entre -15 e -12 dB nas frequências de 8,2 e 12,4 GHz, respectivamente; e para os dados experimentais com -18 dB de valor médio em toda a faixa de frequências entre 8,2 e 12,4 GHz.

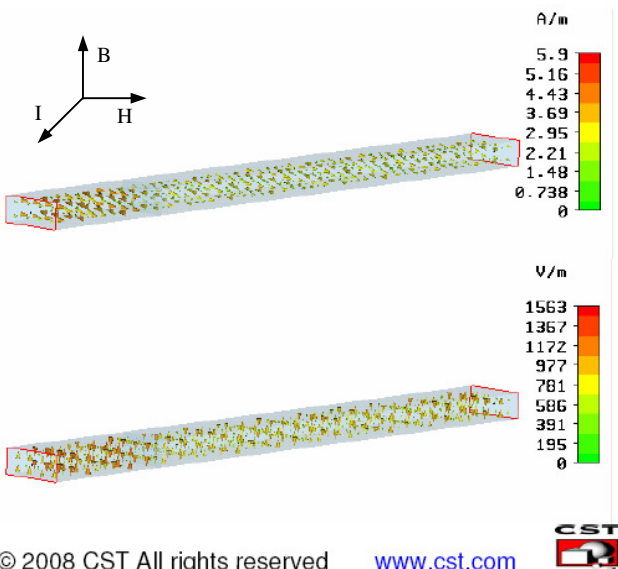


Fig. 1. Configuração de simulação dos campos elétrico e magnético em guia de ondas retangular na faixa de frequências entre 8,2 e 12,4 GHz.

## III. CALIBRAÇÃO DO ANALISADOR DE REDES VETORIAL

Neste estudo, o poli(difluoroetileno) foi avaliado nas espessuras de 0,88 mm; 5,75 mm; 9,77 mm; 11,73 mm e 15,65 mm, medidos com o método de caracterização eletromagnética de linha de transmissão e técnica de guia de ondas retangular. Para isto, foram utilizados o acessório WR-90 (Banda X – 8,2 a 12,4 GHz) e um analisador de redes vetorial 8510C, ambos da Agilent Technologies [7].

Para a calibração do analisador de redes 8510C, os valores estabelecidos por padrões devem estar armazenados em sua memória, para que ao executar os procedimentos de calibração os valores medidos e os valores de referência sejam comparados, de forma a obter precisão e exatidão das medidas efetuadas [7-8]. Para isso, são utilizados conjuntos de calibração de acordo com a banda de frequências. A Figura 2 apresenta o conjunto de calibração para a banda X [9,12-13] utilizado neste trabalho e descrito a seguir: (a) parafusos com porcas e parafusos guia, (b) trechos de guia de ondas com atenuador de impedância fixa, (c) trecho de guia de ondas com extremidades abertas, (d) acopladores para conexão do guia de ondas ao cabo coaxial de 3,5mm, (e) placa metálica e (f) porta-amostra ou item usado como atraso, em conjunto da placa metálica [9].

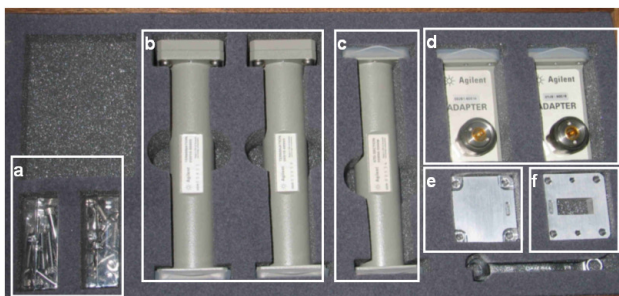


Fig. 2. Conjunto de calibração em guia de ondas para a banda X [9].

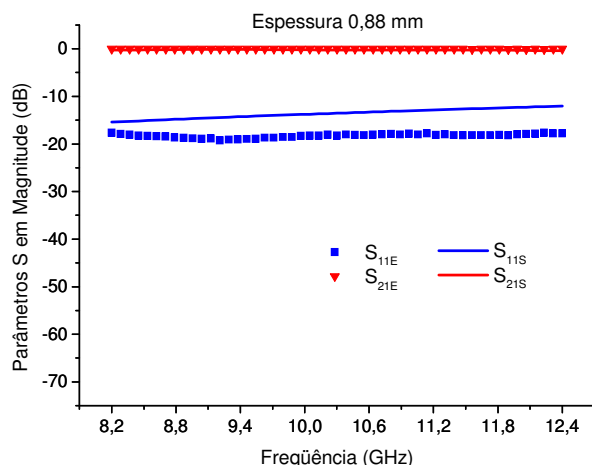


Fig. 4. Medidas experimentais e simuladas dos parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$  da amostra de poli(difluoroetileno), com 0,88 mm de espessura.

As curvas do parâmetro  $S_{21}$  na Figura 4 se sobrepõem no patamar de 0 dB, observados tanto na curva simulada quanto na experimental, mantendo uma diferença em média de 0,15 dB entre si. Os valores experimentais de  $S_{11}$  ( $S_{11E}$ ) apresentam-se entre -5 e -10 dB e os valores simulados de  $S_{11}$  ( $S_{11S}$ ) limitam-se ao intervalo de -5 a -12 dB, ambos valores experimentais e simulados apresentam-se nas frequências extremas, 8,2 e 12,4 GHz..

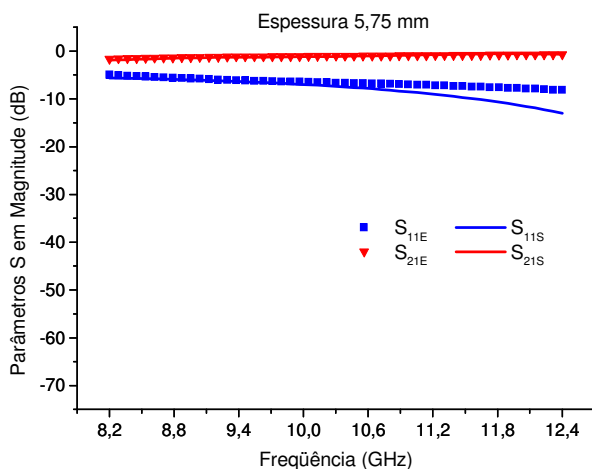


Fig. 5. Medidas experimentais e simuladas dos parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$  do poli(difluoroetileno), com 5,75 mm de espessura.

Embora os valores simulados de  $S_{11}$  não reproduzem exatamente valores experimentais, com diferença percentual em média igual a 14%, as Figuras 4 e 5 apresentam boa concordância com o dados experimentais. Por exemplo, na simulação foi possível notar o aumento médio dos valores de  $S_{11}$  de -18 dB para -7 da Figura 4 para a Figura 5, assim como se observa nos valores experimentais, de -14 dB para -8 dB. Este aumento dos valores médios do parâmetro  $S_{11}$  é devido ao aumento da espessura do corpo-de-prova de poli(difluoroetileno), pois a onda eletromagnética interage com uma massa maior do material.

Nas curvas das Figuras 6 e 7 estão apresentados os valores dos parâmetros S experimental e simulado ( $S_{11E}$ ,  $S_{21E}$ ,

$S_{11S}$  e  $S_{21S}$ ) para os corpos-de-prova espessuras 9,77 e 11,73 mm, respectivamente. Nota-se que os valores de  $S_{21}$  simulados estão concordantes com os valores experimentais, mantendo um diferença em média de 0,30 dB entre si, enquanto os valores de  $S_{11}$  apresentam picos de ressonância em frequências diferentes. Na Figura 6, a ressonância ocorre na frequência 11,6 GHz para  $S_{11}$  experimental e 11,7 GHz para  $S_{11}$  simulado, pode-se observar também a diferença em magnitude -47,1 e -35,7 dB para  $S_{11}$  experimental e  $S_{11}$  simulado, respectivamente. Na Figura 7, a ressonância encontra-se na frequência 10,0 GHz com magnitude -49,5 dB para  $S_{11}$  experimental e na frequência 10,3 GHz com magnitude -29,0 dB para  $S_{11}$  simulado.

O efeito de ressonância ocorre quando a onda refletida da face frontal sofre cancelamento de fase com a onda refletida da face posterior do corpo-de-prova [2-3,14], ou seja, quando a espessura da amostra dielétrica é um múltiplo inteiro de meio comprimento de onda no interior do material.

Uma estimativa da frequência de ressonância em termos da espessura e da permissividade da amostra é obtida combinando (1) e (2), ou seja;

$$d = n \frac{\lambda_d}{2}, \quad n=1,2,3,\dots \quad (1)$$

$$\lambda_d = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r} f_0} \quad (2)$$

onde:

$c$  = velocidade da luz no vácuo, em m/s.

$f_0$  = frequência de ressonância, em hertz.

$d$  = espessura do material, em m.

$\epsilon_r$  = permissividade complexa relativa.

$\lambda_d$  = comprimento de onda que interage com material, em m.

Combinando (2) e (1), com  $n=1$ , tem-se

$$\sqrt{\epsilon_r} = \frac{1,5 \cdot 10^8}{d \cdot f_0} \quad (3)$$

Usando o valor conhecido  $\epsilon_r=2,03$  e a espessura de 9,77 mm (Fig. 6), tem-se  $f_0=11,6$ , GHz, um resultado próximo das frequências simulada e medida, considerando que as expressões (1)-(3) sejam estritamente válidas para ondas planas em um meio infinito.

O desvio observado entre frequências de ressonância diferentes, mesmo que por uma pequena diferença, da ordem de 0,2 GHz, indica que a técnica computacional não está otimizada o suficiente para obter uma convergência perfeita entre os valores experimentais e simulados dos parâmetros S, bem como a simulação computacional não leva em consideração os parâmetros do ambiente de medidas, como: temperatura ambiente e umidade relativa.

## VI. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos experimentalmente e na simulação computacional apresentam boa concordância dos valores para todas as espessuras estudadas de poli(difluoroetileno). As curvas do parâmetro  $S_{21}$  se sobrepõem no patamar de 0 dB, observados tanto na curva simulada quanto na experimental, mantendo uma diferença em média de 0,15 dB nas espessuras estudadas.

Foi possível observar que o aumento da espessura do corpo-de-prova entre 0,88 e 5,75 mm aumenta o valor do parâmetro  $S_{11}$  de -18 dB para -6 dB de valores médios experimentais, respectivamente. Assim como observado na simulação com aumento de -13 dB para -8 dB de valores médios do parâmetros  $S_{11}$ , para as espessuras 0,88 e 5,75 mm, respectivamente. Este aumento do parâmetro  $S_{11}$  é devido à interação eletromagnética com maior massa do corpo-de-prova.

Os corpos-de-prova com espessuras de 9,77 mm e 11,73 mm apresentam o efeito ressonância devido ao cancelamento de fases entre as faces do corpo-de-prova. A frequência de ressonância varia de acordo com a espessura do corpo-de-prova, com a espessura de 9,77 mm a frequência de ressonância foi de 11,6 GHz e para a espessura de 11,73 mm foi de 10,0 GHz para os valores experimentais.

O desvio observado entre frequências de ressonância diferentes, indica que a técnica computacional não está otimizada o suficiente para obter uma convergência perfeita entre os valores experimentais e simulados dos parâmetros S.

Os valores experimentais e simulados do parâmetro  $S_{11}$  obtidos com o corpo-de-prova de espessura 15,65 mm apresentam boa concordância entre si, com valores médios de -7,4 dB para os experimentais e -7,0 dB para os simulados na faixa de frequências entre 9,6 e 12 GHz, os picos de ressonância apresentam-se na frequência de 8,2 GHz.

## REFERÊNCIAS

- [1] PRORAD – Consultores em Rádio Proteção “Radiações não-ionizantes: conceitos, riscos e normas. Disponível em: <http://www.prorad.com.br/pro/rmi.pdf>. Acesso em: 11 abri 2008.
- [2] E. L. Nohara, “*Materiais absorvedores de radiação eletromagnética (8-12 GHz) obtidos pela combinação de compósitos avançados dielétricos e revestimentos magnéticos*”. 2003. 198f. Tese (Doutorado em Ciência) – Curso Engenharia Aeronáutica e Mecânica, área Física e Química dos Materiais Aeroespaciais – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos, 2003a.
- [3] J. J. PEREIRA, J. J. “*Caracterização eletromagnética de materiais absorvedores de microondas via medidas de permissividade e permeabilidade complexas na banda X*”. 2007. 201f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante) – Curso de Engenharia Mecânica, área Tecnologia de Materiais e Processos de Fabricação – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2007.
- [4] RF Design and Analysis C.S.T. “*Microwave Studio Getting Started*” p.3-8.
- [5] B. Krietenstein, R. Schuhmann, P. Thoma, T. Weiland “*The perfect boundary approximation technique facing the big challenge of high precision field computation*”, Darmstadt University of Technology, TEMF, Schloßgartenstr. Disponível em <http://accelconf.web.cern.ch/AccelConf/198/PAPERS/TH4041.PDF>. Acesso em: 10 abr 2008.
- [6] CST – Computer Simulation Technology. CST Microwave Studio. Performance. Disponível em: <http://www.cst.com/Content/Products/MWS/Performance.aspx>, Acessado em 10 abr 2008.

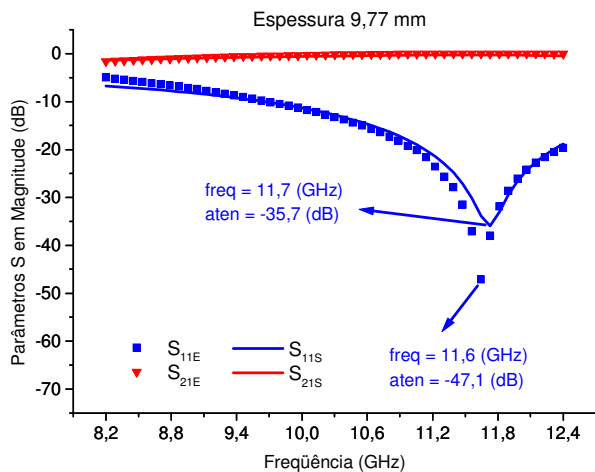


Fig. 6. Medidas experimentais e simuladas dos parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$  do poli(difluoroetileno), com 9,77 mm de espessura.

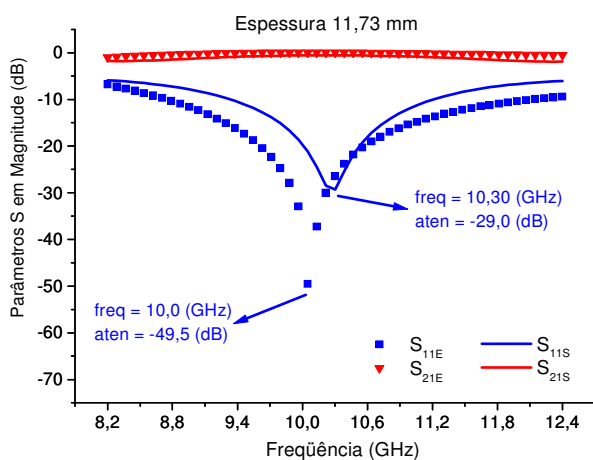


Fig. 7. Medidas experimentais e simuladas dos parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$  do poli(difluoroetileno), com 11,73 mm de espessura.

Na Figura 8 observa-se que os valores dos parâmetros  $S_{21}$  experimental e simulado, obtidos das medidas com o corpo-de-prova de poli(difluoroetileno), com espessura de 15,65 mm, mostram-se convergentes entre si com valores médios de -7,4 dB para o experimental e -7,0 dB para o simulado na faixa de frequência entre 9,6 e 12 GHz, os picos de ressonância apresentam-se na frequência de 8,2 GHz.

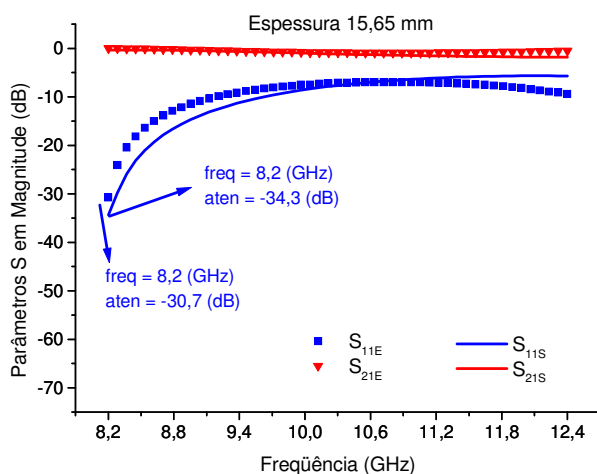


Fig. 8. Medidas experimentais e simuladas dos parâmetros  $S_{11}$  e  $S_{21}$  do poli(difluoroetileno), com 15,65 mm de espessura.

- [7] AGILENT TECHNOLOGIES “Agilent 8510XF Vector Network Analyzer Single-Connection, Single-Sweep Systems”. Application Note Product Overview - 5965-9888E. USA. 2000.
- [8] AGILENT TECHNOLOGIES. “Specifying calibration standards for the Agilent 8510 Network Analyzer”. Application Note 8510-5B 5659-4352. USA. 2006.
- [9] AGILENT TECHNOLOGIES. “11644A X, P and K Waveguide Calibration Kits”. User’s and service guide, 83 p., 2002.
- [10] A. R. V. HIPPEL “*Dielectric Materials and Applications*”. USA: Massachusetts Institute of Technology, John Wiley, New York, 1954.
- [11] A. M. Nicolson, G. F. Ross, “Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 19, no. 4, p.377-382, Nov. 1970.
- [12] A. J. VICENTE “*Guias de Onda Retangulares Preenchidos por Múltiplas Camadas de Dielétricos para Filtragem em Microondas de 10 à 15 GHz*”. 2004. 124f. Dissertação (Mestrado) – Curso de Engenharia Elétrica – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- [13] K. BUEL. “*Development of Engineered Magnetic Materials for Antenna Applications*”. 2005. 198f. Dissertation (Doctor of Philosophy) – Course Electrical Engineering – The University of Michigan, Michigan, 2005.
- [14] R. SIMÕES. “*Materiais absorvedores de radiação eletromagnética na faixa de 8 a 12 GHz*”. 2005. 88f. Dissertação (Mestrado Profissionalizante) – Curso Engenharia Mecânica, área Tecnologia de Materiais e Processos de Fabricação – Universidade de Taubaté, Taubaté, 2005.